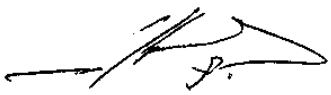
На правах рукописи



Юричев Алексей Николаевич

ГЕОЛОГО-ГЕНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ И ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ РУДОНОСНОСТЬ МАФИТ-УЛЬТРАМАФИТОВЫХ МАССИВОВ ТАЛАЖИНСКОГО И КУЛИБИНСКОГО КОМПЛЕКСОВ ВОСТОЧНОГО САЯНА

25.00.11 – Геология, поиски и разведка
твердых полезных ископаемых, минерагения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Томск
2011

Работа выполнена на кафедре петрографии и в научно-исследовательской лаборатории структурной петрологии и минерагении геолого-географического факультета ФГБОУ ВПО "Национального исследовательского Томского государственного университета"

Научный руководитель: - доктор геолого-минералогических наук, профессор Чернышов Алексей Иванович

Официальные оппоненты: - доктор геолого-минералогических наук, профессор Кучеренко Игорь Васильевич

- кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Мехоношин Алексей Сергеевич

Ведущая организация: - Красноярский научно-исследовательский институт геологии и минерального сырья (КНИИГиМС), г. Красноярск

Защита состоится 22 декабря 2011 года в 14 часов 00 минут на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.07 при ФГБОУ ВПО "Национальный исследовательский Томский политехнический университет" по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, корпус 1, ауд. 111.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВПО "Национального исследовательского Томского государственного университета" (634050, г. Томск, ул. Белинского, 55)

Автореферат разослан « » ноября 2011 г.

Ученый секретарь
совета по защите докторских
и кандидатских диссертаций С.И. Арбузов

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследований мафит-ультрамафитовых комплексов, концентрирующих в себе широкий спектр полезных ископаемых, главным образом, хрома, никеля, меди и благородных металлов, определяется необходимостью познания особенностей их структурной и вещественной организации. Тела ультрамафитов и мафит-ультрамафитов отличаются разнообразием форм, петрографическим и химическим составом, и лишь некоторые массивы обогащены рудными компонентами до промышленно-значимых концентраций (Naldrett, 2003; Шарков, 2006). Геологическое положение интрузивов не позволяет во многих случаях однозначно разделить их на рудоносные и безрудные, поэтому оценку потенциальной рудоносности следует давать на основе комплексного анализа петролого-геохимических особенностей пород, слагающих массивы, а также изучения их внутреннего строения и состава.

На территории Канской глыбы Восточного Саяна при проведении ранее геолого-съемочных и прогнозно-металлогенических работ среди метаморфизованных осадочно-вулканогенных толщ были выявлены многочисленные ультрамафитовые и мафит-ультрамафитовые тела, в которых неоднократно отмечалась рудная минерализация меди, никеля и благородных металлов. Они были отнесены к четырем формационным типам и объединены в четыре комплекса: реститовый – идарский дунит-гарцбургитовый и магматические – кингашский дунит-верлит-пикритовый, талажинский плагиодунит-троктолит-габбро-анортозитовый и кулибинский перидотит-пироксенит-габбровый.

По геологии и рудоносности Канской глыбы написаны производственные и научные отчеты, а также опубликованы монографии и научные статьи. Наиболее значимые результаты приведены в работах Н.Г. Дубинина (1964), А.В. Тарасова и др. (1994), Т.Я. Корнева и др. (2003, 2004), А.Г. Еханина (2000), И.Г. Резникова и др. (2002), А.Д. Ножкина (1997), А.И. Чернышова и др. (2001, 2002, 2004), Г.И. Шведова и др. (1997), А.Н. Смагина и др. (2002, 2006, 2008), М.Ю. Цыпукова (1994), О.М. Глазунова и др. (1995, 2003, 2007, 2010). Тем не менее, материалы различных исследователей затрагивают в основном вопросы геологии и рудогенеза кингашского комплекса с одноименным Cu-Ni-Pt месторождением, и в меньшей степени идарского комплекса. Талажинский и кулибинский комплексы к настоящему времени слабо изучены. Дискуссионна их формационная принадлежность и остается не выясненной их металлогеническая специализация.

Объектами исследований являются плутонические породы мафит-ультрамафитовых массивов талажинского и кулибинского комплексов Канской глыбы Восточного Саяна и их рудная минерализация.

Цель. Комплексная характеристика особенностей пород талажинского и кулибинского комплексов с применением прецизионных методов анализа их вещественного состава и структуры для выявления их перспективности на обнаружение медно-никелевого и благороднометального оруденения.

Задачи. 1. Изучить петрографические, минералогические, петроструктурные, петрохимические и геохимические особенности состава пород мафит-ультрамафитовых массивов талажинского и кулибинского комплексов. 2. Выявить главные типы рудной минерализации и этапы накопления рудных компонентов в потенциальных рудогенерирующих системах. 3. Реконструировать геодинамические условия формирования массивов и оценить составы их родоначальных расплавов. 4. Установить критерии потенциальной рудоносности исследуемых объектов.

Фактический материал. В основу работы положен материал, собранный автором в результате полевых поисковых работ 2005 г., 2008-2009 гг., проводимых ОАО «Красноярскгеология» (г. Красноярск) и Ивановской ГРЭ (г. Канск) в пределах Канской глыбы Восточного Саяна. Всего было изучено 261 штуфных образцов горных пород талажинского и кулибинского комплексов. Минералого-петрографическое описание пород выполнено на основе изучения 261 образцов и их протолочек, 250 прозрачных шлифов и 57 аншлифов. Оценка петрохимических особенностей пород базировалась на результатах 39 оригиналь-

ных силикатных анализов, выполненых в Институте геохимии (г. Иркутск), включающих петрогенные компоненты, а также определение содержаний Cr, Ni, Co, Zn, V, Cu. Редкие и редкоземельные элементы в наиболее представительных породах (36 проб) изучались методом ICP-MS в Институте геологии и минералогии (ИГиМ) СО РАН (г. Новосибирск) и Институте проблем технологии микроэлектроники (ИПТМ) РАН (г. Черноголовка). Химический состав породообразующих и рудных минералов (более 500 анализов) определялся с помощью электронного сканирующего микроскопа Tescan Vega II XMU в Институте экспериментальной минералогии (ИЭМ) РАН (г. Черноголовка). Около 200 определений химических составов рудных минералов выполнены в Аналитическом центре "Геохимия природных систем" Томского государственного университета (г. Томск) с помощью электронного сканирующего микроскопа Tescan Vega II LMU. Анализы пород на золото, платиноиды и рений в количестве 40 штук выполнены в лаборатории геолого-аналитического центра Томского политехнического университета (г. Томск) методом инверсионной вольтамперометрии.

При обработке и анализе полученных результатов использовались опубликованные работы, а также фондовые неопубликованные данные по региону. Для статистической обработки результатов аналитических исследований и их графической презентации применялись пакеты программ: Microsoft Office, Statistica 6.0, Surfer 8.0, Corel Draw X3, AutoCAD 2007, Adobe Photoshop CS3, Microsoft PowerPoint, Comagmat 3.52, 3.57.

Основные защищаемые положения.

1) В Канском блоке СЗ Восточного Саяна установлено два формационных типа дифференцированных ультрамафит-мафитовых интрузий: плагиодунит-троктолит-габбро-анортозитовый и перидотит-пироксенит-габбровый, которые выделены в талажинский и кулибинский комплексы соответственно. Талажинский комплекс представлен расслоенной серией пород, включающей плагиодуниты, троктолиты, оливиновые габбро и анортозиты, которая характеризуется непрерывным петрохимическим трендом. Кулибинский комплекс содержит две петрохимически контрастные серии пород: первая включает перидотиты и пироксениты, а вторая – преимущественно габброиды, что подтверждается обособленными полями фигуративных точек на представительных диаграммах.

2) Расслоенные породы талажинского комплекса кристаллизовались при температурах 1240-1260 °С из низкотитанистого высокоглиноземистого оливин-базальтового расплава повышенной магнезиальности, генерирующегося в обстановке островной дуги. Контрастная ультрамафит-мафитовая серия пород кулибинского комплекса формировалась в надсубдукционной обстановке из исходного известково-щелочного расплава нормальной титанистости и глиноземистости при пониженной магнезиальности и условии температур 1130-1150 °С.

3) Рудная минерализация в ультрамафитах обоих комплексов имеет близкую магнетит-хромшпинелиевую и пирротин-пентландитовую специализацию. Габброиды комплексов отличаются по характеру рудной минерализации. Для габброидов талажинского комплекса характерна пирротин-пентландит-халькопиритовая и магнетит-ильменит-хромшпинелиевая ассоциация, а для кулибинского комплекса устанавливается преимущественно железо-титанистая и пирит-халькопиритовая минерализация.

4) Наиболее перспективным на Cu-Ni-Pt оруденение является Талажинский массив, который по вещественному составу и металлогенической специализации является близким рудоносным Йоко-Довыренскому (СВ Прибайкалье, Россия) и Войсис-Бэй (Лабрадор, Канада) массивам. В кулибинском комплексе потенциально рудоносными на Cu-Ni с Pt являются ультрамафиты.

Научная новизна работы. Впервые детально рассмотрены петрографические, петрохимические, геохимические и петроструктурные особенности мафит-ультрамафитовых массивов талажинского и кулибинского комплексов Канской глыбы Восточного Саяна. Изучены рудные минералы, эволюция их химических составов и пространственное распространение применительно к каждому из исследуемых комплексов. В ультрамафитах и мафитах талажинского комплекса и в ультрамафитах кулибинского комплекса выявлена сульфидная мине-

рализация, позволяющая предполагать обнаружение Cu-Ni минерализации с попутными ЭПГ.

Разработаны геолого-генетические модели образования и проведена оценка потенциальной рудоносности исследуемых мафит-ультрамафитовых массивов.

С использованием программы КОМАГМАТ-3.52 выполнено моделирование химического состава исходных расплавов. Полученные результаты подтверждают различную природу родоначальных магм исследованных комплексов. Расслоенные породы талажинского комплекса кристаллизовались из низкотитанистого высокоглиноземистого оливин-базальтового расплава повышенной магнезиальности при температурах 1240-1260 °С в островодужной обстановке. Контрастная ультрамафит-мафитовая серия пород кулибинского комплекса формировалась из исходного известково-щелочного расплава нормальной титанистости, глиноземистости и пониженной магнезиальности в условиях надсубдукционной обстановки при температурах 1130-1150 °С.

Практическое значение. Впервые проведена оценка перспективности талажинского и кулибинского комплексов Канской глыбы Восточного Саяна на обнаружение медно-никелевой и благороднометальной минерализации с рекомендациями по направлению дальнейших поисковых работ. Главными потребителями полученной научной информации являются ОАО «Красноярскгеология», ОАО «Норильский никель», ГПКК «КНИИГиМС», одним из приоритетных направлений деятельности которых является поиски и разведка месторождений благородных металлов, расположенных на территории Красноярского края.

Публикация и апробация работы. По теме диссертации опубликовано 17 научных работ, в том числе 3 из них в журналах, включенных в перечень ВАК. Результаты исследований были представлены в виде устных и стендовых докладов на российских и международных конференциях: IX-XIV Международных научных симпозиумах студентов, аспирантов и молодых ученых имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр» (г. Томск, 2005-2010 гг.), XLV-XLVII Международных научных студенческих конференциях «Студент и начно-технический прогресс» (г. Новосибирск, 2007-2009 гг.), VI-VII Всероссийских научных конференциях «Петрология магматических и метаморфических комплексов» (г. Томск, 2007, 2009 гг.), III Международной научной конференции «Ультрабазит-базитовые комплексы складчатых областей и связанные с ними месторождения» (г. Качканар, 2009 г.), Всероссийской молодежной научной конференции «Актуальные вопросы географии и геологии» (г. Томск, 2010 г.), Всероссийской научной конференции (с международным участием) «Новые горизонты в изучении процессов магмо- и рудообразования» (г. Москва, 2010 г.), Второй всероссийской научно-практической конференции «Минерагения северо-восточной Азии» (г. Улан-Удэ, 2011 г.).

По результатам исследований составлены научно-исследовательские отчеты по двум проектам автора (ГК П40 от 31.03.2010г., грант РФФИ № 10-05-90704-моб_ст).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 8 глав и заключения общим объемом 143 страницы, содержит 43 рисунка, 17 таблиц и 2 приложения. Список литературы включает 123 наименования.

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность и благодарность научному руководителю, д.г.-м.н., профессору А.Н. Чернышову за помощь в работе, критические замечания и ценные советы.

Также автор искренне признателен д.г.-м.н., ведущему научному сотруднику ИЭМ РАН (г. Черноголовка) Э.Г. Конникову и д.г.-м.н., ведущему научному сотруднику ГЕОХИ РАН (г. Москва) А.А. Арискину за консультации по вопросам петрологии и ЭВМ-моделированию родоначальных расплавов.

В обработке материалов, обсуждении полученных результатов неоценимую помощь и содействие оказали сотрудники Томского государственного университета: И.Ф. Гертнер, П.А. Тишин, Л.А. Зырянова, О.В. Бухарова, С.В. Кузьмин; сотрудник ИЭМ РАН (г. Черноголовка) А.Н. Некрасов; геологи Ивановской геологоразведочной экспедиции (г. Канск) А.Н. Смагин и А.В. Ренжин. Автор выражает им искреннюю признательность за поддержку и консультации в ходе написания диссертационной работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования выполнялись в три этапа: полевой, камеральный и аналитический. На *полевом* этапе применялись методы геологического картирования, включающие определение элементов залегания пород, макроскопическое изучение текстурно-структурных особенностей пород и характера внутренней расслоенной структуры интрузивов, отбор образцов по опорным разрезам, изучение контактов массивов с породами рамы.

На *камеральном* этапе изучались особенности внутреннего строения, минерально-петрографические взаимоотношения, текстурно-структурные свойства и вещественный состав пород мафит-ультрамафитовых массивов талажинского и кулибинского комплексов.

1) Для уточнения текстурно-структурных особенностей и проведения детальной петрографической характеристики пород были подготовлены и детально изучены 250 прозрачных шлифов; 2) Изучение образцов производилось визуально и под минералогическим бинокулярным микроскопом МС-2, прозрачных шлифов – на поляризационных микроскопах LEICA DM2500P и Axioskop 40 с видеокамерой AxioCam MRc5; 3) Для определения химического состава породообразующих минералов отбирались их монофракции с целью дальнейшей диагностики на электронном сканирующем микроскопе Tescan Vega II XMU, оборудованном энергодисперсионным спектрометром (с полупроводниковым Si(Li) детектором INCA x-sight) INCA Energy 450 и волнодисперсионным спектрометром INCA Wave 700 (более 150 определений) в ИЭМ РАН (г. Черноголовка); 4) С целью установления эволюции вещественных преобразований пород и минералов в процессе становления и изменения массивов, а также реконструкции термодинамических и тектонических условий их формирования проводились структурный и петроструктурный анализы; 5) Оценка петрохимических особенностей пород базировалось на результатах 39 оригинальных силикатных анализов, выполненных на приборе Perkin Elmer в Институте геохимии (г. Иркутск), и включающих петрогенные компоненты, а также Cr, Ni, Co, Zn, V, Cu. Содержание редких и редкоземельных элементов в главных породных группах (18 проб) изучено методом ICP-MS (Ga, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Cs, Ba, Hf, Ta, W, Th, U, REE) для талажинского комплекса (9 проб) на масс-спектрометре ELEMENT (Finnigan Mat) в ИГиМ СО РАН (г. Новосибирск), для кулибинского комплекса (9 проб) – в ИПТМ РАН (г. Черноголовка); 6) Исследование рудной минерализации массивов основано на изучении 57 аншлифов из образцов, отличающихся повышенными содержаниями Ni и Cr. Электронным сканирующим микроскопом Tescan Vega II XMU проанализированы сульфиды, хромшпинелиды, минералы железо-титанистой окисной группы, самородные металлы (более 500 замеров) в ИЭМ РАН (г. Черноголовка). Около 200 определений рудных минералов выполнены в Аналитическом центре “Геохимия природных систем” Томского государственного университета (г. Томск) с помощью электронного сканирующего микроскопа Tescan Vega II LMU; 7) Анализы пород на Au, Pt, Pd и Re выполнены методом инверсионной вольтамперометрии в лаборатории геолого-аналитического центра Томского политехнического университета (г. Томск); 8) Дальнейшая обработка осуществлялась с помощью программ STATISTIKA 6.0 и Microsoft Excel; 9) С применением программы Comagmat 3.52, 3.57 (Арискин, Бармина, 2000) был рассчитан состав родоначальных расплавов мафит-ультрамафитовых массивов талажинского и кулибинского комплексов и смоделированы условия их формирования.

Аналитический этап включал обобщение полученных результатов с использованием данных отечественных и зарубежных исследователей с последующим построением петрогенетических моделей формирования исследуемых мафит-ультрамафитовых комплексов Канской глыбы и выявлением благоприятных факторов, способствующих формированию медно-никелевой минерализации и оруденения.

Глава 2. ИЗУЧЕННОСТЬ МАФИТ-УЛЬТРАМАФИТОВОГО МАГМАТИЗМА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Первые сведения по геологии описываемого района связаны с находкой золотоносных россыпей по рр. Тукша, Караган и Малмын в середине XIX века, однако до конца

50-х гг. прошлого столетия они были крайне обрывочны. В 1957 г. впервые поиски никеля в черных с сульфидами серпентинитах р. Караган, Койского и Идарского хребтов рекомендует А.Ф. Струкуленко. В 1962-1963 гг. Н.Г. Дубининым в верховьях р. Кан были изучены более шестидесяти тел серпентинитов, из них лишь в пяти установлена вкрапленность сульфидов, которые были рекомендованы к тщательному изучению. В результате ГСР-50 (60-80 годы XX века) на Канском блоке и его выступах-сателлитах зафиксировано порядка 350 относительно мелких (от 200×50 м до 4 км^2) тел ультрамафитов и мафит-ультрамафитов с содержанием в некоторых (в %) Ni 0,1-0,4; Cr 0,3-0,6 и Co 0,02-0,1. Большая часть их сосредоточена в компактных по площади ореолах (Кингашский, Кунгусский, Пезинский, Тукшинский), тяготеющих к зонам глубинных разломов. Впервые была разработана схема расчленения метаморфических и магматических образований Канского блока, которая с некоторыми изменениями позднее вошла в легенду для Госгеолкарты-200/2 Восточно-Саянской серии листов. В 1986-1989 гг. партией прогноза КТЭ КПГО под руководством А.Г. Еханина выполнены работы по оценке перспектив расслоенных базитовых и ультрабазитовых комплексов юга Красноярского края на никелевое и платиновое оруденение. Объектом первой очереди для поискового изучения избран Кингашский массив, подтверждена перспективность поисков Cu-Ni с ЭПГ руд в перидотитах нижней его части. В 1990-2002 гг. ОАО «Красноярскгеология», Кингашской ГРП НКГРЭ ОАО «ГМК Норильский Никель» проведены поисково-оценочные работы Кингашского массива, по результатам которых оконтурен ряд массивов ультрамафитов, уточнены границы Кингашского массива, а известное в нем рудопроявление переведено в ранг крупного Pt-Cu-Ni месторождения. Обнадеживающие результаты поисков Pt-Cu-Ni и Au оруденения в ультрамафитах Канской глыбы вызвали ответный рост научно-исследовательских работ. С 90-х гг. проблемы потенциальной рудоносности Канской глыбы, а также ее геодинамики, петрогеохимии, геохронологии и др. решали специалисты Института геохимии СО РАН (г. Иркутск), КНИИГиМС (г.Красноярск), Института геологии и минералогии СО РАН (г. Новосибирск), Томского государственного университета (г.Томск). С 2004 г. в пределах Кингашского РУ ведут поисковые работы АО «Прикладная геология» от ОАО «ГМК Норильский никель». Изложенные в отчете Н.П. Набокова результаты свидетельствуют, что ближние к Кингашскому месторождению Верхнекингашское и Куевское рудопроявления состоялись крупными месторождениями. В 2004-2006 гг. ОАО «Красноярскгеология» в юго-восточной части Канской глыбы выполнены ППР результатом которых явились рекомендации первоочередного изучения на глубину скрытого крупного тела ультрамафитов на Кунгусском массиве и расслоенного Кулижинского массива. В 2007 г. АО «Прикладная геология» начато поисковое бурение на восточном фасе Кулижинского массива. В результате – в его придонной части выявлены никеленосные ультрамафиты.

Несмотря на большой объем поисковых и научно-исследовательских работ до настоящего времени многие геологические аспекты остаются дискуссионными и требуют дальнейшего изучения. Особенно противоречивы определения генетической сущности несущих оруденение ультрамафитов и ассоциирующих с ними габброидов, что затрудняет прогнозно-металлогенические исследования и локальный прогноз, а в итоге результативность и направленность поисковых работ. Наиболее изученными в пределах Канской глыбы являются кингашский комплекс и, в меньшей степени – идарский комплекс. Талажинский и кулибинский комплексы в настоящее временя остаются слабо изученными.

Глава 3. ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ КАНСКОЙ ГЛЫБЫ

Канская глыба, ограниченная зонами разломов, занимает пограничное положение между юго-западной окраиной Сибирского кратона и структурами складчатого обрамления. Такое положение в региональной структуре обусловливает сложное блоково-чешуйчато-надвиговое строение и интенсивную тектонизированность амфиболито-гнейсовых толщ, разбитых многочисленными нарушениями на блоки и пластины разного порядка. Для них характерны минеральные ассоциации эпидот-амфиболитовой и амфиболитовой фаций с

температурным диапозоном от 600 до 700 °С и максимальными значениями давления – 7,7-8,5 кбар (Ножкин и др., 2001). В структуре Канской глыбы выделено три различающихся террейна: Центральный (Канский), Идарский и Шумихинско-Кирельский (рис. 1).

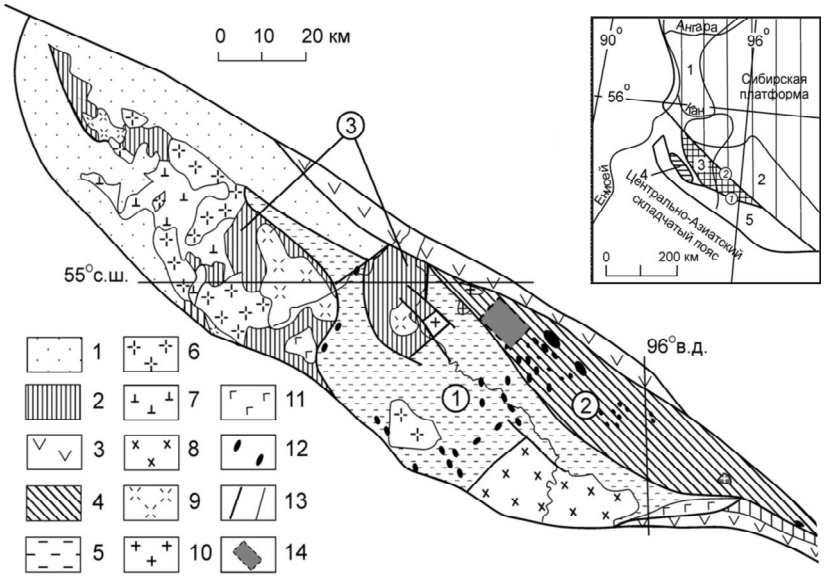


Рис. 1. Схема геологического строения Канского блока (Чернышов и др., 2010). 1 – палеозойские комплексы Центрально-Азиатского складчатого пояса; 2–5 – стратифицированные комплексы докембрия: 2-3 – неопротерозойские (2 – метавулканогенные, 3 – метвулканогенно-осадочные); 4 – палеомезопротерозойские метаосадочно-вулканогенные; 5 – палеопротерозойские метаосадочно-вулканогенные; 6-12 – интрузивные комплексы: 6-7 – раннепалеозойские (6 – гранитный, 7 – габбровый); 8 – вендский трондьемитовый; 9-11 – неопротерозойские (9 – тоналит-трондьемитовый, 10 – гранитный и 11 – метагаббровый); 12 – палеомезопротерозойский (?) ультрамафитовый; 13 – геологические границы (а – разломы, б – прочие границы); 14 – контур Кингашского РУ. Террейны Канского блока (цифры в кружках): 1 – Центральный, 2 – Идарский, 3 – Шумихинско-Кирельский. На врезке положение Канского блока в структурах юго-западного обрамления Сибирской платформы. Выступы кристаллического фундамента платформы: 1 – Ангаро-Канский; 2 – Присаянский. Докембрийские структуры складчатого обрамления: 3 – Канский; 4 – Арзыбейский; 5 – Дербинский блоки. Разломы (цифры в кружках): 1 – Главный Восточносаянский; 2 – Канско-Агульский.

Глава 4. ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ МАССИВОВ

Талажинский комплекс охарактеризован на примере одноименного Талажинского массива, кулибинский комплекс – на примере Кунгусского и Кулижинского массивов.

Талажинский массив локализован в пределах северо-западного окончания Канской глыбы на водоразделе верхнего течения рр. Дурья и Тазик. Его выход на дневную поверхность имеет округлую форму (6×7,5 км^2), а на глубине – напоминает чашу и прослеживается на 1200-1500 м от поверхности. Возраст интрузива условно считается R_2 (Смагин и др., 2008). В разрезе Талажинского плутона реконструируется 4 мегаритма переслаивания снизу вверх плагиодунитов, троктолитов и анортозитов (Смагин и др., 2008). Подошва массива на севере падает под массив под углом 30-40º и контактирует с толщей стратифицированных амфиболитов, кальцифиров и мраморов, а на юге срезается более поздней интрузией гранитов.

Породные ассоциации и строение массива позволяют оценить его как дифференцированную расслоенную интрузию плагиодунит-троктолит-габбро-анортозитовой формации. Подавляющая часть разреза массива кристаллизовалась из магматического расплава, соответствующего по составу Ol-Pl котектике. В этом отношении он сходен с расслоенной серией позднерифейского Йоко-Довыренского плутона Северного Прибайкалья и позднепротерозойским массивом Войсис Бей в провинции Лабрадор, Канада.

Кунгусский массив расположен в пределах юго-восточной части Канской глыбы на южном склоне хребта Идарское Белогорье в истоках рр. Демидовский и Кунгус, в крупном узле сложного пересечения зон разломов северо-западного, северо-восточного и широтного направлений. Массив имеет сложную конфигурацию, его площадь составляет 3,4 км^2. Он залегает в толще амфиболитов, которые обособляются среди гнейсов, а с юга прорываются гранитами канского комплекса, и имеет преимущественно габбровый состав при подчиненной

роли ультрамафитов, которые устанавливаются в его краевых частях. Выявляемая контрастная аэромагнитная аномалия (8,4×2,4 км) на этой площади (Смагин и др., 2008), очевидно, свидетельствует о наличии линейного тела ультрамафитов, вероятно, перекрытого габброидами. На площади массива установлены повышенные содержания Ni и Au до 0,5% и 0,4 г/т соответственно, что свидетельствует в пользу его потенциальной рудоносности.

Кулижинский массив расположен в центральной части Канской глыбы в междуречье рр. Кулижа и Пезо, вблизи их устьевых зон, и представлен двумя обособленными телами, площадь которых составляет 3 и 5,1 км^2. Интрузии залегают среди позднеархейских амфиболито-гнейсовых пород и выполнены ультрамафитами ультраосновного и основного состава и габброидами, при подчиненной роли первых. Аэромагнитной аномалией на этой площади подтверждается наличие довольно мощной дунит-перидотитовой пластины в основании плутона (Смагин и др., 2008). Массив содержит минерализацию (Ni, Cu, Co), формирующую вторичные ореолы и потоки рассеяния аналогично Кингашскому массиву, но меньшей контрастности. Это, вероятно, объясняется слабым эрозионным срезом, т. е. практически полным отсутствием коренных выходов на поверхности ультрамафитов, которые обычно являются наиболее перспективными на обнаружение медно-никелевой минерализации.

Кунгусский и Кулижинский массивы по своему строению и вещественному составу относятся к дифференцированным интрузиям перидотит-пироксенит-габбровой формации и обнаруживают сходство с мафит-ультрамафитовыми массивами нижнедербинского комплекса, расположенными в северо-западной части Восточного Саяна.

Глава 5. ПЕТРОГРАФИЯ

5.1 Петрографическая характеристика пород.

Талажинский комплекс сложен ультрамафитами и габброидами. *Ультрамафиты* представлены плагиодунитами (Ol~80-90%, Pl~5-15%). Структура пород кумулятивная. По химическому составу оливин соответствует хризолиту (Fa=18-20%), а плагиоклаз – битовниту (An=76-77%). Плагиодуниты нередко подвержены интенсивной серпентинизации вплоть до полного замещения с образованием серпентинитов. *Габброиды* представлены преимущественно троктолитами, при подчиненной роли оливиновых габбро и анортозитов. Структура основной массы троктолитов – кумулятивная, либо габбровая. Минералогический состав: Ol~20-70%, Pl~25-70%, Hyp до 5%, Hb до 10%. Изредка встречаются CPx и Bt. По химическому составу оливин соответствует хризолиту (Fa=16,5-17,5%), плагиоклаз – битовниту (An=77-81%). Структура оливиновых габбро – габбровая. Минералогический состав: Pl~40-50%, Ol~30-40%, CPx~20%, отмечается Hb. По химическому составу оливин соответствует хризолиту (Fa=18-18,5%), плагиоклаз – битовниту (An=78-85%). Структура анортозитов панидиоморфная Минералогический состав: Pl~90-100%, CPx до 10%. Плагиоклаз соответствует битовниту и анортиту (An=73-99%).

Кулибинский комплекс представлен двумя основными контрастными сериями пород – ультраосновными и основными ультрамафитами, а также габброидами, при подчиненной роли первых. Среди *ультрамафитов* установлены лерцолиты (CPx ~60%, OPx~15%, Ol~30%), верлиты (Ol~45%, CPx~40-45%, Hb~10%), роговообманковые перидотиты (Hb~45%, Ol~25%, OPx~20%, CPx ~10%), роговообманковые вебстериты (OPx~20%, CPx~40%, Hb~40%), роговообманковые клинопироксениты (CPx~60%, Hb~35%, Pl~5%), пироксеновые горнблендиты (Hb~65-90%; CPx~10-25%) и горнблендиты (Hb~70-85%, CPx~10-15%, Pl~5-10%). Структура пород панидиоморфная, гипидиоморфная и пойкилитовая. По химическому составу оливин соответствует хризолиту (Fa=16-19%), ортопироксен – бронзиту (En=80-83%, Fs=15-17%, Wo=1-2%), клинопироксен – диопсиду и железистому диопсиду (En=40-48%, Fs=5-10%, Wo=46-51%), а также субкальциевому авгиту (En=48-52%, Fs=14-17%, Wo=28-29%), плагиоклаз, по координатам двойниковой оси – лабрадору № 57-61. *Габброиды* представлены роговообманковыми норитами (Hb~35-50%, OPx~5-10%, Pl~40-60%), роговообманковыми габбро-норитами (Hb~35-40%, CPx+OPx~5-15%, Pl~45-50%) и роговообманковыми габбро (Hb~30-90%, CPx до 10%, Pl~10-60%). Структура пород

порфировидная, габбро-офитовая, гипидиоморфная и пойкилитовая. По химическому составу клинопироксен соответствует субкальциевому авгиту (En=48-49%, Fs=13-16,5%, Wo=28,5-29%), плагиоклаз, по углу симметричного погасания – лабрадору № 55-57.

5.2 Петроструктурный анализ оливина.

Полученные результаты петроструктурного анализа оливина свидетельствуют о том, что формирование магматических ультрамафитов в исследуемых массивах, очевидно, происходило в условиях понижающейся температуры, медленной скорости и низком стрессе под структурным контролем внешнего поля напряжений в обстановке ламинарного течения магматической жидкости в интрузивной камере. Последующие наложенные динамические нагрузки способствовали усложнению петроструктурных узоров и пластическому деформированию зерен оливина. Отличительной особенностью становления пород кулибинского комплекса от пород талажинского комплекса является их формирование в условиях слабой тектонической активности, что подтверждается сложными петроструктурными узорами оливина.

Глава 6. ПЕТРОГЕОХИМИЯ

6.1 Петрохимия.

Для ***талажинского комплекса*** фигуративные точки составов пород на вариационных диаграммах (рис. 2) обнаруживают отчетливое линейное распределение в виде эволюционного тренда, отражающего непрерывную дифференциацию основного магматического расплава с последовательным образованием пород: плагиодуниты→троктолиты, оливиновые габбро→анортозиты. Подобный тренд распределения фигуративных точек характерен для аналогичных пород довыренского комплекса и комплекса войсис-бей, что указывает на генетическое родство сравниваемых объектов и их принадлежность к одной

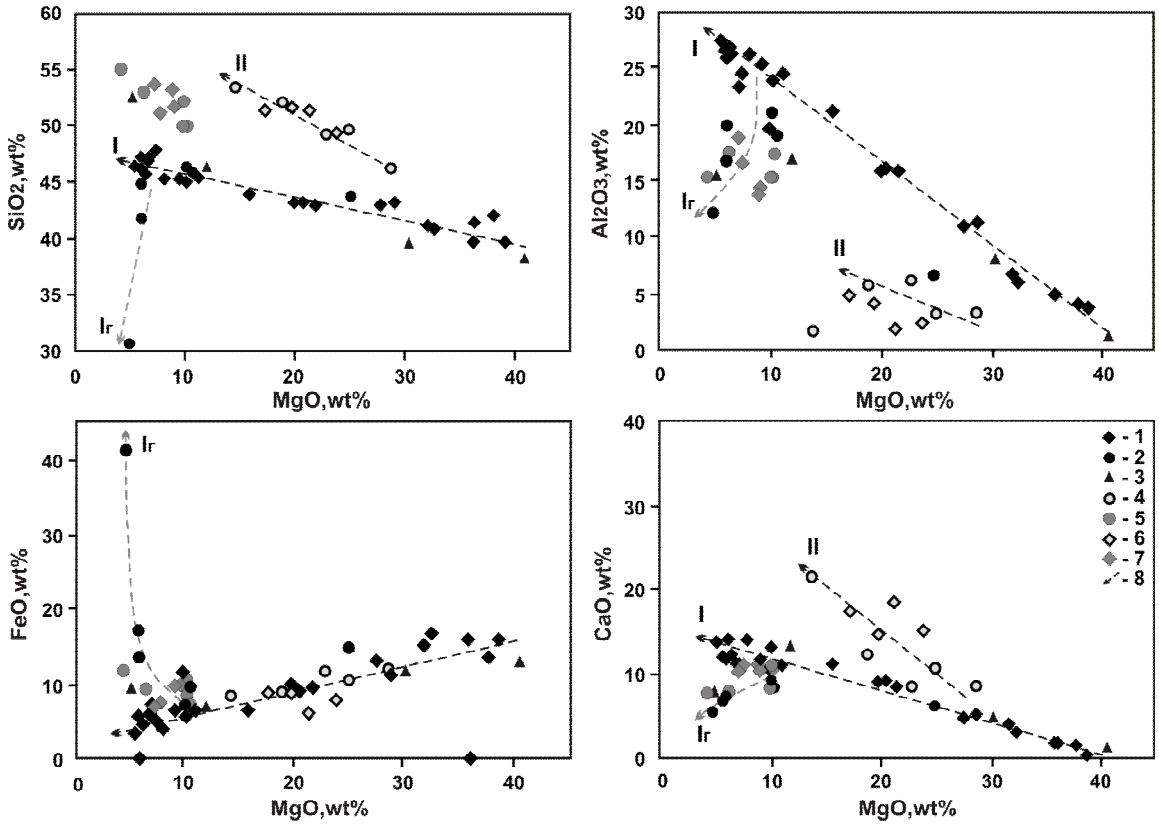


Рис. 2. Бинарные диаграммы для пород талажинского и кулибинского комплексов. 1 – талажинский комплекс; 2 – войсис-бей комплекс; 3 – довыренский комплекс; 4-5 – кулибинский комплекс: 4 – перидотиты, 5 – габброиды; 6-7 – нижнедербинский комплекс: 6 – перидотиты, 7 – габброиды; 8 – тренды изменения составов ультрамафитов и мафитов: I – плагиодунит-троктолит-габбро-анортозитовой формации, Iг – «гибридный тренд» плагиодунит-троктолит-габбро-анортозитовой формации, II – перидотит-пироксенит-габбровой формации.

магматической плагиодунит-троктолит-габбро-анортозитовой формации. К наиболее характерным петрохимическим особенностям всех этих комплексов относится недосыщенность SiO_2, высокие содержания MgO и Al_2O_3 при относительно низких TiO_2, P_2O_5 и K_2O, обратная корреляция между MgO и большинством породообразующих окислов, кроме FeO_{tot}. Из ряда отмеченных закономерностей «выпадают» только «леопардовые» троктолиты, оливиновые габбро и магматические брекчии, залегающие в проводнике, включающем сульфидные руды и соединяющем главный троктолитовый массив Войсис-Бей с глубинным очагом. Похожие отклонения наблюдается и у гранофировых габбро Довыренского плутона, которые имеют гибридную природу. Эти породы характеризуются повышенными содержаниями TiO_2, FeO, Na_2O, K_2O, P_2O_5 и пониженными SiO_2, Al_2O_3, CaO по сравнению с общей тенденцией, вытекающей из тренда фракционирования рассматриваемых интрузивных комплексов. По всей вероятности, этот тренд тоже связан с гибридной природой пород проводника интрузива Войсис-Бей. «Гибридный тренд» слабо выражен и в распределении фигуративных точек пород Талажинского массива.

Для ***кулибинского комплекса*** фигуративные точки ультрамафитов на вариационных диаграммах образуют линейное распределение в виде единого эволюционного тренда, направление которого существенно отличается от направления тренда пород талажинского комплекса (рис. 2). При снижении содержаний MgO в породах отмечается более значительное увеличение содержаний SiO_2 и CaO, при этом содержания Al_2O_3 не существенно возрастает. Аналогичный тренд распределения фигуративных точек обнаруживают ультрамафиты нижнедербинского комплекса с образованием последовательного ряда пород: дуниты→верлиты→вебстериты→клинопироксениты. При этом фигуративные точки составов габброидов кулибинского и нижнедербинского комплексов образуют совместный рой, чаще обособленный, несколько «оторванный» от ультрамафитового тренда, что вероятно связано с нарушением последовательной дифференциации магматических расплавов от ультраосновных к основным при формировании массивов этих комплексов.

6.2 Геохимия.

Нормированные содержания всех лантаноидов в ***Талажинском массиве*** близки к хондритовому уровню, закономерно возрастая от HREE к LREE (рис. 3а). Кривые распределения для этого массива характеризуются ярко выраженным Eu-максимумом, что является признаком относительного накопления Pl в восстановительных условиях и результатом фракционной кристаллизации котектических Ol-Pl магм при формировании интрузии. Морфология кривых распределения примесей лантаноидов в Довыренском массиве и интрузиве Войсис-Бей аналогична таковым в Талажинском массиве, но общий уровень нормированных концентраций этих элементов в них выше почти на порядок. Сопоставление

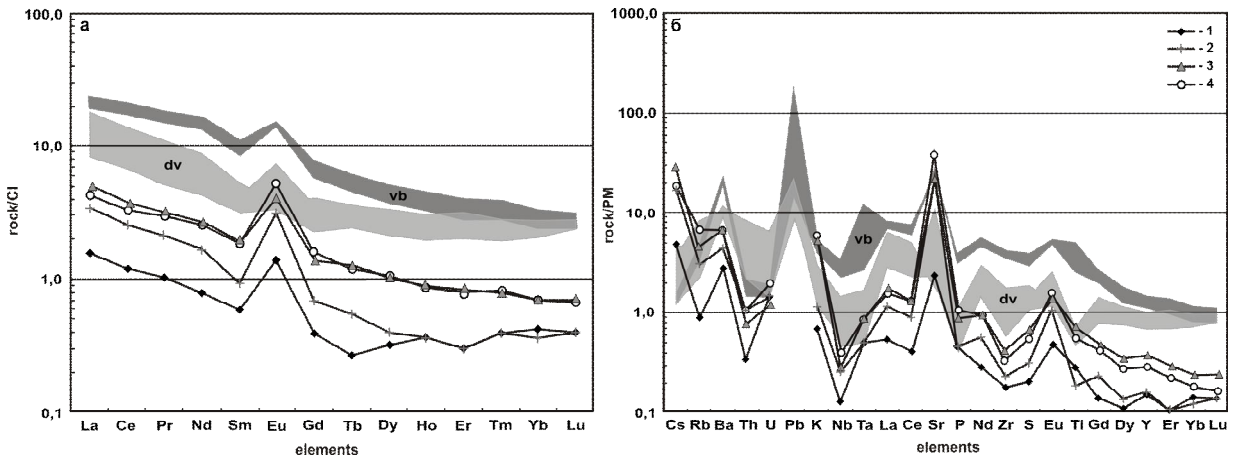


Рис. 3. Диаграммы распределения элементов лантаноидной группы (а), нормированных по углистому хондриту CI (Anders, Grevesse, 1989) и спайдер-диаграммы для наиболее распространенных примесных элементов (б), нормированных по примитивной мантии (Sun, McDonough, 1989) в породах Талажинского (tl), Йоко-Довыренского (dv) и Войсис-Бей (vb) массивов. 1 – плагиодунит; 2 – троктолит; 3 – оливиновый габбро; 4 – анортозит.

распределения примесных элементов в породах рассматриваемых интрузивных комплексах на многокомпонентной диаграмме (рис. 3б) также позволяет отметить их большое геохимическое сходство. Они обнаруживают значительную обогащенность Ba, Pb, Sr по отношению к примитивной мантии и несколько беднее её Th, U, Nb, Ta и Ti. Талажинский интрузив по сравнению с интрузивами Войсис-Бей и Довыренским также существенно обеднен тяжелыми редкими землями – Gd, Dy, Er, Yb, Lu, что, по-видимому, указывает на дефицит граната в породах мантийного субстрата, из которого выплавлялась родоначальная магма этой интрузии (устное сообщение Э.Г. Конникова). Высокие нормативные содержания типичных коровых элементов – Ba, Sr, Pb, в породах всех сравниваемых массивов можно связать с процессами контаминации их родоначальных расплавов материалом континентальной коры. Для Йоко-Довыренской и Войсис-Бей интрузий явления взаимодействия магмы с породами коры строго доказаны на основании изотопно-геохимических данных (Конников, 1986; Налдретт, 2003). Признаки проявления этих процессов в талажинском комплексе свидетельствуют в пользу его потенциальной рудоносности.

Кулибинский комплекс. Ультрамафиты и мафиты характеризуются практически однотипными графиками распределения REE, характеризующимися общим пологим отрицательным наклон спектров с выраженным Eu-минимумом (рис. 4а). Содержание REE изменяется от 10 до 25-ти кратных хондритовых норм, при этом прослеживается тенденция в сторону REE-обогащения пород в ряду лерцолит→верлит→роговообманковый перидотит→вебстерит→роговообманковый габбро-норит→роговообманковое габбро. По конфигурации спектры пород хорошо сопоставляются со спектрами пород сходного в формационном отношении Бурлакского массива нижнедербинского комплекса. Однако, последние более истощены легкими землями, в частности La и Ce. Сопоставление распределения примесных элементов в породах рассматриваемых комплексов на многокомпонентной диаграмме также обнаруживает их большое геохимическое сходство (рис. 4б). В обоих комплексах отмечаются U, La-Ce-Sr, Nd, Eu и Gd положительные пики, отражающие обогащенность пород этими элементами по отношению к примитивной мантии, и Nb-Ta (Nb), P, Zr и Ti отрицательные пики, значения которых близки или несколько выше значений примитивной мантии, за исключением Nb пика для нижнедербинского комплекса, значения которого ниже. Отличие заключается в отсутствии в породах Бурлакского массива Ba и K положительных пиков. Габброиды кулибинского комплекса в отличие ультрамафитам этого же комплекса характеризуются отсутствием Ba положительного пика при наличии такового для Rb.

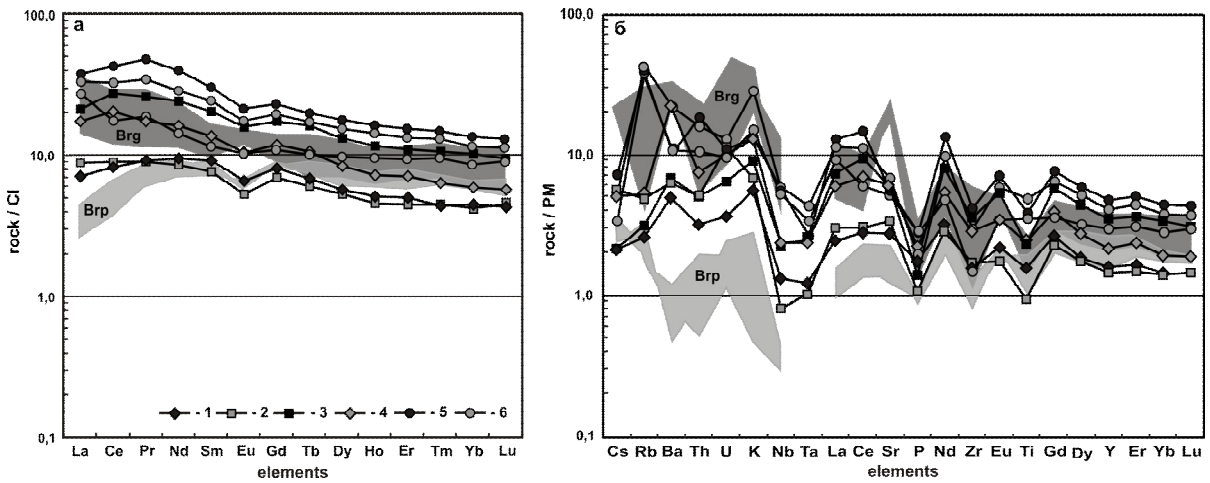


Рис. 4. Диаграммы распределения элементов лантаноидной группы (а), нормированных по углистому хондриту CI (Anders, Grevesse, 1989) и спайдер-диаграммы для наиболее распространенных примесных элементов (б), нормированных по примитивной мантии (Sun, McDonough, 1989) в породах кулибинского (1 – верлит, 2 – лерцолит, 3 – вебстерит, 4 – роговообманковый перидотит, 5 – роговообманковый габбро-норит, 6 – роговообманковое габбро) и нижнедербинского (Brp – перидотиты, Brg – габброиды) комплексов.

Глава 7. РУДНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ УЛЬТРАМАФИТОВ И МАФИТОВ ИССЛЕДУЕМЫХ КОМПЛЕКСОВ

7.1 Талажинский комплекс.

В породах комплекса выявлены два основных типа минерализации: магнетит-хромшпинель-ильменитовая и сульфидная. В троктолитах не редко в матрице сульфидов и породообразующих минералов наблюдается сыпь мелких зерен самородного серебра.

Магнетит-хромшпинель-ильменитовая минерализация (рис. 5) в плагиодунитах отмечается в виде часто встречаемой вкрапленности мелких зерен размером 0,05-0,4 мм (отдельные до 2 мм) внутри хадакристаллов оливина, реже – приурочена к интерстициям силикатных минералов. Она представлена шпинелидами (пикотитом, субферрихромпикотитом и субалюмохроммагнетитом), пикроильменитом (присутствие Mg до 2,38%) и магнетитом. В троктолитах минерализация отмечается в виде рассеянной вкрапленности мелких (от 0,05 до 0,2 мм) зерен шпинели (пикотитов и «ранних» хромистых магнетитов), ильменита и магнетита и их агрегативных скоплений в основном в ассоциации с сульфидами.

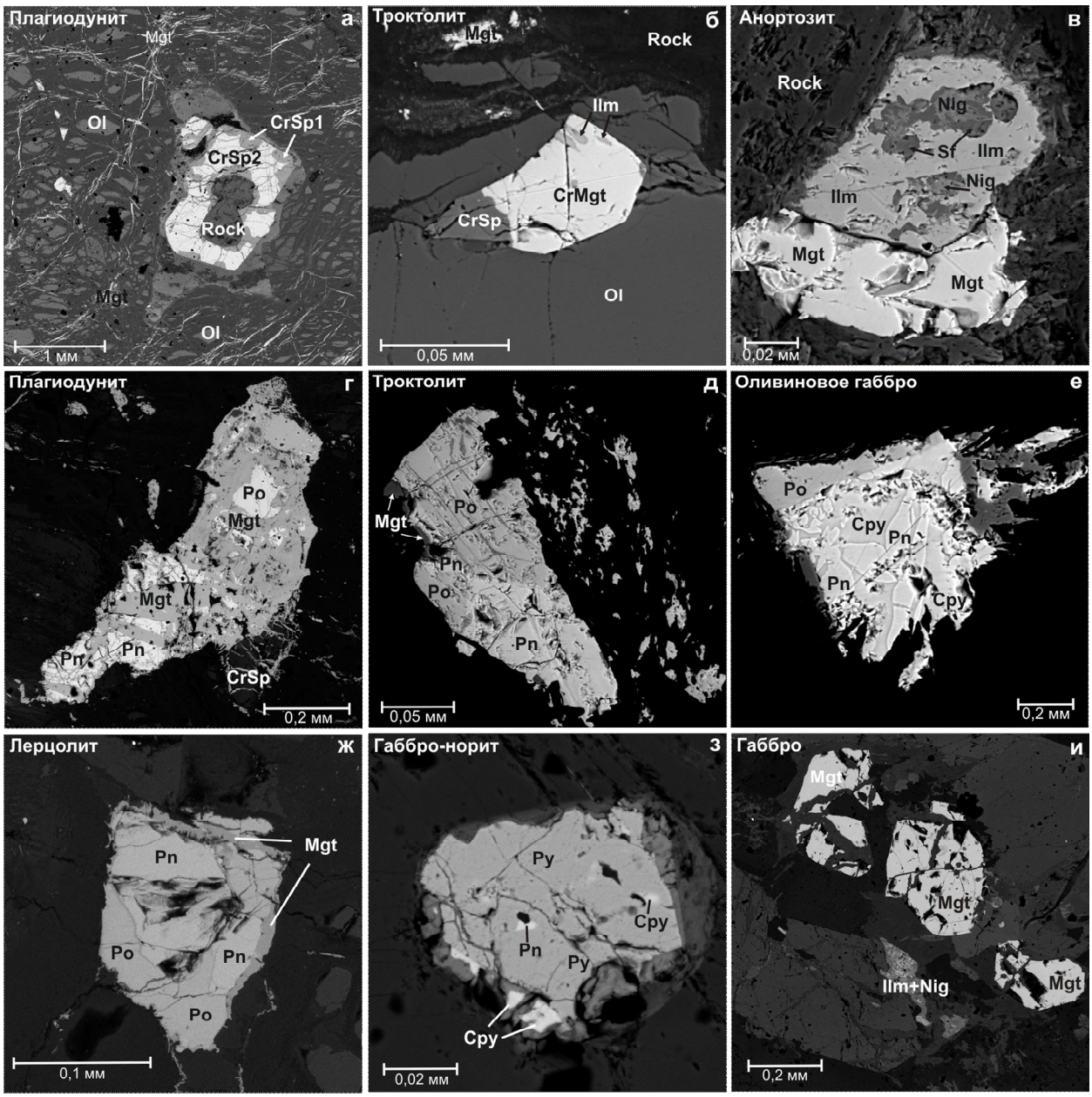


Рис. 5. Рудная минерализация пород талажинского (а-е) и кулибинского (ж-и) комплексов. Mgt (CrMgt) – магнетит (хромистый магнетит); CrSp – хромшпинель; Ilm – ильменит; Nig – нигрин; TR – редкие земли; Po – пирротин; Pn – пентландит; Py – пирит; Cpy – халькопирит; Ol – оливин; Rock – породообразующие силикатные минералы.

В оливиновых габбро минерализация представлена двумя генерациями магнетита. Первую генерацию образуют одиночные треугольные и округлые зерна размером до 0,06 мм, которые, очевидно, образовались путем замещения хромшпинелей. Вторая генерация отмечается в виде келифитовых, венцовых кайм замещения вокруг зерен сульфидов и по химизму отличается от первой отсутствием в составе Mn, Al, Ti, Cr, V и Ni при более высоких содержаниях Fe. В анортозитах минерализация наблюдается в виде частой вкрапленности мелких, нередко сросшихся магнетит-мангонильменитовых зерен размером до 0,25 мм в основной матрице породы. В зернах мангонильменита (содержание Mn до 5,29%) отмечаются включения нигрина.

Сульфидная минерализация (рис. 5) в плагиодунитах отмечается в виде ассоциации преимущественно железистого пентландита (Fe до 47%, Ni=17,15-31,22%, Ni/Fe=0,52-0,88) и троилита. В измененных разновидностях выделяется такая же ассоциация сульфидных минералов. Однако, пентландит отличается значительно меньшими содержаниями Fe (30,43-31,49%) при более значимых содержаниях S, Ni (30,67-32,71%, Ni/Fe=0,97-1,06) и Co (до 3,7%), а пирротин по химическому составу соответствует гексагональному пирротину.

В троктолитах сульфидные минералы отмечаются довольно часто, в виде мелкой вкрапленности пирротина, пентландита, медистого пентландита, халькопирита, никелистого халькопирита и сфалерита. Пирротин представлен двумя генерациями. Ранняя генерация встречается в ассоциации с пентландитом в виде структур распада твердых растворов, а более поздняя – в виде изометричных зерен и агрегатов в срастании с пентландитом и халькопиритом. Минерал по химическому составу соответствует гексагональной разновидности. Пентландит (Fe=30,6-34,6%, Ni=30-31,2%, Ni/Fe~1, Co до 3,65%) наблюдается в виде пламевидных, веретенообразных включений распада внутри пирротина; реже образует обособленные мелкие зерна (до 0,2 мм) треугольной, округлой формы. Отмечается медистый пентландит, обусловленный присутствием в химическом составе минерала Cu (до 11%) при более низких содержаниях Ni (18,8-25%). Халькопирит распространен незначительно (3-5% от общего объема сульфидов), обычно образует мелкие включения в зернах пентландита (вероятно, продукт распада твердого раствора) либо аллотриоморфные агрегаты (до 0,05 мм), выполняющие зоны трещиноватости в зернах пирротина и пентландита и промежутки между ними. В виде округлых, игольчатых включений распада внутри зерен пентландита отмечается никелистый халькопирит (Ni до 3,61%). Сфалерит формирует мелкие агрегативные скопления (до 0,04 мм) светло-серого цвета в основном вблизи зерен медистого пентландита. В его химическом составе часть Zn постоянно изоморфно замещается Fe (до 6,5%), в качестве примеси присутствуют Co (до 0,07%), Ni (до 1,32%) и Cu (до 1,65%). Содержание Cu обусловлено включением мельчайших (до разрешающей способности микроскопа) овальных телец халькопирита, которые, очевидно, являются продуктами распада твердого раствора (Рамдор, 1962).

В оливиновых габбро сульфидные минералы представлены пирротином, кобальтистым пентландитом и халькопиритом. Отмечаются единичные зерна купропентландита и халькозина. Пирротин, как и в троктолитах, представлен двумя генерациями. Размер самостоятельных зерен достигает до 0,25 мм. В отдельных из них наблюдаются структуры распада твердого раствора, обусловленные наличием пламевидных, веретенообразных включений гексагонального пирротина в зернах троилитового состава. Кобальтистый пентландит (Ni=29,7-32,95%, Ni/Fe=0,94-1,1, Co до 8,12%) отмечен в виде структур распада внутри зерен пирротина и халькопирита и в виде самостоятельных треугольных, округлых зерен, нередко находящихся в ассоциации с пирротином и магнетитом. Купропентландит наблюдается в виде мелких самостоятельных зерен размером 0,005 мм в ассоциации с халькопиритом и кобальтистым пентландитом, где отличается от них более высокой отражательной способностью. Халькопирит встречается в виде самостоятельных прямоугольных, округлых зерен размером до 0,08 мм. Халькозин встречается редко в виде мелких зерен (0,006 мм) белого цвета с умеренной отражательной способностью.

7.2 Кулибинский комплекс.

В связи с нарушением непрерывной последовательной дифференциации родона-

чального магматического расплава от ультраосновных пород к основным при формировании массивов комплекса и тем, что габброиды, перекрывающие ультрамафиты, очевидно, представляют собой последующую, оторванную по времени фазу внедрения, рудная минерализация данных породных групп рассматривалась отдельно.

В ***перидотитах*** выявлено два основных типа минерализации: магнетит-хромшпинелиевая и сульфидная. *Магнетит-хромшпинелиевая минерализация* (рис. 5) отмечается в виде рассеянной вкрапленности мелких (от 0,05 до 0,15 мм) одиночных зерен шпинели (хроммагнетитов, ферриалюмохромитов, субалюмохроммагнетитов и хромистых магнетитов) и магнетита. *Сульфидная минерализация* наблюдается в виде каплевидных пирротин-пентландитовых выделений (структуры распада твердого расплава) размером до 0,2 мм, в основном приуроченных к интерстициям силикатных минералов (рис. 5). По химизму пирротин в лерцолитах соответствует троилиту, а в верлитах – гексагональному пирротину, и характеризуется повышенными содержаниями Fe и нередким присутствием в составе Co (до 0,79%). Пентландит широко распространен в виде округлых, пламевидных, веретенообразных включений распада внутри пирротина; реже – образует обособленные мелкие (до 0,1 мм) зерна округлой формы. Отмечается, что наибольшей никелистостью обладают пентландиты из лерцолитов (Ni=28,55-29,74%, Ni/Fe=0,79-0,83), а пентландиты из верлитов характеризуются более высокими содержаниями Co (3,4-3,7%).

В ***габброидах*** рудные минералы по химическому составу объединяются в три группы: железо-титанистую окисную, сульфидную и сульфатную (рис. 5). *Железо-титанистая окисная минерализация* представлена магнетитом, титаномагнетитом, ильменитом, рутилом и нигрином. Магнетит и титаномагнетит (Ti до 5,91%) чаще выполнены крупными (до 0,5 мм) хорошо образованными зернами с высокой степенью идиоморфизма. Ильменит встречается в зернах магнетита как продукт распада твердого раствора в виде линзочек, табличек размером 0,01-0,015 мм, реже – образует дискретные, удлиненно-таблитчатые зерна размером до 0,08 мм, рассеянные в основной матрице породы в непосредственной близости с минералами выделенной группы. Рутил отмечается в виде акцессорных шестоватых зерен с размерами до 0,03-0,04 мм, часто имеющих идиоморфную форму. Разновидность рутила, богатая $FeTiO_3$ (в виде твердого раствора) отнесена автором к нигрину. *Сульфидная минерализация* (рис. 5) представлена пиритом, халькопиритом и в незначительной степени пентландитом. Пирит наряду с халькопиритом образует сливные агрегаты размером до 2 мм. Рельеф неровный, бугристый, пузырчатый. Зерна часто корродированы, что позволяет судить об агрессивности метасоматической среды, в которой минералы перекристаллизовывались. Встречаются обособленные зерна пирита, очевидно, первичного магматического, с размером до 0,06 мм, которые характеризуются идиоморфным обликом и нередко обнаруживают мелкие включения халькопирита и пентландита. Пентландит характеризуется пониженными содержаниями Fe (27,6-30%) и Co (~0,35%) при высоких значениях S и Ni (33,1-37,3%, Ni/Fe=1,1-1,35). *Сульфатная минерализация* представлена баритом (Ba≈56-57%) и целестиновым баритом (Ba≈53%, содержание Sr в виде изоморфной примеси возрастает до 3%). Минералы образуют тонкозернистые скопления неправильной формы размером до 0,05 мм и имеют постмагматическую гидротермальную природу (Бетехтин, 1951).

7.3 Благороднометальная минерализация исследуемых комплексов.

Талажинский комплекс. *Серебро* встречается в троктолитах в виде неравномерной сыпи очень мелких (до 1 мкм) самородных зерен среди сульфидов и породообразующих минералов. Его содержание достигает до 3,5 г/т. Очевидно, сегрегации серебра являются гипогенными образованиями, связанными с постмагматическими гидротермальными процессами. *Золото* устанавливается в повышенных количествах в рассеянном тонкодисперсном состоянии (до 35 мг/т) среди сульфидов в троктолитах. Наименьшие – отмечаются в анортозитах (до 0,7 мг/т). Сегрегация Au, очевидно, объясняется накоплением сульфидов и зависит от содержаний последних в горных породах. В породном ряду от плагиодунитов к троктолитам наблюдается тенденция к уменьшению суммарных содержаний *платины и палладия* от 15-22 до 5-11 мг/т. Поздние дифференциаты – анортозиты обнаруживают в своем составе наиболее

высокие значения Pt по отношению к плагиодунитам и троктолитам (до 7,3 мг/т).

Кулибинский комплекс. *Серебро* отмечается редко в перидотитах в виде сыпи очень мелких (до 0,5 мкм) самородных зерен, которые неравномерно распределены в основной матрице породы. Его содержание составляет от 0,07 до 0,11 г/т, при этом повышенные значения характерны для лерцолитов. *Золото* выявлено как в перидотитах (до 80 мг/т), так и габброидах (≈30-50 мг/т). В отдельных образцах габбро наблюдаются контрастно повышенные содержания Au (до 0,2-0,4 г/т), на что обращали внимание другие исследователи (Смагин, Ренжин, 2006). Вероятно существенную роль в перераспределении и концентрации элемента оказывали поздние наложенные процессы кислого метасоматоза. Содержания *платины* от верлитов к вебстеритам уменьшаются (5,7→2 мг/т), а *палладия* увеличиваются (0,1→7,2 мг/т). Породы габброидной серии в целом характеризуются близкими содержаниями, как Pt (до 7 мг/т), так и Pd (до 9,5 мг/т), при этом суммарные значения этих элементов выше, чем в перидотитах.

Глава 8. ПЕТРОГЕНЕТИЧЕСКИЕ ВЫВОДЫ И ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ РУДОНОСНОСТИ ИССЛЕДУЕМЫХ КОМПЛЕКСОВ

Моделирование родоначальных расплавов. При помощи ЭВМ-модели КОМАГМАТ-3.52 (Арискин, Бармина, 2000) методом геохимической термометрии для интрузий талажинского и кулибинского комплексов выполнен расчет вещественных составов родоначальных расплавов.

*Талажинский комплекс***.** Согласно результатам расчетов, равновесная кристаллизация расплава происходила в последовательности: Ol→Ol+Pl→Ol+Pl+CPx. Химический состав родоначального расплава соответствует (в масс.%): SiO_2–46%, TiO_2–0,35%, Al_2O_3–21,5%, FeO_{tot}–10%, MgO–10%, CaO–8%, Na_2O–2,5%, K_2O–0,5%, P_2O_5–0,07%. Таким образом, расслоенные породы талажинского комплекса кристаллизовались из низкотитанистого высокоглиноземистого оливин-базальтового расплава повышенной магнезиальности при температурах 1240-1260 °C. В пользу данного утверждения также свидетельствуют петрохимические черты пород (низкие содержания Ti, низкие отношения Fe/(Fe+Mg), обеднение щелочами, особенно калием и обогащение Mg, Ni и Cr), характерные для пород толеитовой петрохимической серии (Магматизм…, 2010).

Кулибинский комплекс. Результаты расчетов показывают, что равновесная кристаллизация расплава происходила в последовательности: Ol→Ol+OPx→Ol+OPx+CPx→OPx+CPx+Pl→Pl+CPx. По химическому составу исходный расплав соответствует (в масс.%): SiO_2–56,5%, TiO_2–1,5%, Al_2O_3–14,5%, FeO_{tot}–9%, MgO–6%, CaO–9%, Na_2O–2%, K_2O–0,8%, P_2O_5–0,18%. Оцененный, таким образом, состав родоначальной магмы рассматриваемых интрузий кулибинского комплекса соответствует известково-щелочному базальту пониженной железистости. В пользу данного утверждения также свидетельствуют перенасыщенность «свежих» пород комплекса SiO_2, частое присутсвие в составе пород ортопироксена и роговой обманки, отсутствие тренда обогащения железом, заметное по сравнению с толеитовой серией содержание в составе REE легких элементов Ce-группы и более высокая сумма REE, а также высокое содержание H_2O – до 3 масс.% (Магматизм…, 2010).

Оценка геодинамической обстановки формирования интрузий исследуемых комплексов. *Талажинский комплекс.* Породы талажинского расслоенного плагиодунит-троктолит-габбро-анортозитового массива, очевидно, являются комагматичными образованиями с островодужными высокоглиноземистыми базальтами, что подтверждается сравнением поля мультиэлементных спектров пород талажинского массива с усредненным спектром толеитовых базальтов островных дуг (IAB) (рис. 6). Ранее синхронность расслоенных низкотитанистых высокоглиноземистых перидотит-троктолит-габбровых массивов и островодужных вулканитов на примере некоторых районов ЦАСП доказана А.Э. Изохом и др. (Высокоглиноземистые…, 1998). Они выявили приуроченность интрузивов данного формационного типа к осевым частям островодужных систем. Преобладание в составе расслоенной серии пород талажинского комплекса троктолитов, присутствие

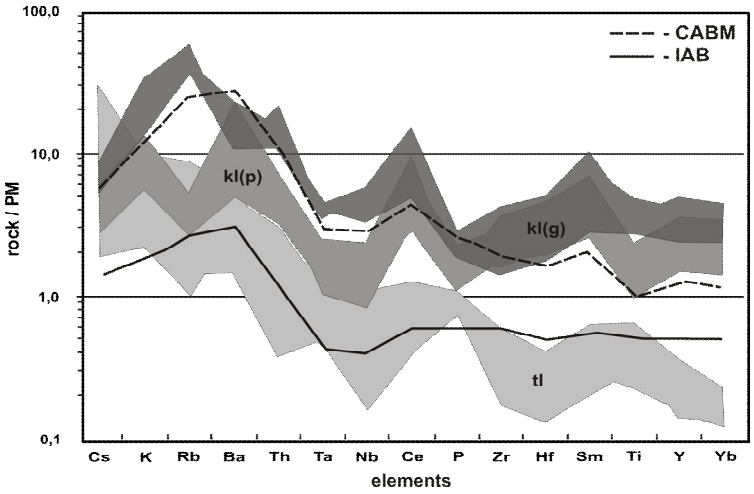


Рис. 6. Поля мультиэлементных спектров ультрамафитов и мафитов талажинского комплекса (tl) и ультрамафитов (klp) и мафитов (klg) кулибинского комплекса, нормированные по примитивной мантии (PM) (Sun, McDonough, 1989). Для сравнения показаны усредненные спектры толеитовых базальтов островных дуг (IAB) и известково-щелочных базальтов активных континентальных окраин (CABM) (Condie, 1989).

прослоев анортозитов с высокой основностью плагиоклаза (An=74-99%), постоянное присутствие в ультрамафитах плагиоклаза (до 15%) также свидетельствуют о формировании массива в обстановке островной дуги. Габброиды талажинского комплекса также характеризуются повышенной основностью плагиоклаза (An=77-85%) и железистостью оливина (Fa до 20%), что сближает их с алливалитовыми и эвкритовыми включениями в современных островодужных вулканитах (Современные…, 2006). Геохимические черты пород талажинского комплекса хорошо согласуются с результатами моделирования родоначального расплава и отражают их образование в результате кристаллизационной дифференциации высокоглиноземистых оливин-базальтовых расплавов, с повышенной магнезиальностью при низких концентрациях некогерентных элементов Ti, Zr и REE (рис. 3). В распределении REE наблюдается слабая обогащенность легкими REE, положительная европиевая аномалия, проявленная даже в ультраосновных дифференциатах. Устанавливаемые на спайдер-диаграммах для наиболее распространенных примесных элементов, нормированных по примитивной мантии (рис. 3б), резкие минимумы по Ta и Nb и обогащение пород Ba и Sr позволяют предполагать, что интрузии талажинского комплекса образованы из оливин-базальтовых магм, генерирующихся в надсубдукционной обстановке (Современные…, 2006).

Кулибинский комплекс. Родоначальные расплавы для интрузий кулибинского комплекса, по результатам моделирования их химических составов и по петрогеохимическим особенностям пород, соответствуют известково-щелочной петрохимической серии. Образования этой серии характерны для конвергентных границ плит, где развиты зоны субдукции (Магматизм…, 2010). Данный факт подтверждается хорошей сопоставимостью полей мультиэлементных спектров перидотитов (klp) и габброидов (klg) кулибинского комплекса с усредненным спектром известково-щелочных базальтов активных континентальных окраин (CABM) (рис. 6). В данной геодинамической обстановке происходило обогащение родоначальных расплавов литофильными элементами КИР (Rb, Ba, K, Th, Sr, La, Ce) и H_2O в процессе их контаминации флюидами (обогащенными данными литофильными элементами), поступающими за счет дегидратации субдуцируемой пластины океанической коры, а, частично, и из втянутых в зону субдукции осадков (Магматизм…, 2010).

Анализ процессов магмогенерации на конвергентных границах плит чрезвычайно затруднен отсутствием надежных данных о причинах и условиях плавления в зоне субдукции, и поэтому в настоящее время отсутствует общепринятая модель магмообразования в этих условиях. Наиболее распространенная точка зрения, что родоначальным расплавом для образования известково-щелочной серии являются толеитовые базальты, обычно ассоциирующие с известково-щелочными базальтами и связанные с ними постепенными переходами в структурах островных дуг, активных континентальных окраин и зон коллизии (Kay, 1990). Принимая данную точку зрения, можно предполагать, что родоначальные известково-щелочные базальтовые расплавы кулибинского комплекса формировались вблизи сейсмофокальной зоны в результате плавления перидотитов мантий-

ного клина и пелагических осадков при участии водных флюидов, образующихся при дегидратации субдуцируемой плиты.

Эволюция составов шпинелиевой минерализации. Химические составы шпинелидов *талажинского комплекса* обнаруживают два тренда эволюции, отражающие преобразование, как в мантийных условиях, так и под воздействием корового метаморфизма. Первоначальный тренд составов шпинелидов имеет вид Al, Mg→Cr и определяет преобразование шпинелиевого расплава в мантийных условиях. Более поздний тренд Al, Mg, Cr $\rightarrow Fe^{+3}$ обусловлен процессами корового метаморфизма, проявившегося в интенсивном равномерном уменьшении хрома и полном выносе подвижных компонентов (Al и Mg) из шпинелей в силикатные минералы (хлорит, серпентин), что подтверждается наличием «свежей» хлоритовой рубашки вокруг зерен шпинелей. Данный процесс сопровождается привносом железа и его окислением.

В породах *кулибинского комплекса* выявлены только метаморфогенные преобразования шпинелидов. При высоких степенях метаморфического преобразования из шпинелидов практически полностью выносится хром. Полученные тренды эволюции составов шпинелидов в исследуемых комплексах очень хорошо сопоставляются с таковыми для Кингашского массива, включающего одноименное Pt-Cu-Ni месторождение. Это, очевидно, позволяет предполагать близость, а может быть и единость шпинелиевой рудогенерирующей системы и ее эволюции в мантийных условиях и под воздействием корового метаморфизма.

Эволюция сульфидной минерализации. В *талажинском комплексе* формирование сульфидной минерализации происходило из высокожелезистого сульфидного расплава, который в процессе ликвации выделился из исходной оливин-базальтовой магмы и претерпел последующую дифференциацию в процессе становления массива. При понижении температуры из него осуществлялась близкая по времени кристаллизация зерен троилита и пентландита, в том числе с образованием ряда твердых растворов между этими двумя минералами. На момент кристаллизации троктолитов сульфидный расплав продолжал охлаждаться с кристаллизацией гексагонального пирротина и пентландита с более высокими значениями никеля. При этом химический состав пентландитов становится весьма близким таковому из вкрапленных руд Кингашского Pt-Cu-Ni месторождения, расположенного в пределах Канской глыбы юго-восточнее Талажинского массива. Поскольку в исходном сульфидном расплаве присутствовало небольшое количество меди, то при некоторой температуре в структуре распада с пентландитом появлялся халькопирит и переходные минералы изоморфного ряда между ними. При дальнейшем охлаждении сульфидного расплава становится устойчивой ассоциация пирротин–пентландит–халькопирит. Халькопирит образует самостоятельные зерна и мелкие аллотриоморфные агрегаты. Общий тренд эволюции составов пентландитов от плагиодунитов к оливиновым габбро очень хорошо сопоставляется с таковым для Йоко-Довыренского массива (рис. 7) и характеризуется резким уменьшением железистости при постоянных значениях никеля в области кристаллизации троктолитов и последующим увеличением никеля при плавном уменьшении железа от троктолитов к оливиновым габбро. Халькозин и сфалерит являются эпигенетическими минералами, сформировавшимися в результате низкотемпературного гидротермального процесса.

Кулибинский комплекс. Сульфидная минерализация перидотитов представлена каплевидными пирротин-пентландитовыми включениями. Их образование, очевидно, происходило из сульфидного расплава, обогащенного железом, который в процессе ликвации, выделился из исходной известково-щелочной базальтовой магмы. Такой сульфидный расплав в условиях высоких температур растворял весь содержащийся в системе никель и являлся гомогенным. При понижении температуры из него происходила близкая по времени кристаллизация троилита и пентландита, с образованием структур распада твердых растворов. Химический состав троилита указывает на его несколько более раннее начало кристаллизации по сравнению с пентландитом в условиях пониженной фугитивности серы и никеля в системе. При этом основная часть никеля постепенно концентрировалась и обособлялась в расплаве с последующей кристаллизацией высокожелезистого пентландита. От лерцолитов к верлитам происходит смена троилита на гексагональный пирротин, в пентландитах

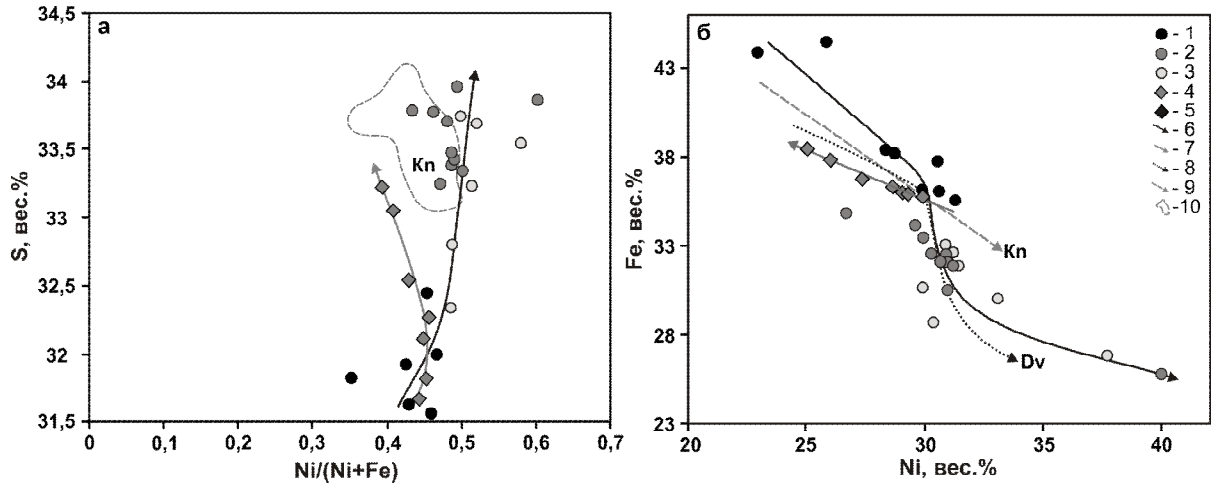


Рис. 7. Эволюция химических составов пентландитов в породах талажинского (1-3) и кулибинского (4-5) комплексов. 1 – плагиодуниты; 2 – троктолиты; 3 – оливиновые габбро; 4 – лерцолиты; 5 – верлиты; 6-9 – тренды эволюции химических составов пентландитов: 6 – талажинский комплекс, 7 – кулибинский комплекс, 8 – Йоко-Довыренский массив (Dv), 9 – Кингашский массив (Kn), 10 – область развития пентландитов из вкрапленных руд Кингашского Pt-Cu-Ni месторождения.

возрастает роль серы и железа и уменьшаются содержания никеля. Общий тренд эволюции составов пентландитов для перидотитов обладает обратной направленностью по отношению к тренду для ультрамафитов Кингашского месторождения (рис. 7) и отклоняется от поля его пентландитов из вкрапленных руд, отражая уменьшение роли никеля в кристаллизующемся сульфидном расплаве. С дальнейшим понижением температуры, оставшийся сульфидный расплав обогащался серой и приближался к системе Fe–S, пентландит продолжал выделяться из расплава, тем самым обедняя его никелем. При низких температурах становится устойчивой ассоциация пентландит–халькопирит–пирит, которая редко отмечается только в габбровой серии в виде одиночных мелких зерен пирита с включениями пентландита и халькопирита. Данный пентландит обнаруживает в своем химическом составе высокие содержания никеля (Ni/Fe=1,1-1,35), которые не согласуются с общей тенденцией эволюции рудно-магматической системы кулибинского комплекса. Однако, обогащение остаточного сульфидного расплава последним, очевидно, могло произойти в результате процессов контаминации промежуточного магматического основного расплава с более ранними перидотитами. Крупные (до 2 мм) пирит-халькопиритовые скопления, наблюдаемые в габброидах, в основном связаны с эпигенетическим (метасоматическим) типом оруденения, что подтверждается типоморфными особенностями этих выделений.

Оценка потенциальной рудоносности. *Талажинский комплекс.* Очевидно, относится к рифейской дунит-троктолит-габбровой формации, которая сейчас рассматривается в качестве перспективного источника рифейской эпохи платинометально-медно-никелевого рудообразования. Проведенные автором исследования показывают, что по петрографическому составу, петрохимическим и геохимическим особенностям Талажинский массив обнаруживает большое сходство с неопротерозойскими комплексами Северного Прибайкалья и Канады – Йоко-Довыренским расслоенным дунит-троктолит-габбровым плутоном и троктолит-габбровым интрузивом Войсис-Бей. Оба этих интрузива вмещают сульфидные Cu-Ni-платинометальные руды промышленного масштаба, что позволяет предполагать аналогичную степень рудоносности Талажинского массива, который локализован в пределах Саянской никель-платиноносной провинции. Дополнительным аргументом в пользу его потенциальной рудоносности свидетельствуют обнаруженные в ультрамафитах массива повышенне содержания Ni (0,2%), Cu (0,3%), Cr (0,2%) и Zn (Смагин, Ренжин, 2008), а также установленные А.Г. Еханиным повышенные содержания платины в аподунитовых серпентинитах с сульфидами (до 380 мг/т) и плагиодунитах (до 108 мг/т).

Кулибинский комплекс. По внутреннему строению, петрографическому составу, петрохимическим и геохимическим особенностям достаточно хорошо сопоставляются с мас-

сивами нижнедербинского комплекса, в которых отмечается сульфидная Cu-Ni минерализация с платиноидами (Волохов и др., 1964; Еханин и др., 1991). Отмечаемая сульфидная пирротин-пентландитовая минерализация преимущественно в верлитах и лерцолитах свидетельствует об их потенциальной рудоносности. Установленные аэромагнитные аномалии на исследуемой территории, очевидно, указывают на наличие значительных по объему перидотитов в основании массивов (Смагин и др., 2008), что повышает вероятность обнаружения возможного медно-никелевого оруденения с платиной, палладием и золотом. Состав сульфидной минерализации лерцолитов и верлитов кулибинского комплекса свидетельствует о ее кристаллизации из высокотемпературного сульфидного расплава в условиях быстрого охлаждения и без значительного его фракционирования в процессе высокой скорости транспортировки известково-щелочной базальтовой магмы из мантийного очага в верхние этажи литосферы. Согласно гравитационной модели наибольшее накопление сульфидов происходит в результате опускания капель сульфидной жидкости из головы магматической колонны в придонные части магматической камеры и их сегрегации в структурных ловушках в результате гравитационной дифференциации (Налдретт, 2003). Такая модель указывает на потенциальную рудоносность ультрамафитов, перекрытых габброидами.

В габброидах кулибинского комплекса нами обнаружены повышенные содержания золота (до 188 мг/т). Повышенные концентрации элемента в этих породах отмечались ранее (до 0,2-0,4 г/т) (Смагин, Ренжин, 2006). Возможно, перераспределение и сегрегация золота осуществлялась в процессе наложенного кислого метасоматоза, широко распространенного на исследуемой территории.

Установленная в талажинском и кулибинском комплексах акцессорная вкрапленность хромшпинелидов и железо-титанистых оксидов представляет исключительно петрологический интерес.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе впервые выполнено комплексное петрологическое исследование мафит-ультрамафитовых интрузий талажинского и кулибинского комплексов Канской глыбы Восточного Саяна. Детально изучены петрографические и петроструктурные особенности пород, позволившие установить отличительные черты исследуемых массивов. Талажинский комплекс представлен расслоенной серией пород, включающей плагиодуниты, троктолиты, оливиновые габбро и анортозиты. Кулибинский комплекс содержит две петрохимически контрастные серии пород: первая включает перидотиты и пироксениты, а вторая – преимущественно габброиды. Проведенные оригинальные петрохимические и геохимические исследования позволили выявить различия в эволюции вещественного состава пород, слагающих массивы исследуемых комплексов.

Впервые выявлены и изучены рудные минералы и их вещественный состав. Проведена их типизация и разделение на парагенетические ассоциации: магнетит-хромшпинелиевую и сульфидную. Показана предпочтительная приуроченность выделенных ассоциаций к главным типам пород. В интрузиях обоих комплексов впервые установлена сульфидная минерализация, которая позволяет предполагать наличие потенциальной промышленной медно-никелевой и благороднометальной минерализации. В пользу потенциальной рудоносности исследуемых объектов свидетельствует значительное сходство массивов талажинского и кулибинского комплексов с эталонными рудными объектами. Так, Талажинский массив по петрографическим, петрохимическим и геохимическим особенностям близок с неопротерозойскими комплексами Северного Прибайкалья и Канады – Йоко-Довыренским плутоном и интрузивом Войсис-Бей, которые содержат сульфидные Cu-Ni-платино-метальные руды промышленного масштаба. Такое сходство позволяет предполагать высокую степень потенциальной рудоносности Талажинского массива. Массивы кулибинского комплекса по петрологическим признакам близки массивам нижнедербинского комплекса, на потенциальное Cu-Ni с платиноидами оруденение которых неоднократно обращалось внимание предыдущих исследователей.

Впервые выполнено ЭВМ–моделирование химических составов родоначальных расплавов для обоих комплексов и проведена оценка геодинамических условий их формирования. Исходный расплав для пород расслоенного талажинского массива сформировался в остродужной обстановке при температурах 1240-1260 °С и соответствовал низкотитанистому высокоглиноземистому оливин-базальтовому расплаву повышенной магнезиальности. Контрастная ультрамафит-мафитовая серия пород кулибинского комплекса формировалась из исходного известково-щелочного расплава нормальной титанистости и глиноземистости при пониженной магнезиальности и условиия температур 1130-1150 °С, который генерировался в условиях надсубдукционной обстановки.

Таким образом, основные критерии продуктивности каждого из исследуемых комплексов различной формационной принадлежности отражаются в их петрографических, петроструктурных, минералогических, петрохимических, геохимических и минераграфических чертах, которые получили отражение в данной диссертационной работе.

Основные публикации по теме диссертации

В изданиях, рекомендованных ВАК:

1. **Юричев А.Н.**, Чернышов А.И. Формационная типизация Кунгусского и Кулижинского мафит-ультрамафитовых массивов (СЗ Восточного Саяна) // Вестник ТГУ. – 2009. – № 327. – С. 244-249.
2. **Юричев А.Н.**, Чернышов А.И. Петрология амфиболитов северо-западного окончания Канской глыбы (Восточный Саян) // Вестник ТГУ. – 2010. – № 335. – С. 183-188.
3. **Юричев А.Н**., Чернышов А.И. Рудная минерализация перидотитов и габброидов кулибинского комплекса (северо-запад Восточного Саяна) // Известия ТПУ. – 2011. – Т. 319. – № 1. – С. 64-70.

В других изданиях:

4. **Юричев А.Н.** Рудная минерализация габброидов Верхне-Кунгусского массива (северо-запад Восточного Саяна) // Труды X Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых «Проблемы геологии и освоения недр». – Томск: ТПУ, 2006. – Т. 1. – С. 112-113.
5. **Юричев А.Н.** Петрографическая типизация пород Верхне-Кунгусского массива (Восточный Саян) // Материалы XLV Международной научно-студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс». Геология. – Новосибирск: НГУ, 2007. – С. 27-28.
6. **Юричев А.Н.** Сравнительная характеристика ультрамафитов кингашского и идарского комплексов (северо-запад Восточного Саяна) // Материалы Всероссийской научной конференции «Петрология магматических и метаморфических комплексов». Вып. 6. – Томск: Томский ЦНТИ, 2007. – С. 213-215.
7. **Юричев А.Н.** Талажинский мафит-ультрамафитовый расслоенный массив (СЗ Восточного Саяна) // Материалы XLVI Международной научно-студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс». Геология. – Новосибирск: НГУ, 2008. – С. 110-111.
8. **Юричев А.Н.** Петрология Верхне-Кунгусского ультрамафит-мафитового массива (СЗ Восточного Саяна) // Труды XII Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых «Проблемы геологии и освоения недр». – Томск: ТПУ, 2008. – С. 147-148.
9. **Юричев А.Н.** Петрография пород Талажинского мафит-ультрамафитового расслоенного массива (Восточный Саян) // Труды XII Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых «Проблемы геологии и освоения недр». – Томск: ТПУ, 2008. – С. 148-150.
10. **Юричев А.Н.**, Чернышов А.И. Петрология Талажинского мафит-ультрамафитового расслоенного массива (Восточный Саян) // Материалы III Международной конференции «Ультрабазит-базитовые комплексы складчатых областей и связанные с ними месторождения». – Екатеринбург, 2009. – Т. 2. – С. 288-291.
11. **Юричев А.Н.** К вопросу о процессе образования пород Талажинского мафит-ультрамафитового расслоенного массива (Восточный Саян) // Материалы XLVII Международной научно-студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс». Геология. – Новосибирск: НГУ, 2009. – С. 52-54.
12. **Юричев А.Н.** Петроструктурные особенности оливина в магматических породах Талажинского массива (Восточный Саян) // Труды XIII Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых «Проблемы геологии и освоения недр». – Томск: ТПУ, 2009. – С. 112-114.
13. **Юричев А.Н.** Сравнительная геохимическая характеристика Талажинского и Йоко-Довыренского расслоенных массивов // Труды XIII Международного симпозиума имени академи-

ка М.А. Усова студентов и молодых ученых «Проблемы геологии и освоения недр». – Томск: ТПУ, 2009. – С. 114-116.
14. **Юричев А.Н.**, Чернышов А.И. Ультрамафиты северо-западного окончания Канской глыбы (Восточный Саян) // Материалы Всероссийской научной конференции «Петрология магматических и метаморфических комплексов». Вып. 7. – Томск, 2009. – С. 328-338.
15. **Юричев А.Н.** Петрохимические особенности пород кингашского и идарского комплексов северо-западного окончания Канской глыбы (Восточный Саян) // Труды XIV Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых «Проблемы геологии и освоения недр». – Томск: ТПУ, 2010. – Т. 1. – С. 145-147.
16. **Юричев А.Н.**, Чернышов А.И. Геодинамические обстановки формирования исходных вулканитов (протолитов) северо-западного окончания Канской глыбы (Восточный Саян) // Материалы всероссийской (с международным участием) научной конференции «Новые горизонты в изучении процессов магмо- и рудообразования». – М.: ИГЕМ РАН, 2010. – С. 183-184.
17. **Юричев А.Н.**, Чернышов А.И. Рудная минерализация плагиодунитов Талажинского мафит-ультрамафитового расслоенного массива (СЗ Восточного Саяна) // Труды Томского государственного университета. – Т. 277. – Сер. геолого-географическая: Актуальные вопросы географии и геологии: Матер. Всерос. молодежной науч. конф. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2010. – С. 329-331.