

На правах рукописи

РАДОМСКАЯ Татьяна Александровна

**МИНЕРАЛОГИЯ И ГЕОХИМИЯ КИНГАШСКОГО
ПЛАТИНОИДНО-МЕДНО-НИКЕЛЕВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ
(В. САЯН)**

25.00.05 – Минералогия, кристаллография

25.00.09 – Геохимия и геохимические методы поиска
полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Иркутск – 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геохимии им. А. П. Виноградова Сибирского отделения Российской Академии наук (ИГХ СО РАН)

Научный руководитель: доктор геолого-минералогических наук
профессор Глазунов Олег Михайлович

Официальные оппоненты: доктор геолого-минералогических наук
профессор Грудинин Мефодий Иванович
кандидат геолого-минералогических наук
Орсоев Дмитрий Анатольевич

Ведущая организация: Институт геологии и минералогии
им. В. С. Соболева (ИГМ СО РАН),
г. Новосибирск

Защита состоится «15» марта 2012 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 003.059.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1а; факс: (3952) 42-70-50, e-mail: korol@igc.irk.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИГХ СО РАН.

Автореферат разослан «___» февраля 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат геолого-минералогических наук

Г.П. Королева

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследований. Гипербазит-базитовые массивы считаются производными мантийных расплавов и несут не только ценную информацию о глубинных зонах, но и позволяют проследить эволюцию ультраосновного и основного магматизма. С ними связаны месторождения хромитовых, медно-никелевых сульфидных руд, ЭПГ и др.

Кингашское рудное поле с гипербазитовыми и гипербазит-базитовыми массивами расположено в метаморфизованной толще Канского докембрийского выступа в южном складчатом обрамлении Сибирской платформы и является составной частью Саянской платиноидно-медно-никелевой провинции (Глазунов, 1994). Эталонный Кингашский дунит-верлит-габбровый массив, ультраосновная часть которого представляет собой месторождение с крупными подсчитанными запасами никеля, меди и ЭПГ, является объектом изучения автора данной работы. Несмотря на повышенный интерес исследователей к массиву, остаются нерешёнными вопросы глубины его формирования, комагматичности ультраосновных и основных пород, геохимии элементов группы железа и благородных металлов, условий локализации руд.

Сравнение химического состава пород кингашского с другими ультраосновными комплексами позволит установить критерии рудоносности массивов кингашского типа. Необходимость расширения минерально-сырьевой базы Красноярского края и исследования новых источников платиноидно-медно-никелевых руд диктует прогнозируемое, по экспертным оценкам, снижение современных темпов добычи утверждённых запасов богатых руд Норильско-Талнахских месторождений (Додин и др., 2004).

Цель и задачи исследований: изучение минеральных парагенезисов в породах и рудах Кингашского месторождения, а также выявление закономерностей распределения благородных металлов, никеля, меди и кобальта на разных этапах эндогенного процесса.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- 1) Изучение равновесных минеральных парагенезисов в породах массива;
- 2) Выяснение особенностей распределения благородных металлов, никеля, меди и кобальта в породах, рудах и минеральных парагенезисах, формирующих геохимическую зональность массива;
- 3) Определение по изотопным данным мантийного компонента как источника родоначального магматического расплава и геодинамической обстановки образования массива;
- 4) Построение геохимической модели генезиса с оценкой P-T условий кристаллизации пород месторождения.

Фактический материал и методы исследований. В основу работы положены материалы, собранные автором во время экспедиционных работ в сотрудничестве с Ивановской ГРЭ (г. Канск) ОАО «Красноярскгеология», Кингашской ГРП «Норникель» в 2006 г., а также использованы геологические образцы из коллекции научного руководителя д.г.-м.н., профессора О.М. Глазунова. Во время полевых исследований производилось штучное опробование. Минеральный состав пород и руд исследовался в 423 прозрачных шлифах (из них 137 - авторских) и 192 аншлифах (из них 64 - авторских).

В работе использованы результаты аналитических исследований пород и руд, выполненные в ИГХ СО РАН г. Иркутска в период с 1999-2010 гг. Содержания петрогенных элементов (484 пробы, из них 165 - авторских) анализировались полным химическим силикатным анализом и рентген-флуоресцентным

методом. Концентрации рудных элементов (Cr, Ni, Cu, Co, Zn) определялись атомно-абсорбционным методом (314 проб, из них 113 - авторских). Содержания Pt, Pd, Ru, Ir, Rh, Au (55 проб) анализировались методом ICP-MS с использованием прибора Element 2. Редкоземельные элементы (25 проб) определялись методом ICP-MS с использованием прибора Element 2. Микрозондовый анализ состава минералов (375 определений) выполнен методом электронно-зондового рентгеноспектрального микроанализа на микроанализаторах JXA-733 фирмы JEOL и «Superprobe-8200» фирмы Jeol (Япония).

Научная новизна:

1) В результате комплексных петролого-геохимических исследований выполнен физико-химический расчёт P-T условий кристаллизации пород массива, вычислен состав родоначальной рудоносной магмы, построена генетическая модель месторождения;

2) Определены устойчивые парагенетические ассоциации минералов, характерные для разновидностей платиноидно-медно-никелевых руд, показаны особенности их минерального и химического составов, условия локализации и генезиса. Выявлен характер распределения Cr, Ni, Co, Cu и ЭПГ на разных стадиях эндогенного процесса;

3) На основании изучения зональности шпинелидов показаны различия в степени плавления исходного субстрата в процессе их кристаллизации, отражающие смену геодинамических условий;

4) Впервые на месторождении в рудах обнаружено соединение Re, установлен неизвестный ранее парагенезис меренскиита и кобальтина, проведено исследование содержания Re в породах кингашского и идарского комплексов.

Практическая значимость. Уточнены детали зональности с разделением зон геохимического концентрирования и рассеяния Cr, Ni, Cu, Co и ЭПГ. Расшифрована генетическая природа богатых руд массива. На основании сравнения распределения РЗЭ, петрогенных, рудных элементов в породах Кингашского месторождения и в гипербазитах идарского комплекса выделены критерии различия перспективных объектов на платиноидно-медно-никелевое оруденение среди ультрабазитов Канского блока. Составлена карта минералогических типов руд.

Защищаемые положения:

1. Платиноидно-медно-никелевое оруденение Кингашского дунит-верлит-габбрового массива сформировалось в результате кристаллизации магмы пикритового состава, обогащённой рудными компонентами. Эволюция магматического рудообразующего расплава приводит к повышению концентраций Ni, Cu, Co и ЭПГ в ультраосновных породах, изменению состава минералов и закономерной смене сульфидных парагенезисов от ранних дифференциатов к поздним.

2. Термобарометрические данные показывают различия физико-химических условий кристаллизации ультраосновной (T~1100-1260 °C, P~14 кбар) и основной (T~990 °C, P~8 кбар) магм. Температура и давление формирования пород ультраосновной части Кингашского массива отвечают абиссальным условиям развития интрузий и показывают зависимость изменения значений температур равновесия в последовательном ряду расслоенной серии: дуниты, верлиты, оливиновые клинопироксениты, клинопироксениты (T = 1260 - 980 °C, P = 14 - 11 кбар).

3. Основными геохимическими индикаторами рудоносности ультраосновных пород Канского блока являются низкие Ni/Cu и высокие Ti/Cr отношения, повышенные содержания TiO₂, Cu, P3Э с отрицательной Eu аномалией.

Публикации и апробация работы. По теме диссертации опубликовано 14 работ, в том числе 2 статьи в журналах «Доклады Академии Наук» и «Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАЕН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений», включённых в Перечень ВАК. Результаты исследований докладывались на конференции ИрГТУ, (Иркутск, 2006), научной конференции «Ультрабазит-базитовые комплексы складчатых областей» (Черноруд, Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, 2007), конференциях молодых учёных «Современные проблемы геохимии» (Иркутск, ИГХ СО РАН, 2009, 2011).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Общий объём работы – 206 стр., 75 иллюстраций, 31 таблица, 5 приложений. Список цитируемой литературы включает 201 наименование.

Благодарности. Работа выполнена в Институте геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН в лаборатории геохимии основного и ультраосновного магматизма (18.1) под руководством д.г.-м.н. профессора О.М. Глазунова, которому автор выражает глубокую благодарность. Автор благодарит к.г.-м.н. проф. А.С. Мехоношина, д.г.-м.н. А.Я. Медведева, д.г.-м.н. Н.В. Владыкина, д.г.-м.н. С.И. Костровицкого, д.г.-м.н. А.М. Спиридонова, д.г.-м.н. В.А. Макрыгину, к.г.-м.н. С.И. Дриля, к.г.-м.н. Т.Б. Колотилину, Л.М. Серебренникова за ценные советы при обсуждении результатов исследований. Автор выражает свою признательность к.х.н. Л.Ф. Суворовой за проведение микрозондовых анализов, аналитикам Института: Т.В. Ожогойной, В.Н. Власовой, к.х.н. Ю.В. Сокольниковой, И.Ю. Вороновой, Г.Я. Стрежневой, Е.В. Смирновой, д.х.н. Т.Н. Гуничевой, д.т.н. А.Л. Финкельштейну, С.С. Воробьёвой, В.И. Ложкину. Автор благодарит ведущего геолога ИГРЭ к.г.-м.н. А.Н. Смагина за помощь в организации и проведении полевых работ, а также Г.В. Бурмакину за постоянную помощь в оформлении работ.

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ. ИСТОРИЯ ИЗУЧЕНИЯ УЛЬТРАОСНОВНЫХ ПОРОД КАНСКОГО БЛОКА

В первой главе рассмотрены гипотезы формирования гипербазитов (Маракушев 1979; Колман 1979; Hall, 1980; Добрецов, 1980 и др.; Леснов, 2006; и др.) и связанного с ними хромитового, медно-никелевого (Годлевский, 1968; Дистлер и др., 1988; Золотухин, 2001; Налдретт, 2003; Малышев, 2005; и др.) и платинометального оруденения (Додин, Дюжиков, 2005; Колонин, Синякова, 2005; Маракушев, Панях, 2011; Горбунов и др. 2011; и др.).

В метаморфизованной вулканогенно-осадочной толще Канского докембрийского выступа, входящего в структуру складчатого обрамления южной части Сибирской платформы, расположено более 300 ультрабазитовых и ультрабазит-базитовых массивов. В результате работ ряда исследователей гипербазиты, отнесённые к идарскому комплексу нижнего протерозоя, были разделены на два комплекса: идарский дунит-гарцбургитовый и кингашский дунит-верлит-габбровый. Породы Канского блока формируют два разновозрастных структурно-вещественных комплекса с гнейсовой и амфиболитовой толщами: 1) нижний верхнеархейский караганский, 2) верхний раннепротерозойский анжинский (Ножкин, Смагин, 1988). Они характеризуются минеральными ассо-

циациями амфиболитовой и эпидот-амфиболитовой фаций метаморфизма с максимальным $P - 7,7-8,5$ кбар и $T - 600-700$ °C (Ножкин и др., 2001).

Кингашский дунит-верлит-габбровый комплекс представлен эллипсо-видными или изометричными массивами, размерами, не превышающими $3,0 \times 1,0$ км. К данному комплексу относятся Кингашское платиноидно-медно-никелевое месторождение, Верхнекингашское, Кусканакское, Куевские и другие Cu-Ni рудопоявления.

Идарский дунит-гарцбургитовый комплекс. Ультраосновные породы образуют мелкие тела линзовидной формы, реже незначительные по площади изометричные штоки с размерами $1,5-2,0$ км по протяженности, при мощности от 5-50 до 20-300 м. Большая часть тел идарского комплекса состоит из серпентинизированных дунитов и гарцбургитов, в меньшей мере пироксенитов.

ГЛАВА 2. ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И ПЕТРОЛОГИЯ КИНГАШСКОГО МАССИВА

Кингашский массив имеет вытянутую в северо-западном направлении линзовидную форму длиной 2,3 км, максимальной шириной 600 м и общей площадью порядка $1,5 \text{ км}^2$. Он состоит из нижней расслоенной серии ультраосновных пород и перекрывающих их габброидов (рис. 1), подстилаемых мраморами и кальцифирами с прослоями гнейсов. Между габброидами и ультраосновными породами наблюдается горизонт клинопироксенитов. В зоне контакта отмечается чередование ультраосновных и основных пород. В разрезе массив выглядит как асимметричное лополитообразное тело, разбитое на блоки нарушениями северо-западного и северо-восточного простирания, с тектоническими контактами, конкордантными кристаллизационной полосчатости вмещающей гнейсово-амфиболитовой толщи.

Ультраосновная часть массива сложена дунитами, верлитами и серпентинитами по этим породам. Верлиты образуют «прослой» в центральной части массива, а также подстилают клинопироксениты. В аповерлитовых серпентинитах, вскрытых скважинами в северной части массива, обнаружен горизонт мощностью 5-10 м, характеризующийся высокими концентрациями Ni (0,81 - 1,49 мас. %), Cu (0,22 - 0,82 мас. %), Au (0,58 - 0,84 г/т) и ЭПГ до 17 г/т (рис. 2), названный «платиноидным горизонтом» или «рифом» (Глазунов и др., 2003).

Дуниты – неравномернозернистые, средне-, мелкозернистые породы массивной текстуры. В интерстициях между оливинами расположены клинопироксениты и мелкие зёрна (до 0,2 мм) магнезиальной роговой обманки - эденита ($cNg=17-23^\circ$), редко – ильменит, иногда в сростании с магнетитом. Апатит ассоциирует с сульфидами и слюдами (флогопитом). В оливинах находятся включения Cr-плеонастов и пикрохромитов.

В дунитах преобладает вкрапленное пентландит-пирротинное оруденение с подчинённым количеством халькопирита. Сульфидные агрегаты ассоциируют с магнетитом, увеличение которого отмечается в сильно серпентинизированных разностях. В густо вкрапленных рудах содержание сульфидов возрастает до 25 об. % с образованием богатых руд (Ni >1 мас. %, Cu – 0,6 мас. %, Co – 340 г/т, Pt – 200 мг/т, Pd – 160 мг/т).

Дуниты образуют постепенные переходы к **верлитам**, что выражается в увеличении количества клинопироксена и эденита, появлении паргасита. Верлиты центральной части массива – серпентинизированные, амфиболитизированные среднезернистые породы массивной, пятнистой текстуры. В качестве акцессорных минералов встречаются пикрохромит, хромит, магнетит и флогопит.

Для верлитов отмечается халькопирит-пентландит-пирротиновый парагенезис с появлением среди них в виде единичных зёрен и скоплений кубанита, Сипентландита, сфалерита, халькозина, борнита, кобальтина.

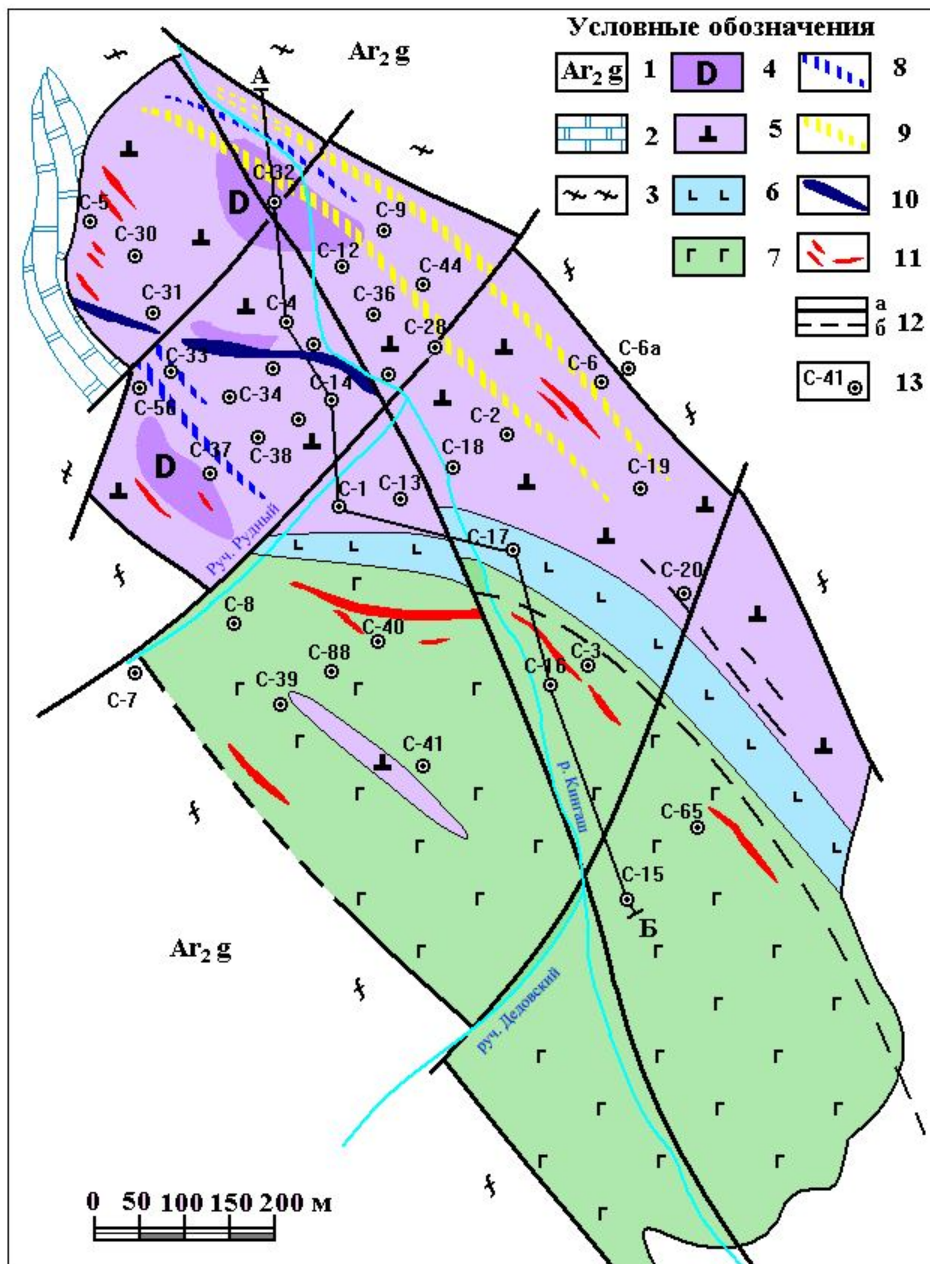


Рис. 1. Схема геологического строения Кингашского массива. Составлена О.М. Глазновым по материалам Кингашской ГРП, ИГХ СО РАН, с учётом данных ООО «Геокомп» (Ломаева, Тарасов, 2010) и упрощениями автора.

1 – Верхнеархейский караганский структурно-вещественный комплекс, гнейсовая толща (AR₂g) с прослоями: 2 – мраморов, 3 – кристаллосланцев; 4-7 – породы Кингашского массива: 4-5 – бедные вкрапленные руды (Ni – 0,2 - 0,5 мас. %): 4 – дуниты, 5 – аподунитовые серпентиниты; 6 – клинопироксениты; 7 – габбро и габбро-амфиболиты; 8-9 – платиноидно-медно-никелевые руды: 8 – рядовые (Ni – 0,5 - 1 мас. %), 9 – богатые (Ni >1 мас. %); 10 – брекчиево-жильные руды; 11 – позднеархейский тукшинский мигматит-плагиогранитовый комплекс; 12 – тектонические нарушения: а – установленные, б – предполагаемые; 13 – номера скважин и их положение на плане.

Верлиты, подстилающие клинопироксениты, отличаются от аналогичных пород ультраосновной части массива лучшей сохранностью породообразующих

минералов, а также содержанием Ni ниже бортового (<0,2 мас. %) (рис. 3). Сульфиды, ксеноморфно располагающиеся в интерстициях между силикатными минералами, представлены в основном пирротином, в меньшей степени пентландитом и халькопиритом.

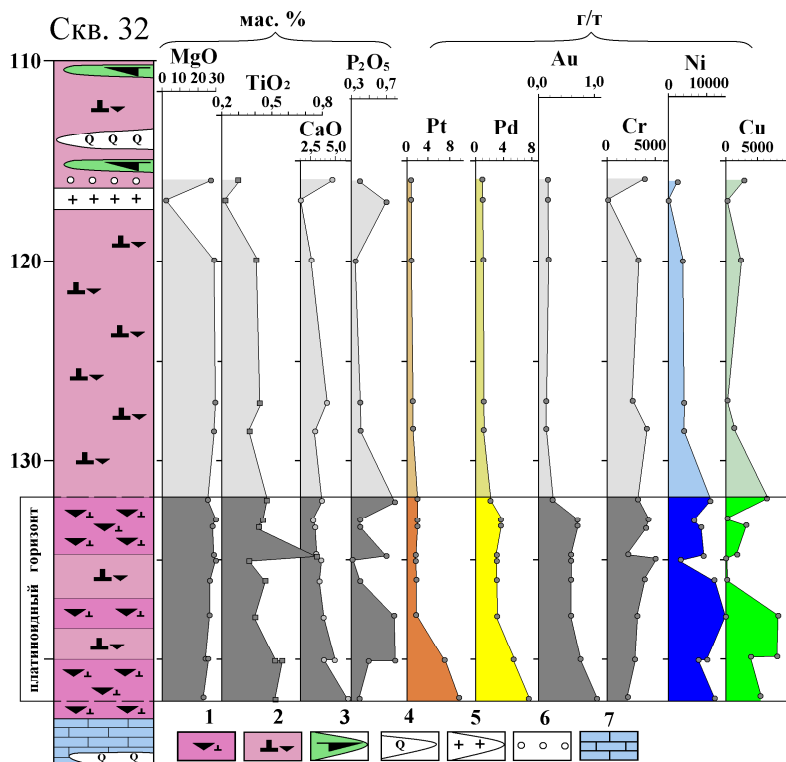


Рис. 2. Содержание породообразующих оксидов и рудных элементов по разрезу.

1 – верлиты серпентинизированные, 2 – аповерлитовые серпентиниты, 3 – габбро-амфиболиты, 4 – кварцевые жилы, 5 – плагиограниты, 6 – оталькование, 7 – мраморы.

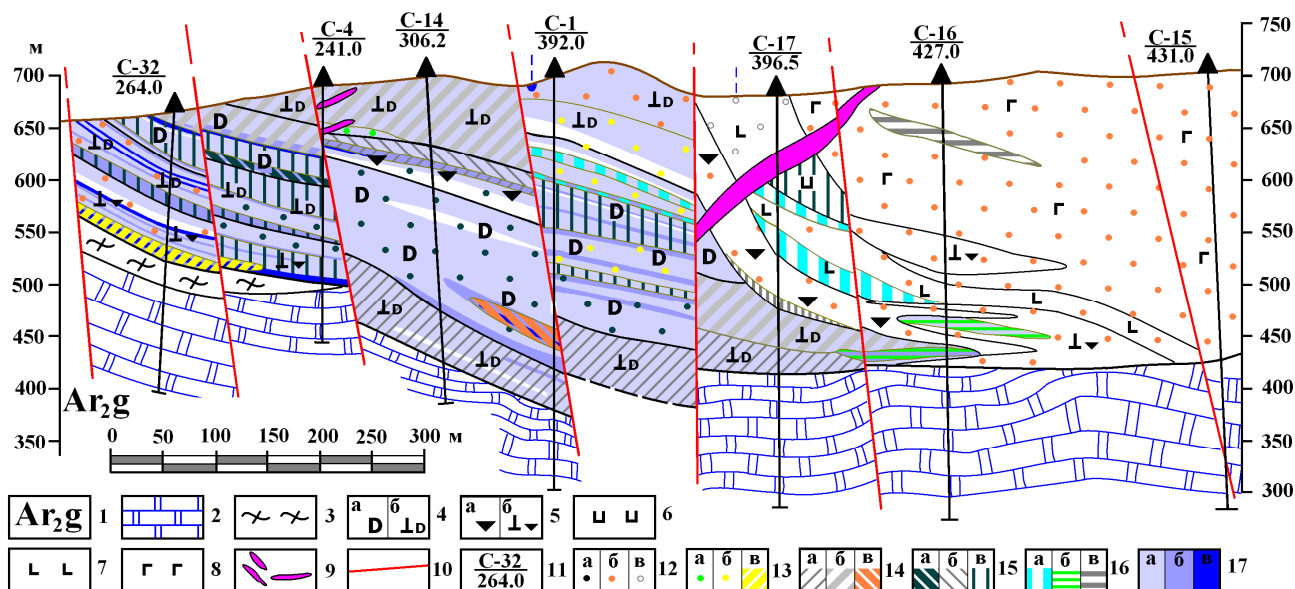


Рис. 3. Минералого-геохимический разрез с градацией пород и руд по содержанию Ni. 1 – Верхнеархейский караганский структурно-вещественный комплекс, гнейсовая толща (Ar₂g) с прослоями: 2 – мраморов, 3 – кристаллосланцев; 4-8 – породы Кингашского массива: 4 – дуниты (а), аподунитовые серпентиниты (б), 5 – верлиты (а), аповерлитовые серпентиниты (б), 6 – оливиновые клинопироксениты, 7 – клинопироксениты, 8 – габбро-амфиболиты; 9 – позднеархейский тукшинский мигматит-плагиогранитовый комплекс, 10 – тектонические нарушения, 11 – положение скважин на разрезе, в числителе указан номер скважины, в знаменателе – её глубина, 12-16 – типы руд: 12 – Cr-Po-Pn (а), Cr-Pn-Po (б), Pn-Cr-Po (в); 13 – Cr-Po (а), Po-Pn (б), МПГ-Cr-Po-Pn («платиноидный горизонт») (в); 14 – Val-Po-Pn (а), Val-

Pn (б), Pn-Po-Cp (в); 15 – Mc-Cub-Pn (а), Po-Mc-Cp-Pn (б), Mc-Cp-Pn-Po (в); 16 – Cub-Cp-Pn-Po (а), Val-Cp-Pn-Po(б), Pn-Val-Cp-Po (в); 17 – кондиционные руды (по содержанию Ni, мас. %): а - бедные (0,2 - 0,5), б - рядовые (0,5 - 1), в - богатые (>1). Po – пирротин, Pn – пентландит, Cp – халькопирит, Cub – кубанит, Mc – маккинавит, Val – валлериит.

Клинопироксениты имеют среднезернистую структуру и пятнистую текстуру; состоят из диопсида, пойкилитово включающего оливин, бледно-бурой роговой обманки - паргасита, флогопита и рудных минералов - пирротина, пентландита с высоким содержанием Co (5,9 мас. %) и халькопирита.

Габбро и габбро-амфиболиты (TiO_2 – 0,2-0,5 мас. %) – среднезернистые породы фибробластовой, гранобластовой текстур. Плагиоклаз замещён цоизитом и эпидотом. По моноклинному пироксену развивается амфибол. Присутствует редкая сульфидная вкрапленность. В качестве второстепенных минералов встречаются зёрна титанита (сфена) и ярко-оранжевого биотита. Габбро-амфиболиты массива отличаются низкими концентрациями Nb, Ta, Zr и Hf (в г/т) (1-1,6; 0,4; 15-20 и 0,5 соответственно) по сравнению с уровнем этих элементов в амфиболитах вмещающей толщи – 10-13; 1-2; 176-258 и 3-5 г/т (Глазунов и др., 2003).

Второстепенные породы массива представлены роговообманковыми перидотитами, талькитами, а также горнблендитами. Массив инъецирован дайками плагиогранитов, иногда довольно мощными, мелкими жилами кварц-плагиоклазового состава и микрогаббро (TiO_2 0,7-2,7 мас. %).

Ультраосновные породы Кингашского массива в разной степени преобразованы процессами серпентинизации, тремолитизации, оталькования и карбонатизации. Признаком низкотемпературного регрессивного автометаморфизма является замещение оливина серпентином с образованием петельчатой структуры. Региональный метаморфизм пород проявляется минеральными ассоциациями эпидот-амфиболитовой фации. Отношение $(Al_2O_3+CaO+MgO)/SiO_2$ в дунитах и верлитах Кингашского массива практически не изменяется с ростом количества H_2O^+ , что указывает на изохимичность процесса серпентинизации в отношении этих элементов. Контактный метаморфизм, связанный с внедрением плагиогранитов позднеархейского тукшинского комплекса, выражен в проявлении амфиболитизации, хлоритизации и привносе Zr до 50 г/т и Sc до 140 г/т.

Сульфидная вкрапленность содержится как в ультраосновных, так и в основных породах массива. Руды по содержанию Ni – главного промышленного компонента на месторождении делятся на богатые (>1 мас. %), рядовые (0,5-1 мас. %) и бедные (0,2-0,5 мас. %) (Ломаева, Тарасов, 2010) (см. рис. 3). Почти все ультраосновные породы массива представляют собой рудное тело, поскольку содержание в них Ni редко опускается ниже бортового 0,2 мас. %. Исключением являются верлиты и аповерлитовые серпентиниты на контакте с габбро-амфиболитами, а также тонкие горизонты пород в ультраосновной части массива. Петрографическая зональность в разрезе подчёркивается чередованием бедных, рядовых и богатых руд с концентрированием Ni в придонной части массива.

По времени образования, генетическим и структурно-текстурным признакам выделяются: сингенетические (вкрапленные, густо вкрапленные) и эпигенетические (брекчиево-жилые, массивные) руды. *Вкрапленные руды* преобладают в породах массива с различным количеством сульфидов и разным соотношением рудных минералов. В ультраосновных породах среди сульфидов обычно доминирует пирротин или пентландит, редко халькопирит, а в габброи-

дах и пироксенитах превалирует пирротиновая вкрапленная минерализация с подчинённым количеством халькопирита и пентландита (Радомская, 2003). Валлериит-пирротин-пентландитовые вкрапленные руды характерны для сильно серпентинизированных пород. Некондиционные руды обнаруживаются в габброидах, пироксенитах, реже в ультраосновных породах. Богатые ($Ni > 1,0$ мас. %) вкрапленные халькопирит-пирротин-пентландитовые руды с минеральными фазами ЭПГ локализуются в северо-восточной части массива на поверхности и на глубине, где границы руд совпадают с контурами «платиноидного горизонта» (см. рис. 3). *Густо вкрапленные руды* маккинавит-халькопирит-пентландит-пирротинового состава мощностью до 10 м вскрываются на инт. 150-200 м скв. № 4 и № 20. На поверхности в центре рудного поля, а также в ряде скважин на глубине вскрыты тела *брекчиево-жильных* руд мощностью до 5 м, кососекущие полосчатость массива. *Массивные руды* пентландит-кубанит-халькопирит-пирротинового состава обнаружены в придонной части массива по скв. № 40 и № 33. Содержания Cu в них достигают 5,7 и Ni – 1,8 мас. %, Co – 500 г/т.

ГЛАВА 3. ПОРОДООБРАЗУЮЩИЕ И РУДНЫЕ МИНЕРАЛЫ

Оливины Кингашского массива относятся к форстеритам с фаялитовой составляющей (Fa) в дунитах и верлитах 13-16 %, оливиновых клинопироксенитах – 22-24 %. Оливины дунитов и верлитов несут Ni до 0,33 мас. % и на диаграмме зависимости концентрации никеля от железистости попадают в области трендов, типичных для кристаллизации расплавов с полной и 50 % отсадкой сульфидной фазы (рис. 4). Следовательно, ультраосновной расплав был насыщен рудной составляющей.

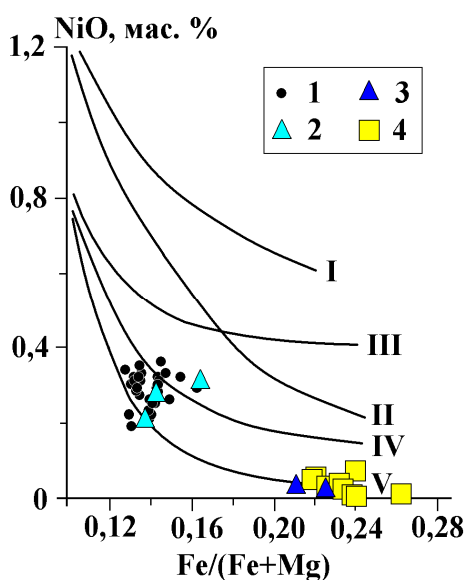


Рис. 4. Зависимость содержаний NiO от железистости оливинов Кингашского массива.

1 – дуниты, 2 – верлиты, 3 – верлиты, ассоциирующие с оливиновыми клинопироксенитами, 4 – оливиновые клинопироксениты. Линиями обозначены тренды кристаллизации расплавов, по (Арутюнян и др., 1988): I – силикатный расплав, II – фракционирование оливина в силикатной системе, III-V сульфидно-силикатная система: III – без отсадки сульфида, IV – с полной отсадкой сульфидной фазы, V – с 50 % отсадкой сульфидной фазы.

Клинопироксены в верлитах и оливиновых клинопироксенитах по химическому составу соответствуют диопсидам, в габбро-амфиболитах – авгитам. Зёрна пироксенов несут включения хромалюмошпинели ($0,5 \times 3 \mu m$). По трещинам спайности в клинопироксенах развивается ильменит.

По разрезу массива снизу вверх в пироксенах повышается железистость и снижаются концентрации Ca.

Амфиболы по классификации (Leake et al., 1997) представлены эденитом, паргаситом, ферропаргаситом и тремолитом. Ранняя высокотемпературная генерация амфиболов, соответствующая эденитам, обнаружена в дунитах, верлитах и оливиновых клинопироксенитах. Вторая генерация в виде паргасита выявлена в верлитах, оливиновых клинопироксенитах, массивных и брекчиево-

жильных рудах. Третья генерация в виде ферропаргасита также отмечается в брекчиево-жильных рудах. Из анализа полученных данных следует, что роговые обманки эденит-паргаситового ряда на Кингашском месторождении имеют магматическую природу. Тремолит отражает низкую степень регионального метаморфизма.

Апатит в ультраосновных породах массива встречается в интерстициях между оливинами в виде гипидиоморфных кристаллов, часто внутри чешуек флогопита. В верлитах «платиноидного горизонта» и дунитах апатит срастается с сульфидами. В клинопироксенитах минерал развивается на границе зёрен оливина и пироксена. По химическому составу апатиты из дунитов и верлитов отличаются высокой концентрацией Cl (1,4-1,7 мас. %) по сравнению с апатитами из верлитов, которые ассоциируют с клинопироксенитами (0,6-0,7 мас. %).

Шпинелиды Кингашского массива различаются по структурно-морфологическим особенностям, химическому составу и условиям кристаллизации. Ранняя генерация в виде включений в оливинах неизменённых дунитов представлена Cr-плеонастом по классификации В.Ф. Смолькина (1979). Шпинелидам второй генерации свойственно зональное строение, обусловленное существованием «ядер», отвечающих по составу пикрохромитам, и оторочек, соответствующих Fe-хромитам. Иногда вокруг зёрен наблюдается вторая оторочка из халькопирита. Поздние генерации – Ti-Cr-магнетиты, Cr-магнетиты и магнетиты широко распространены почти во всех типах кингашских медно-никелевых руд.

Известно, что степень деплетированности ультрабазитов имеет взаимосвязь с хромистостью шпинелидов (Arai, 1994), на основании чего предложены графические (Page et al., 2008) (рис. 5) и математические методы ($D_{melt} = 0,426 Cr/(Cr + Al) + 1,538$) (Леснов, 2008), позволяющие оценить степень плавления исходного субстрата. Установлено, что хромплеонасты, Mg-Al-хромиты, а также центральные части зональных хромшпинелидов (пикрохромиты) в ультраосновных породах Кингашского массива кристаллизовались при низкой степени частичного плавления (9,4 - 21,2), присущей развитию абиссальных перидотитов, в то время как Ti-хромиты и краевые части зональных хромшпинелидов (Fe-хромиты) – при высокой (38,2 - 43,8), характерной для перидотитов субдукционных зон (рис. 5).

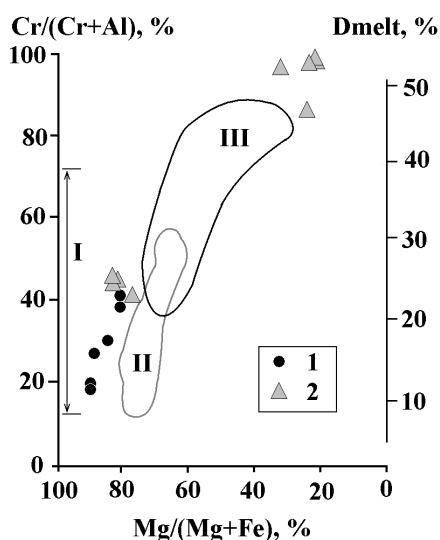


Рис. 5. Бинарная диаграмма отношения магнезиальности и хромистости хромшпинелидов (Page et al., 2008). 1-2 - составы хромшпинелидов из ультраосновных пород Кингашского месторождения: 1 – дуниты, 2 – верлиты. Поля составов хромшпинелидов из: I – задуговых перидотитов (Monnier et al., 1995), II - абиссальных перидотитов (Dick, Bullen, 1984), III – перидотитов субдукционных зон (Choi et al., 2008).

Магнетиты в срастании с сульфидами сформировались в результате окисления части сульфидного железа. Это подтверждается экспериментально доказанной возможностью образования магнетита из пирротинового расплава при его взаимодействии с водно-углекислотным флюидом (Конников и др., 2004). На присутствие такого флюида в процессе кристаллизации ультраосновных пород массива указывают позднемагматические водосо-

державшие минералы (амфиболы эденит-паргаситового ряда) и минералы, образовавшиеся в результате автометаморфизма (серпентины).

В ряду от раннемагматических к позднемагматическим породам количество **ильменитов** увеличивается, изменяется и их состав: повышаются концентрации Mn при снижении уровня Mg. В ильменитах массивных руд содержание FeO увеличивается с 36,0 до 51,0 мас. %, а MnO уменьшается с 11,99 до 3,5 мас. %.

Таким образом, по минералого-химическим данным, в ультраосновных породах, от ранних дифференциатов к поздним, в ряду дунит-верлит-клинопироксенит увеличивается железистость и снижается магнезиальность силикатных породообразующих минералов, аксессуарных шпинелидов и ильменитов. Присутствие амфиболов, слюд и апатита в породах и рудах свидетельствует о насыщенности ультраосновного расплава флюидами и щелочами.

Главными магматическими рудными минералами Кингашского месторождения являются пирротин, пентландит, халькопирит. В качестве второстепенных также встречаются кубанит, маккинавит, валлериит, борнит, халькозин, ковеллин, сфалерит, никелин, Cu-пентландит, аргентопентландит, кобальтин, виоларит, паркерит, маухерит, гёрсдорфит, раммельсбергит и самородная Cu.

Пирротины на месторождении представлены тремя модификациями: гексагональным, моноклинным пирротинами и троилитом. Большинство проанализированных минералов стехиометричны по составу, что может быть связано с медленным остыванием сульфидного расплава. Количество Fe (в ат. %) в пирротинах уменьшается от ранних вкрапленных руд в дунитах к эпигенетическим брекчиево-жильным и сплошным рудам. По мере снижения отношения Fe/S в минерале увеличивается количество Ni и Co и уменьшаются концентрации Cu, Rh и Pd. По геохимическим особенностям кингашские пирротины делятся на две группы. К первой относятся низкосернистые (S = 34,2 - 37,1 мас. %) и высокожелезистые (Fe = 62,4 - 65,3 мас. %) пирротины из дунитов, верлитов и клинопироксенитов. Характерной особенностью их является отсутствие примесей Ni. Ко второй группе относятся высокосернистые (S = 38,0 - 39,5 мас. %) и низкожелезистые (Fe = 60,0 - 61,8 мас. %) пирротины с примесями Ni (до 0,4 мас. %) из аповерлитовых серпентинитов «платиноидного горизонта», массивных руд и габброидов.

Пентландиты являются главным концентратором никеля на месторождении. По содержанию в руде пентландит уступает пирротину. В рудных серпентинитах восточной части массива он является доминирующим сульфидным минералом. На диаграмме отношения Ni к Fe составы пентландитов образуют единый тренд, что подтверждает дифференциацию сульфидного расплава (рис. 6). От ранних вкрапленных руд к эпигенетическим брекчиево-жильным и массивным рудам в пентландитах растёт содержание Ni и уменьшается количество Fe. Высокие концентрации Ni установлены в пентландитах густо-вкрапленных руд «платиноидного горизонта» и в массивных рудах халькопирит-пентландит-пирротиновой минеральной ассоциации. По содержанию Co пентландиты подразделяются на низкокобальтовые и высококобальтовые. На месторождении преобладают низкокобальтовые пентландиты (Co 0,4 - 1,8 мас. %, Fe 33,7 - 43,2 мас. %). Высококобальтовые пентландиты с концентрацией Co 2,7 - 5,2 мас. % и Fe 34,5 - 31,6 мас. % обнаружены в сульфидных вкрапленниках клинопироксенитов и в массивных рудах. Повышенный уровень Cu (0,16 - 0,5 мас. %) характерен для раннемагматических пентландитов из дунитов (см. рис. 6).

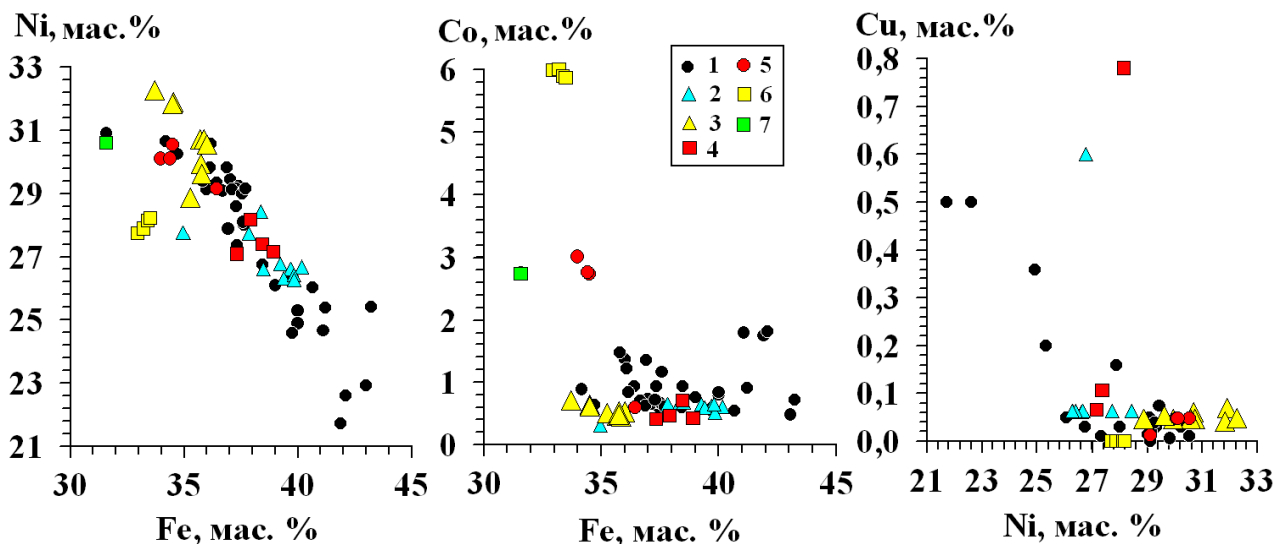


Рис. 6. Состав пентландитов Кингашского месторождения.

1-3, – вкрапленные руды: 1 – дуниты и аподунитовые серпентиниты, 2 – верлиты и аповерлитовые серпентиниты, 3 – аповерлитовые серпентиниты платиноидного горизонта; 4 – брекчиево-жильные руды; 5 – массивные руды; 6 – оливиновые клинопироксениты, 7 – габбро-амфиболиты.

Халькопириты встречаются в двух морфологических формах: зерна и прожилки в сульфидах или силикатах. Отношение Cu/Fe в них колеблется незначительно – от 1,1 до 1,2. В халькопиритах содержание Fe снижается прямо пропорционально уменьшению концентрации Cu (в мас. %): от 33,2 до 28,0 и от 35,1 до 33,4 соответственно. В качестве микропримеси в халькопирите присутствует Ni (от следов до 0,2 мас. %).

На месторождении в брекчиево-жильных и массивных рудах широко развит **кубанит** в виде самостоятельных зёрен размером 0,1-0,6 мм и прожилков (5-40 μm) в пирротинах, пентландитах и силикатных минералах. Отношение Cu/Fe в них варьирует от 0,54 до 0,65.

Сравнение состава рудных минералов кингашского комплекса с минералами подобных комплексов других регионов (Печенга, Норильск) говорит о более высоком насыщении железом кингашской рудной системы (рис. 7).

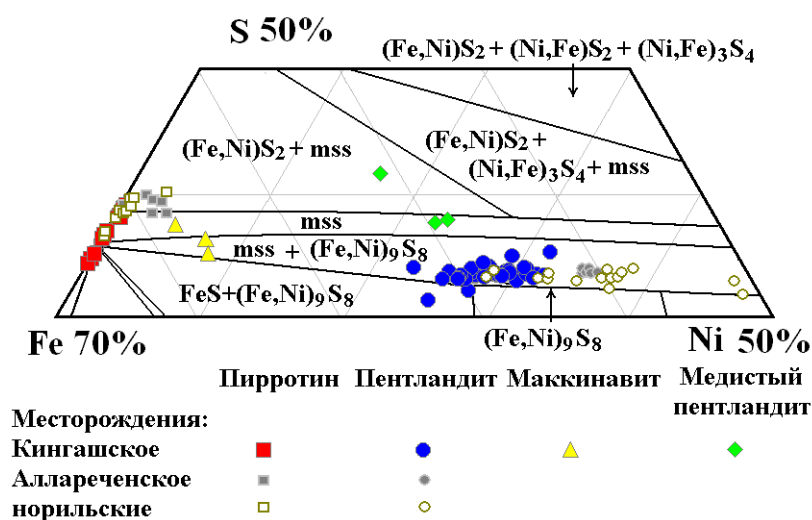


Рис. 7. Состав минералов системы Fe-Ni-S в рудах Кингашского, Аллареченского (Яковлев и Яковлева, 1974) и норильских месторождений (Генкин и др., 1981).

На тройную диаграмму нанесены соотношения конденсированных фаз в системе Fe-Ni-S при 400 °C, по (Воган, Крейг, 1981).

Вкрапленное оруденение является магматическим, в то время как жильные формы выделения низкотемпературных сульфидов указывают на их принадлежность к эпимагматическому этапу кристаллизации. Изучение характера взаимоотношений рудных

Месторождения: Кингашское (красный квадрат), Аллареченское (серый квадрат), норильские (желтый квадрат), Пентландит (синий круг), Маккинавит (желтый треугольник), Медистый пентландит (зеленый ромб).

минералов позволяет проследить порядок выделения магматических сульфидов – пирротина, пентландита, халькопирита. Гексагональный пирротин образуется одновременно с пентландитом в результате распада Mss . В дунитах кристаллизуется небольшое количество халькопирита с высоким содержанием Fe, тогда как для верлитов отмечается увеличение содержания халькопирита близкого по составу к стехиометричному. Эпимагматический моноклинный пирротин совместно с кубанитом образуют прожилки. Изменение состава рудных минералов, а именно: снижение в них количества Fe, Rh и Pd и рост концентраций S, Ni и Co от раннемагматических бедных вкрапленных руд до поздне- и эпимагматических брекчиево-жильных и массивных руд, свидетельствует об эволюции сульфидного расплава в процессе его кристаллизации.

Носителями драгоценных металлов кингашских медно-никелевых руд являются минералы платиновой группы (МПП) и соединения Ag и Au: мончеит, майченерит, меренскиит, котульскит соболевскит, фрудит, паоловит, сперрилит, ирарсит, гёссит, самородное, медистое и паладиное Au, электрум, кюстелит, аурикуприд, тетрааурикуприд, Pd тетрааурикуприд, амальгама Au и Ag. Гёссит встречается обычно в парагенезисе с МПП (рис 8 а, в) и является главным концентратором Ag на месторождении. Наши работы позволили получить новые данные о составе МПП платиноидного горизонта, установить неизвестный ранее для кингашских руд парагенезис меренскиита и кобальтина (рис. 8 б) и обнаружить соединение Re (рис. 8 г). Большинство МПП «платиноидного горизонта», среди которых преобладают висмутотеллуриды палладия, находятся внутри или по краям сульфидных агрегатов, состоящих из высокосернистых пирротинов в сростании с пламенеvidным троилитом (рис. 8 б) и высоконикелистых пентландитов.

Составы висмутотеллуридов палладия (Pd-мелонит, меренскиит, котульскит, майченерит, соболевскит) на диаграмме отношения Bi к Te образуют единый тренд с отрицательной корреляцией. Pd с Te коррелируют положительно в соболевските, котульските и отрицательно в меренскиите. В майченеритах по мере перехода от вкрапленных руд к брекчиево-жильным при снижении концентрации Pt от 9,8 мас. % до следов поднимается уровень Pd, Te и Os, мас. % (18 – 24; 23 – 29 и 0,05 - 0,2 соответственно). В меренскиитах количества Pd и Bi уменьшаются, а Ni и Te – возрастают от дунитов к верлитам.

Кроме самородной формы, ЭПП рассеиваются в сульфидах. Анализ пирротина и пентландита показывает на присутствие в них 0,1 - 0,3 мас. % \sum ЭПП, что сопоставимо с рудами норильского типа (Evstigneeva, Filimonova, 2002).

ГЛАВА 4. ГЕОХИМИЯ ПОРОД И РУД КИНГАШСКОГО МАССИВА

По отношению SiO_2 и суммы щелочей породы Кингашского массива принадлежат к серии нормальной щёлочности. Дуниты характеризуются несколько повышенным содержанием Al_2O_3 и Na_2O (2,3 и 0,2 мас. % соответственно, среднее по 93 пробам) по сравнению с реститами, что объясняется присутствием магнезиальной роговой обманки эденит-паргаситового ряда (рис. 9). Верлиты в соответствии с их минеральным составом также обогащены Na_2O (0,4 мас. %, среднее по 54 пробам). Породы Кингашского массива располагаются на линии оливин-эденита (Ol-Ed), в отличие от классических статистических полей распределения химических составов, размещающихся на линии оливин-клинопироксена (Ol-Cpx) (см. рис. 9). С уменьшением уровня MgO в породах массива увеличиваются количества SiO_2 , CaO , Al_2O_3 , TiO_2 , Na_2O и K_2O (табл. 1), что отражает магматический процесс фракционирования.

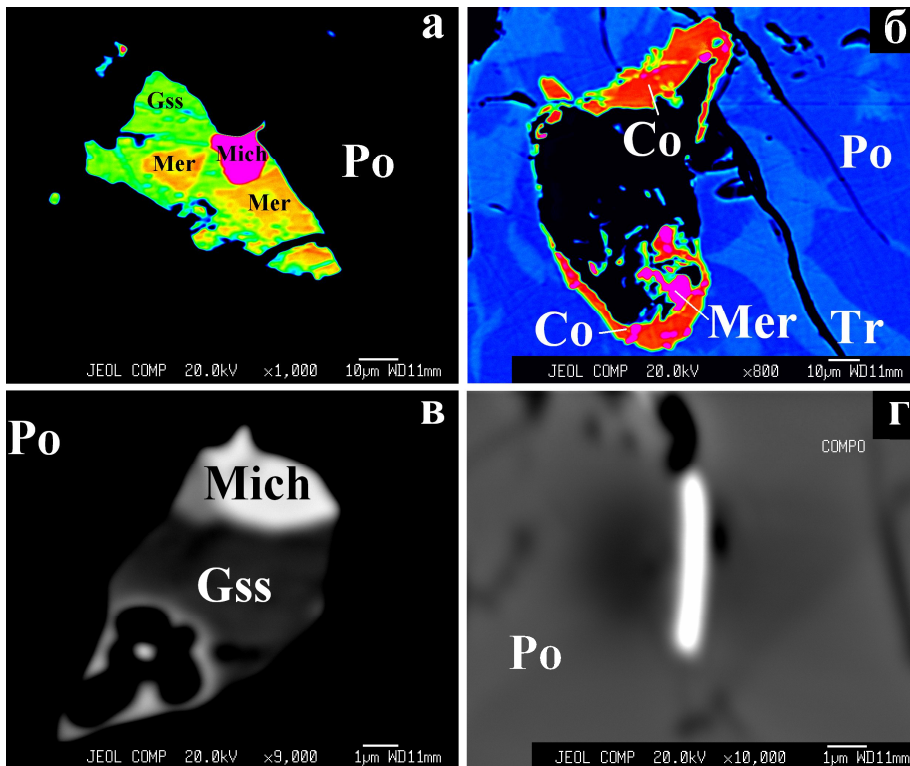


Рис. 8. МПГ в породах Кингашского массива. (а, б) – МПГ «платиноидного горизонта»: (а) – гёссит (Gss) с меренскиитом (Mer) и майченеритом (Mich); (б) – кайма кобальтина (Co) и меренскиита в агрегате пирротина (Po) с ламеллями троилита (Tr); (в) – гёссит с майченеритом в пирротине; (г) – оксид рения в пирротине. Фотографии (а, б) выполнены в цвете для контрастного отображения минеральных парагенезисов (микроанализатор «Supergrobe-8200» фирмы Jeol). Насыщенность цветового спектра растёт пропорционально увеличению атомного номера элементов, входящих в состав минералов.

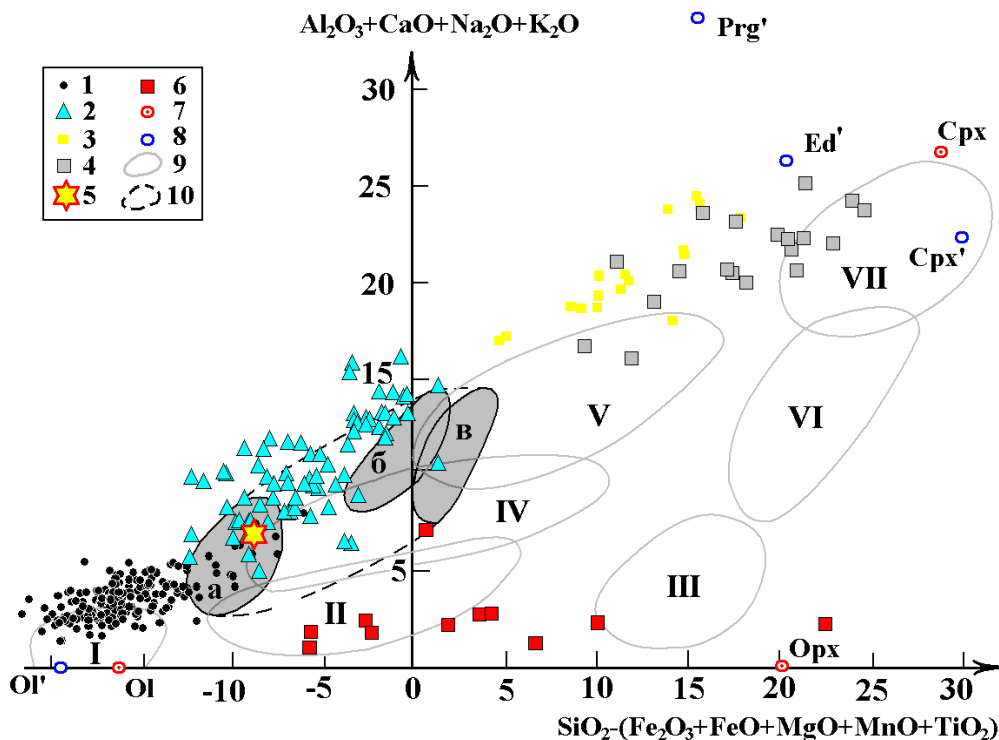


Рис. 9. Положение пород Кингашского массива и идарского комплекса на диаграмме В.Л. Барсукова, Л.В. Дмитриева (1972) в координатах $Al_2O_3+CaO+Na_2O+K_2O - SiO_2 - (Fe_2O_3+FeO+MgO+MnO+TiO_2)$, мас. %.

1-4 Кингашский массив: 1 – дуниты, аподунитовые серпентиниты, 2 – верлиты, аповерлитовые серпентиниты, 3 – оливинные клинопироксениты, 4 – клинопироксениты; 5 – средний состав пород Кингашского массива, 6 – ультраосновные породы идарского комплекса, 7-8 – фигуративные точки составов типоморфных породообразующих минералов: 7 – идеальные (нормативные) форстерита, энстатита, диопсида (Ol, Opх, Cpx), 8 – оливина, клинопироксена, эденита и паргасита из ультраосновных пород Кингашского массива (Ol', Cpx', Ed', Prg'); 9-10 – статистические поля распределения химических составов пород: 9 – главные виды

ультрамафитов: I – дуниты, оливиниты, II – гарцбургиты, III – ортопироксениты, IV – лерцолиты, V – верлиты, VI – вебстериты, VII - клинопироксениты; 10 – вулканические и гипабиссальные породы семейства пикритов: а – меймечиты, б – пикриты, в – перидотитовые коматиты.

Таблица 1

Химический состав пород кингашского, идарского и печенгского комплексов

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO ₂	36,25	38,82	37,45	36,17	35,38	46,52	44,79	35,24	39,54	37,13
TiO ₂	0,14	0,17	0,60	0,52	0,47	0,4	0,42	0,184	0,05	0,95
Al ₂ O ₃	2,17	2,4	6,90	6,90	3,2	3,14	10,18	2,47	0,6	3,16
Fe ₂ O ₃	4,1	5,03	5,32	5,49	3,05	13,05	13,57	13,05	7,59	8,42
FeO	7,54	7,9	8,09	8,87	12,93					8,58
MnO	0,16	0,17	0,15	0,13	0,14	0,13	0,03	0,119	0,13	0,20
MgO	39,24	37,5	25,24	24,30	28,2	21,5	12,48	34,491	31,28	28,20
CaO	0,73	1,4	4,96	5,00	3,0	11,93	15,01	0,107	6,5	2,65
Na ₂ O	<0,26	0,85	0,48	0,35	0,77	0,36	0,67	<0,20	<0,01	0,10
K ₂ O	0,02	0,08	0,09	0,07	0,61	0,13	0,36	0,079	<0,01	0,11
P ₂ O ₅	0,02	0,03	0,08	0,08	0,06	0,04	0,02	0,020	0,03	0,07
П.п.п.	5,83	3,48	5,76	6,83	8,66	2,75	2,62	14,10	8,93	9,00
S _{общ}	1,2	0,39	1,80	2,84	2,19	-	-	-	0,13	0,33
CO ₂	-	0,22	0,20	0,53	2,64	-	-	-	5,07	0,29
сумма	98,30*	99,84*	99,21*	100,83*	101,30	99,95	100,15	99,86	99,85	99,19
Cr	2500	6400	3400	2900	3100	3400	1000	3300	2100	3420
Ni	3200	4200	9300	10300	9900	1800	850	8000	2200	2200
Co	150	160	240	215	310	220	140	250	71	200
Cu	1100	1000	3300	8200	2400	600	390	1500	21	200
V	44	79	160	140	72	360	250	-	<50	170
Ni/Cu	2,9	4,2	2,8	1,3	4,1	3,0	2,2	5,3	104,8	11,0
Ti/Cr	0,3	0,2	1,1	1,1	0,9	0,7	2,5	0,3	0,1	1,7
Os	<0,1	<0,1	11,80	7,10	60,40	0,86	<0,1	-	<0,1	-
Ir	1,2	6,6	8,4	22,9	14,0	1,5	1,9	-	1,7	-
Ru	2,7	7,5	20,1	95,7	126,6	0,4	0,4	-	5,1	-
Rh	1,3	7,7	10,0	9,2	29,0	1,5	<0,1	-	5,0	-
Pt	86,8	244,9	236,0	1942,0	322,0	12,7	18,9	420	23,9	-
Pd	29,2	191,9	554,0	1656,0	700,9	10,6	24,2	1100	31,9	-
Re	6,0	3,9	14,7	19,6	66,6	6,8	6,2	-	0,7	-
Pd/Pt	0,34	0,78	2,35	0,85	2,18	0,83	1,28	2,62	1,33	-

1-7 – Кингашский массив: 1-2 – дуниты; 3-5 – аповерлитовые серпентиниты: 4 – вкрапленная руда «платиноидного горизонта», 5 – брекчиево-жильная руда; 6 – клинопироксенит; 7 – габбро-амфиболит; 8 – серпентинит аподунитовый Верхнекингашского массива; 9 – серпентинит идарского комплекса; 10 – средний состав верлитов серпентинизированных (42 пробы), Печенгская интрузия (Смолякин, 1992). Анализы выполнены в ИГХ СО РАН, г. Иркутск: силикатный анализ (мас. %) – (аналитик Т.В. Ожогина), 6-9 анализы – рентгенофлуоресцентным методом (аналитик А.Л. Финкельштейн); элементы группы железа (г/т) – атомно-абсорбционным, в 8 анализе – количественным спектральным методом (аналитик С.С. Воробьева); ЭПГ (мг/т) – ICP-MS (аналитики В.Н. Власова, В.И. Ложкин), в 8 анализе – сцинтилляционно-эмиссионным методом (аналитик С.И. Прокопчук). * – в сумму анализов 1, 2, 3, 4 входят Cr₂O₃ (0,37; 0,76; 0,50; 0,42), NiO (0,41; 0,49; 1,18; 1,31), CuO (0,14; 0,15; 0,41; 1,01). Прочерк – элементы не определялись.

Аподунитовые серпентиниты и гарцбургиты идарского комплекса характеризуются невысокими концентрациями Al₂O₃, TiO₂, Co, V. Они практически

не содержат Cu или её уровень находится ниже пределов обнаружения, в то время как в ультраосновных породах Кингашского массива количество Cu составляет 1100 - 8200 г/т.

Дуниты и верлиты кингашского комплекса отличаются повышенными концентрациями Al_2O_3 , Na_2O , Cu и пониженными TiO_2 от ультраосновных пород печенгского верлит-габбрового комплекса (Смолькин, 1992).

Средние содержания серы в дунитах и верлитах Кингашского массива варьируют от 1,4 до 2,6, мас. %, что приближается к содержанию серы в хондритах (2,1 %), принятых в качестве среднего для метеоритного вещества (Гриненко, Гриненко, 1974). Значение δS^{34} серы кингашских руд варьирует от -1,4 до +2,0 ‰ (Глотов и др., 2004) и приближается к значениям δS^{34} серы мантийного происхождения (от 0 до 3,0 ‰).

В исследуемых породах Кингашского массива суммарное количество РЗЭ прямо пропорционально концентрации TiO_2 , P_2O_5 , Sc, V, и обратно пропорционально содержанию MgO. Ультраосновные породы имеют отрицательный наклон кривых распределения РЗЭ, нормализованных к хондриту ($PЗЭ_N$). Это обусловлено обогащением лёгкими лантаноидами (LREE) $(La/Yb)_N$ 2,0-3,0 относительно тяжёлых (рис. 10). Отмечается увеличение РЗЭ от дунитов к верлитам, клинопироксенитам и габброидам.

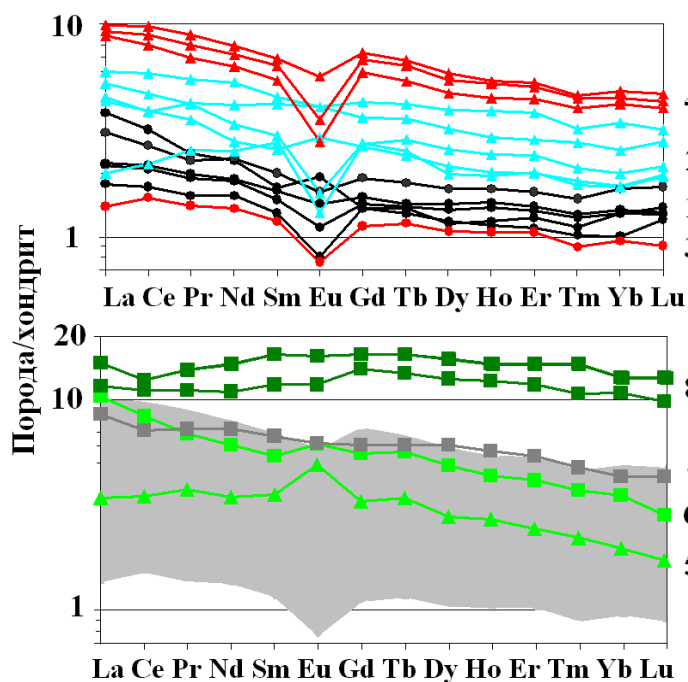


Рис. 10. Спектры редкоземельных элементов в породах и рудах Кингашского массива.

Нормирование выполнено по содержанию РЗЭ в хондрите C1 (Boynnton, 1984). 1 – дуниты и аподунитовые серпентиниты; 2 – верлиты и аповерлитовые серпентиниты; 3-4 – богатые вкрапленные руды с содержанием Ni > 1,0 мас. %: 3 – аподунитовый серпентинит, 4 – аповерлитовые серпентиниты «платиноидного горизонта»; 5 – клинопироксенит, 6 – габбро-амфиболиты, 7 – микрогаббро. Серое поле – дуниты и верлиты.

Низкие количества РЗЭ (4-5 г/т) в богатых рудах (Ni > 1,0 мас. %) дунитов показывают, что образование этих пород происходило на раннемагматической стадии в

результате гравитационной отсадки сульфидов. Богатые руды аповерлитовых серпентинитов «платиноидного горизонта» с высокими концентрациями РЗЭ (20-25 г/т) и повышенными содержаниями TiO_2 , Zr, Y, Nb кристаллизовались на позднемагматическом этапе из остаточных расплавов, насыщенных Cl, F, H_2O , которые способствовали переносу ЭПГ.

Петрографо-минералогические и геохимические данные подтверждают механизм кристаллизационной дифференциации расслоенной серии Кингашского массива из исходного расплава соответствующего пикритам и обогащённого FeO, Al_2O_3 , TiO_2 , РЗЭ. Сходство геохимических трендов распределения петрогенных, рудных элементов и РЗЭ в породах и рудах Кингашского и Верх-

некингашского массивов свидетельствует об образовании их из единого родоначального расплава.

Ультраосновные породы рудоносных массивов Канского блока выделяются повышенными содержаниями TiO_2 (0,1 - 0,7 мас. %), $\Sigma P3Э$ от 4 до 25 г/т, и трендами $P3Э_N$ с отрицательной аномалией Eu . Присутствие значительных концентраций в расплаве Al_2O_3 проявляется в присущей породам кингашского комплекса ассоциации оливина, клинопироксена и амфибола эденит-паргаситового ряда.

Хром является элементом раннемагматической кристаллизации и накапливается в дунитах, где среднее его количество составляет 0,36 мас. %, а основными концентраторами Cr являются плеонасты и хромиты. В верлитах Cr обогащены хромиты и магнетиты, амфиболы. В брекчиево-жилльных рудах обнаружены ферропаргаситы с примесью Cr до 0,18 мас. %. Значения Cr в клинопироксенитах (от 0,25 до 0,5 мас. %) на порядок превышают кларковое содержание, принятое для основных пород. Это связано с большим количеством включений хромшпинелидов в клинопироксенах.

В ультраосновных породах Кингашского месторождения основное количество Ni связано с пентландитами, являющимся главным концентратором Ni среди рудных минералов. Максимальные концентрации Ni (14900 г/т) установлены в аповерлитовых серпентинитах «платиноидного горизонта» с содержанием серы до 3,5 мас. %. В массивных рудах с аналогичными концентрациями Ni содержания сульфидной S достигают 14,5 мас. %. В клинопироксенитах и габбро-амфиболитах снижается уровень Ni (г/т) от 1880 до 448 и от 1200 до 48 соответственно.

Доля Ni в оливинах дунитов составляет 0,27 - 0,34 %, хромшпинелидов – от следов до 0,21 %. В силикатных минералах оливиновых клинопироксенитов определяются лишь следы Ni .

В ультраосновных породах Кингашского массива количество Cu колеблется в широких пределах: от 80 до 6200 г/т в дунитах и от 35 до 8200 г/т в верлитах. В массивных халькопирит-пирротин-кубанитовых рудах концентрации Cu достигают 5,7 мас. %. В клинопироксенитах содержания Cu варьируют от 10 до 3000 г/т, в габбро-амфиболитах – от 15 до 900 г/т.

Минералы кобальта на Кингашском месторождении встречаются довольно редко. Обычно элемент присутствует в виде примеси в рудных минералах. Основное количество Ni , Cu и Co в рудах Кингашского месторождения находится в сульфидной форме, что подтверждается прямой зависимостью содержаний этих элементов от уровня S .

С ультраосновными породами Кингашского массива связаны промышленные концентрации ЭПГ, среди которых наиболее распространёнными являются Pd и Pt . По разрезу скважин, вскрывающих породы северо-западной части массива, содержания Pt и Pd с глубиной возрастают и достигают в дунитах 0,34 г/т Pt , 0,42 г/т Pd . Прямая корреляция содержаний Pt , Pd и Au с количеством Ni и S в ультраосновных породах нарушается повышением уровня Pt , Pd , Au относительно Ni и S в аповерлитовых серпентинитах «платиноидного горизонта».

В дунитах и аподунитовых серпентинитах количество Pt обычно преобладает над Pd , в то время как в аповерлитовых серпентинитах наблюдается обратная картина.

Содержания ЭПГ в породах и рудах Кингашского массива, нормированные к хондриту $C1$, показывают магматический тренд их распределения. Отмечается обеднение тугоплавкими платиноидами (Os , Ir , Ru) относительно легкоплав-

ких (Pt, Pd, Rh) (рис. 11). Уровень платиноидов возрастает от дунитов к верлитам и снижается в габброидах и клинопироксенитах.

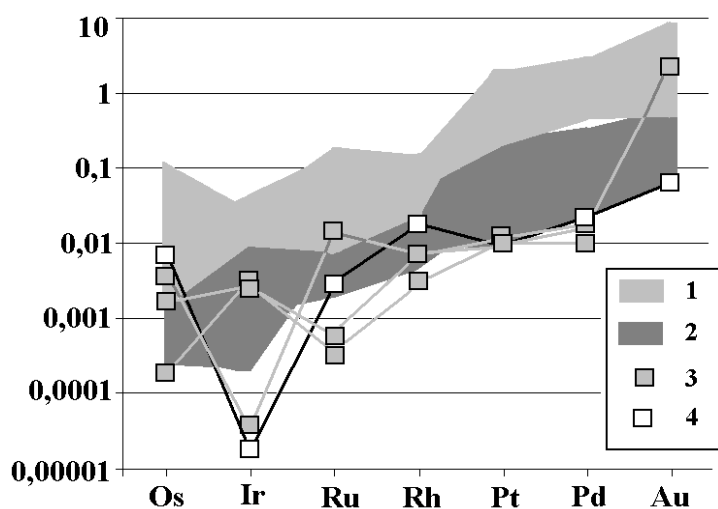


Рис. 11. Содержания благородных металлов в породах, нормированные к хондриту C1 (Naldrett, Duke, 1980). 1-5 – породы Кингашского массива: 1 – верлиты, 2 – дуниты, 3 – пироксениты, 4 – габбро-амфиболиты.

Впервые методом ICP-MS исследовано содержание Re в породах Кингашского массива (см. табл. 1). Брекчиево- жильные руды аповерлитовых серпентинитов наиболее богаты этим элементом (66 мг/т). Рений в ультраосновных породах Кингашского месторождения коррелирует с ЭПГ.

Таким образом, эволюция сульфидного расплава проявляется в увеличении уровня Ni, Cu, Co, ЭПГ, Re, Ag и Au от ранних вкрапленных руд к брекчиево- жильным и массивным рудам, в повышении отношения Pd/Pt в дунитах от 0,15 до 1,9 (среднее 0,6) и в верлитах от 0,1 до 4,2 (среднее 1,5).

Высокое содержание РЗЭ, TiO₂, Zr, Y, Nb в аповерлитовых серпентинитах «платиноидного горизонта», по сравнению с другими ультраосновными породами, свидетельствует, о том, что собственно позднемагматическая стадия является наиболее благоприятной для накопления ЭПГ. Метаморфизм осложняет первичную картину распределения компонентов в рудах, но не стирает закономерности обогащения придонных частей массива Ni, Cu, Pd и Pt.

Геохимическими индикаторами рудоносных гипербазитов Канского блока с платиноидно-медно-никелевой сульфидной минерализацией являются повышенные содержания S (0,2 - 3,8 мас. %), TiO₂ (>0,1 мас. %), Cu (>35 г/т), низкие отношения Ni/Cu (2,8 - 10,5) и повышенные Ti/Cr (90,2 - 2,0), высокая ΣРЗЭ (4 - 25 г/т).

ГЛАВА 5. ГЕНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Исследователями предлагались несколько моделей формирования массива: дифференцированная интрузия (Глазунов, 1995, Глазунов и др., 2003), вулканогенное его происхождение (Корнев, Еханин, 1997), субвулканическое тело (Чернышов и др., 2004; Глотов и др., 2004). Рассматривалось также полихронное становление массива в течение трёх этапов (Гертнер и др., 2009).

Термобарометрические расчёты, полученные в ходе нашего исследования, показывают на различия условий кристаллизации ультраосновных пород и габброидов. Расчётная равновесная температура кристаллизации оливинов и хромшпинелидов (Ballhaus et al., 1991; Перчук, 1977) в дунитах массива определена в пределах 1260 - 1142 °С, в верлитах – 1074 - 1062 °С. Равновесная температура образования оливинов и пироксенов в оливиновых клинопироксенитах варьирует от 908 до 1047 °С. Давление, вычисленное при помощи геобарометра (Nimis, Taylor, 2000) с использованием температур, рассчитанных по клинопироксеновым термометрам Л.Л. Перчука и R.R. Loucks, показало, что формирование верлитов происходило при давлениях 13 - 15 кбар, оливиновых клинопироксенитов – 11- 14 кбар, габбро – 8 кбар. Параметры P-T условий кри-

сталлизации пород массива превышают таковые эпидот-амфиболитовой фации метаморфизма, зафиксированной как в породах массива, так и во вмещающих его породах.

Результаты изотопного исследования по валовым составам ультраосновных пород и ассоциирующего с ними габбро (данные О.М. Глазунова), позволили построить Sm-Nd изохрону, наклон которой соответствует возрасту 1387 ± 40 млн лет ($MSWD = 0,33$, $NdI = 0,511005 \pm 0,000050$). Наклон изохроны габбро-амфиболитов Кингашского массива отвечает возрасту 797 млн лет ($NdI = 0,511609$). Недостаточное количество анализов неизменённых пород Кингашского массива, а также высокая подвижность Sr и Rb под воздействием метаморфических процессов не позволили построить достоверные изохроны в координатах Rb-Sr изотопной системы. Высокие отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0,706013 - 0,707531) и низкие значения ϵNd (2,6 - 3,2) пород соответствуют мантийному компоненту EM-II, формирующемуся при крутопадающей субдукции (Ueda, 1982, Sylvester, 1989), а его изотопные отношения объясняются субдуцированием в мантию терригенных осадков (Dickin, 1995), насыщенных водой, обеспечивающей более низкие степени плавления исходного субстрата.

Таким образом, полученные данные указывают на магматический генезис массива, осложнённый метаморфизмом. Дуниты, верлиты, клинопироксениты и габбро сформировались в результате дифференциации родоначальной магмы феррипикритового состава. Часть габброидов внедрилась с разрывом во времени.

На магматической стадии из ультраосновного расплава в температурном интервале 1400-1000 °С кристаллизуются хромшпинелиды, оливины, клинопироксены. В поздних дифференциатах накапливаются Mn-содержащие ильмениты. Выделение высокомагнезиальных роговых обманок (эденита и паргасита) завершает магматическую стадию. Магнетиты поздних генераций образуются при взаимодействии водного флюида с сульфидной жидкостью.

Одновременно с кристаллизацией основных пороодообразующих силикатов в магматическую стадию происходит сегрегация высокотемпературных Fe-Ni сульфидов (пирротина и пентландита), которые в виде сфероидальных расслоенных сульфидных капель обнаружены в силикатной матрице. Этому процессу способствует присутствие в расплаве S, P и летучих компонентов (F, H₂O, Cl, V). Сульфидная жидкость, заполняя интерстиции между ранее образованными кристаллами силикатных минералов, формирует ранние вкрапленные пентландит-пирротиновые руды в температурном интервале 1000-600 °С (Колонин, Сняжкова, 2005). Концентрация сульфидных капель в придонной части массива при участии механизма ликвации и под действием силы гравитации приводит к появлению густо вкрапленных богатых руд. Брекчиево-жильные пентландит-халькопирит-кубанит-пирротиновые руды, обогащённые ЭПГ формировались в эпимагматический этап, когда сульфидная жидкость интродировала в ослабленные зоны. Массивные руды кристаллизовались совместно с ферропаргаситами.

«Платиноидные горизонты» Кингашского массива являются поздними дифференциатами расплава, что подтверждается высокими содержаниями в них РЗЭ. Срастание апатитов с сульфидами указывает на одновременную их кристаллизацию. Присутствие ильменита с высокими концентрациями Mn (3,2 - 3,8 мас. %) в этих горизонтах подтверждает относительно низкотемпературные условия их формирования на заключительных этапах магматического процесса. Наличие в этих горизонтах большого количества водосодержащих минералов,

таких как роговые обманки и апатиты, указывает на присутствие в остаточном расплаве флюидных компонентов (Cl, F, P), которые по экспериментальным данным (Boudreau, 2002) способствуют отложению ЭПГ. А.А. Маракушев (2005) считает, что концентрирование легкоплавких платиноидов происходит в хромититовых и сульфидных расплавах при ощелачивании базит-гипербазитовых магм. Существует точка зрения о пневматолитовом генезисе минералов платиновых групп в сульфидных медно-никелевых рудах (Рябов и др., 1982).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённых исследований были получены новые минералогические и геохимические данные, анализ и обобщение которых позволили сделать следующие выводы.

Изотопные и термобарометрические данные подтвердили многоэтапное становление массива и позволили определить геодинамические условия образования ультраосновного расплава. Его внедрение отвечает возрастному рубежу 1387 ± 40 млн лет. В результате кристаллизационной дифференциации сформировалась расслоенная серия массива, представленная дунитами ($T \sim 1260 - 1140$ °C, $P \sim 14$ кбар), верлитами ($T \sim 1100 - 1160$ °C, $P \sim 14$ кбар), оливиновыми клинопироксенитами ($T \sim 980 - 1050$ °C, $P \sim 11 - 14$ кбар), клинопироксенитами и габбро. Установленные параметры температуры и давления кристаллизации пород, характерны для абиссальных условий образования интрузий. Часть габброидов внедрилась с разрывом во времени, и их кристаллизация происходила при $T \sim 990$ °C и $P \sim 8$ кбар.

Высокие изотопные отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,7060-0,7066$, и низкие значения $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0,5125-0,5130$, ϵNd (2,6 - 3,8) пород Кингашского массива соответствуют мантийному компоненту EM-II, формирующемуся при крутопадающей субдукции.

Сульфидная минерализация пространственно связана со всеми породами массива, но промышленные количества Ni, Cu, ЭПГ установлены только в ультраосновных разновидностях. Выявлено два типа руд по времени их образования: сингенетический (вкрапленные и густо вкрапленные) и эпигенетический (брекчиево-жильные и массивные). Основная доля никеля, меди, кобальта и платиноидов входит в сульфидные вкрапленные руды халькопирит-пирротин-пентландитового типа. Богатые вкрапленные руды образовались на раннемагматической стадии, как продукт жидкостной несмесимости и гравитационной отсадки (густо вкрапленные пентландит-пирротиновые руды, с подчинённым количеством железистого халькопирита) и на позднемагматической стадии, при участии остаточного расплава, насыщенного Cl, F, H₂O, которые способствовали переносу и сегрегации платиноидов (вкрапленные халькопирит-пентландит-пирротиновые руды «платиноидного горизонта» с МПГ). Эпигенетическая стадия завершилась формированием брекчиево-жильных (кубанит-халькопирит-пентландит-пирротиновый состав, МПГ) и массивных руд (кубанит-пентландит-халькопирит-пирротиновый состав).

Геохимическая зональность массива проявляется в чередовании бедных, рядовых и богатых руд с концентрированием Ni, Cu, Co и благородных металлов в придонной, северо-западной части месторождения и выражается сменой минеральных парагенезисов: преимущественно пентландит-пирротинового в дунитах и халькопирит-пирротин-пентландитового в верлитах. Как показывает сравнительный анализ сингенетических и эпигенетических руд, эволюция

сульфидного расплава приводит к повышению количества Ni, Cu, Co, ЭПГ, Re, Ag и Au от ранних вкрапленных руд к брекчиево-жильным и массивным рудам, увеличению отношения Pd/Pt в дунитах (до 1,9) и в верлитах (до 4,2).

Присутствие в составе руд, кроме Ni, Cu, Co, ЭПГ, также Au, Ag, Cr, Ti, Sc и V открывает перспективы использования комплексного подхода при разработке руд месторождений кингашского типа. Рекомендуются выявить масштаб распространения элемента Re, ценного по значению в электронной промышленности.

Сравнение минералого-геохимического состава ультраосновных пород Канского блока позволило выделить критерии рудоносности гипербазитов кингашского комплекса относительно идарского: повышенные содержания $TiO_2 > 0,1$ мас. % ($< 0,02$ мас. %); $Cu > 35$ г/т (< 20 г/т); $\Sigma P3Э - 4 - 25$ г/т ($< 5,6$ г/т в) с отрицательной Eu аномалией; низкое $Ni/Cu - 2,8 - 10,5$ (105) отношение при широких вариациях концентраций Ni и высокое $Ti/Cr - 0,2 - 2,0$ (0,1) отношение. Руды «платиноидного горизонта» характеризуются аномальным уровнем ЭПГ, Ni, Cu, Au, P3Э, парагенезисом висмута-теллуридов палладия, высоконикелистого пентландита, высокосернистого пирротина с пламеневидными ламеллями троилита.

Основные публикации по теме диссертации

В изданиях, рекомендованных ВАК:

1. **Радомская Т.А.**, Глазунов О.М. Редкоэлементный состав пород и руд платиноидно-медно-никелевых месторождений кингашского типа // Геология, поиски и разведка рудных месторождений. Известия Сиб. отд-ния секции наук о Земле РАЕН. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2009. – С. 37-42.
2. Глазунов О.М., **Радомская Т.А.**, Геохимическая модель генезиса Кингашского платиноидно-медно-никелевого месторождения // ДАН. 2010. Т. 430. № 2. С. 222-226.

В других изданиях:

3. **Радомская Т.А.** Особенности распределения рудных элементов в зоне контакта габбро и перидотитов Кингашского платиноидно-медно-никелевого месторождения (Восточный Саян) // Строение литосферы и геодинамика. Материалы XX Всеросс. молодежной конференции. - Иркутск: ИЗК СО РАН, 2003. – С. 166 - 167.
4. Глазунов О.М., Еханин А.Г., Богнибов В.И., **Радомская Т.А.** Проблема концентрации рудных компонентов на Кингашском платиноидно-медно-никелевом месторождении // Состояние и проблемы геологического изучения недр и развития минерально-сырьевой базы Красноярского края. Материалы докладов научно-практич. конференции, посвящ. 60-летию Красноярской геологии (1943 - 2003 гг.). – Красноярск: Изд-во КНИИГиМС, 2003. – С. 189 - 202.
5. Глазунов О.М., **Радомская Т.А.** Геохимия благородных элементов и никеля в Кингашском месторождении // Геология, поиски и разведка полезных ископаемых и методы геологических исследований. Сборник избр. трудов научно-технич. конференции ИрГТУ. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2003. – С.104 - 108.
6. Глазунов О.М., **Радомская Т.А.**, Суворова Л.Ф., Прокопчук С.И. Парагенетические ряды рудных минералов на разных этапах генезиса Кингашского платиноидно-медно-никелевого месторождения Восточного Саяна // Геология, поиски и разведка полезных ископаемых и методы геологических исследований. Сборник избр. трудов научно-технич. конференции. Вып. 4. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2004. – С. 209 - 213.
7. **Радомская Т.А.** Минералогическая зональность на Кингашском платиноидно-медно-никелевом месторождении // Современные проблемы геохимии. Материалы науч. конференции молодых ученых ИНЦ СО РАН. – Иркутск: Изд-во ин-та географии СО РАН, 2004. – С. 33 - 35.
8. Глазунов О. М., **Радомская Т.А.**, Прокопчук С.И. Эволюция состава платиноидно-никелевых плутонов в архейских зеленокаменных поясах // Ультрамафит-мафитовые комплексы складчатых областей докембрия. Материалы Междунар. конференции. – Улан-

Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2005. – С. 150 - 152.

9. **Радомская Т.А.**, Глазунов О.М., Прокопчук С.И. Форма нахождения платиноидов в рудах Кингашского месторождения // Ультрабазит-базитовые комплексы складчатых областей. Материалы междунар. конференции – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2007. – С 420 - 425.

10. Глазунов О. М., Глазунова Т. Л., **Радомская Т.А.** Геолого-геохимическая модель Кингашского рудного поля в Саянской никель-платиноносной провинции // Месторождения природного и техногенного сырья: геология, геохимия, геохимические и геофизические методы поиска, экологическая геология. Материалы Междунар. конференции. – Воронеж: Изд-во Воронежпечать, 2008. – С. 65 - 68.

11. **Радомская Т.А.** Физико-химические условия образования Pt-Cu-Ni месторождений кингашского типа // Третья междунар. конференция «Ультрабазит-базитовые комплексы складчатых областей и связанные с ними месторождения». – Качканар, 2009. – С. 138 - 141.

12. **Радомская Т.А.** Геохимические особенности ультрабазит-базитовых комплексов Канского блока (В.Саян) // Современные проблемы геохимии. Материалы конференции молодых учёных. – Иркутск: Изд-во Ин-та географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2011. – С. 83 - 87.

13. Глазунов О.М., Салаев А.В., **Радомская Т.А.** Эволюция состава и рудоносности ультрабазитов из гнейсовых террейнов южного обрамления Сибирской платформы // Материалы Всеросс. конференции, посвящ. 100-летию со дня рожд. чл.-корр. АН СССР М.М. Одинцова, (тезисы докладов). – Иркутск: Петрографика, 2011. – С.47 - 49.

14. Глазунов О.М., **Радомская Т.А.**, Глазунова Т.Л. Глубинные источники и эволюция платиноидно-медно-никелевого парагенезиса Кингашского рудного поля (КРП) // Платина России. Сборник науч. трудов. Т. VII. / Гл. ред. чл.-корр. РАН Д.А. Додин. – Красноярск. 2011, – С. 448 - 457.