

На правах рукописи

БЕНЕДЮК Юрий Петрович

**ГЕОХИМИЯ И ЭВОЛЮЦИЯ СОСТАВА ХРОМШПИНЕЛИДОВ
УЛЬТРАБАЗИТОВ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ВОСТОЧНОГО САЯНА**

Специальность 25.00.09 – геохимия, геохимические методы поисков
полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-
минералогических наук

Иркутск – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук.

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

Официальные оппоненты: доктор геолого-минералогических наук,
профессор Чернышов Алексей Иванович,
НИ ТГУ, г. Томск

кандидат геолого-минералогических наук,
заместитель директора
Меньшагин Юрий Витальевич,
ИЗК СО РАН, г. Иркутск

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Геологический институт
Сибирского отделения Российской академии
наук, г. Улан-Удэ

Защита состоится 17 июня 2013 года в 13³⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 003.059.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 664033, 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 13 мая 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
К. Г.-М. Н.

Г.П. Королёва

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследований. Базит-ультрабазитовые комплексы играют индикаторную роль при реконструкции геодинамических режимов образования литосферы Земли (Добрецов и др., 2001; Pearce, 2008) и представляют интерес как потенциальные источники полезных ископаемых – сульфидных платиноидно-медно-никелевых (Генкин и др., 1981; Налдретт, 2003), хромитовых (Павлов и др., 1968) и оксидных титан-ванадиевых руд (Кратц, 1957). Однако эти породы нестабильны в коровых условиях и почти всегда подвержены воздействию различных метаморфических и метасоматических процессов. Восстанавливать их природу приходится либо по реликтовым парагенезисам, либо по полностью измененным породам. С этой точки зрения наиболее информативными петрологическими индикаторами являются акцессорные минералы и, в частности, минералы группы шпинели. Их состав характеризуется довольно широким изоморфизмом и реагирует на изменения физико-химических параметров эволюционирующего магматического расплава, в том числе на отделение рудной жидкости, а также отражает характер субсолидусных преобразований и различных метаморфических изменений закристаллизовавшихся пород (Плаксенко, 1989; Barnes, Roeder, 2001; и др.).

Несмотря на то что химические особенности минералов группы шпинели в основных-ультраосновных породах исследуются уже на протяжении нескольких десятилетий (Irvine, 1965; Павлов и др., 1968; Barnes, 1998; Чашухин и др., 2007 и др.), их изучение по-прежнему актуально.

Цель и задачи работы. Целью работы является выяснение условий формирования дунит-верлит-плагיוверлитовых массивов центральной части Восточного Саяна и выявление критериев их рудоносности (Cu, Ni, ЭПГ) на основе комплексного изучения эволюции состава хромшпинелидов.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- 1) исследования морфологии зёрен хромшпинелидов;
- 2) изучение химического состава хромшпинелидов (петрогенных и редких элементов);
- 3) изучение распределения компонентов в пределах зёрен хромшпинелидов;
- 4) анализ расплавных микровключений в хромшпинелидах.

Научная новизна работы. Впервые проведено детальное изучение состава хромшпинелидов в ультрабазитах центральной части Восточного Саяна.

Выявлена магматическая и метаморфическая зональность в хромшпинелидах. Показаны различия состава хромшпинелидов дунит-верлит-плагиоверлитового и дунит-гарцбургитового формационных типов. На основе изучения состава расплавных включений в хромшпинелидах получен состав родоначального расплава и температуры кристаллизации минералов.

Практическая значимость работы. Данные, полученные на основе изучения химического состава хромшпинелидов, могут быть использованы для разделения ультрабазитов по формационной принадлежности, что важно при геологическом картировании для отнесения их к тому или иному магматическому комплексу.

Результаты проведённых исследований явились основанием для выделения критериев потенциальной рудоносности ультрабазитов региона, позволяющих разбраковывать массивы по металлогенической специализации.

Результаты работы предполагается внедрять в виде методических рекомендаций при поисковых работах.

Фактический материал и методы исследований. В качестве объектов исследования выбраны хромшпинелиды ультрабазитовых массивов, перспективных на сульфидное медно-никелевое оруденение с платиноидами (центральная часть Восточного Саяна).

В основу работы положен материал, собранный автором в ходе полевых работ 2008–2010 гг. На основе отобранного материала изучено около 300 шлифов и аншлифов, выполнено более 100 микронзондовых определений состава хромшпинелидов, выделены монофракции хромшпинелидов из 45 проб для изучения на микронзонде и исследования расплавных включений.

Состав хромшпинелидов определялся в Институте геохимии СО РАН с применением рентгеноспектрального микроанализа (аналитик – к.х.н. Л.А. Павлова) на электронно-зондовом анализаторе JXA-8200 (пределы обнаружения компонентов: 0.01–0.03 мас. %). В образцах с низкими содержаниями никеля и цинка увеличивалось время экспозиции анализа. Включения были изучены на электронно-зондовом анализаторе Camebax-Micro и электронном сканирующем микроскопе LEO 1430 VP (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск); пределы обнаружения компонентов, соответственно, 0.01–0.03 мас. % и 0.1–0.25 мас. %.

Экспериментальные исследования расплавных включений в хромшпинелидах проводились в лаборатории геодинамики и магматизма ИГМ СО РАН по

методике экспериментов д.г.-м.н. В.А. Симонова (Симонов и др., 2009а; Симонов и др., 2011).

Моделирование условий кристаллизации минералов проводилось с помощью программного обеспечения Petrolog III (Плечов, Данюшевский, 2006).

Защищаемые положения:

1. Различия химического состава хромшпинелидов рассматриваемых ультрабазитов объясняются их кристаллизацией на разных стадиях магматического процесса, реакциями хромшпинелидов с интеркумулусной жидкостью и первичными силикатами, а также метаморфическими преобразованиями пород. В ходе эволюции шпинели от ранней к поздней генерации состав изменялся сначала в сторону хромистых и магнезиальных, а затем железистых и титанистых разновидностей.

2. Родоначальным для пород рассматриваемых массивов являлся пикритовый расплав нормальной щелочности. Установлены следующие интервалы температур кристаллизации минералов при заданном давлении 4 кбар: хромшпинелид I генерации – 1310–1280 °С, оливин – 1290–1230 °С, клинопироксен – 1250–1230 °С, плагиоклаз – 1220–1190 °С.

3. Присутствие сульфидных включений, магматическая зональность хромшпинелидов и особенности химического состава, проявленные в характерном тренде эволюции Cr, Al и Fe³⁺, высоком содержании TiO₂ (>0.5 мас. %), типичных для дунит-верлит-плагиоверлитового формационного типа концентрациях MnO (0.16–0.70 мас. %) и ZnO (0.07–0.53 мас. %) являются критериями потенциальной рудоносности ультрабазитов на сульфидное платиноидно-медно-никелевое оруденение.

Публикации и апробация работы. По теме диссертации опубликовано 9 работ, в том числе две работы в журналах из перечня ведущих периодических изданий ВАК. Результаты исследований были представлены на всероссийских и международных конференциях в городах: Иркутск, Томск, Новосибирск и Екатеринбург.

Работа выполнена при финансовой поддержке интеграционного проекта ОНЗ-2 РАН, Совета по грантам Президента (НШ-6153.2012.5).

Структура и объём работы. Работа состоит из введения, пяти глав и заключения. Объём работы – 130 страниц, включающих 57 рисунков и 8 таблиц. Список литературы состоит из 142 наименований.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю – к.г.-м.н. А.С. Мехоношину, проявлявшему постоянное внимание и поддержку на всех этапах подготовки диссертационной работы. Искреннюю признательность автор выражает к.г.-м.н. Т.Б. Колотилиной и А.А. Дорошкову, общение с которыми способствовало формированию взглядов автора в исследуемой области.

Особую благодарность автор выражает д.г.-м.н. В.А. Симонову за проведение высокотемпературных экспериментов по изучению расплавных включений в хромшпинелидах. За содействие в проведении полевых работ и обсуждение результатов автор признателен вице-президенту ООО «Интергео» А.Н. Стехину, а также сотрудникам ООО «ГПП – Геологическая компания» в лице директора Ю.Н. Киселёва и старшего геолога А.П. Салманова. За обсуждение фактического материала, консультации и ценные советы автор благодарен д.г.-м.н. М.А. Горновой, д.г.-м.н. А.Я. Медведеву, д.г.-м.н. В.Е. Загорскому, д.г.-м.н. О.М. Глазунову, д.г.-м.н. А.Э. Изоху, к.г.-м.н. М.Ю. Подлипскому, к.г.-м.н. С.И. Дрилю, д.г.-м.н. Д.А. Орсоеву, д.г.-м.н. Н.Д. Толстых, к.г.-м.н. А.Г. Полозову, Г.В. Бурмакиной, В.А. Беляеву. Особую благодарность автор выражает к.х.н. Л.А. Павловой, к.х.н. Т.С. Айсуевой, д.т.н. И.Е. Васильевой, Т.В. Ожогойной, а также другим сотрудникам аналитических служб ИГХ СО РАН и ИГМ СО РАН (г. Новосибирск), участвовавшим в проведении лабораторных исследований.

ГЛАВА 1. ОБЗОР РАНЕЕ ПРОВЕДЁННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ИЗУЧЕНИЮ ХРОМШПИНЕЛИДОВ

В первой главе приводится краткая история исследования акцессорных минералов, начиная с первого их описания А. Броньяром (Brongniart, 1827), до исследований XX в. (Ляхович, 1979; и др.). Также в главе рассматриваются общие сведения о минералах группы шпинели, включающие описание их структуры и таких индикаторных признаков, как облик и габитус кристаллов, состав, особенности внутреннего строения, наличие включений и степень изменения зёрен в процессе метаморфизма.

Обзор ранее проведённых исследований по изучению состава хромшпинелидов продемонстрировал возможность их использования для выяснения условий образования и эволюции ультраосновных расплавов. Перспективными направлениями в исследовании акцессорных хромшпинелидов являются изуче-

ние химического состава (в т.ч. содержание редких элементов), расплавленных включений, а также использование хромшпинелидов в качестве геотермометра.

ГЛАВА 2. ГЕОЛОГО-ПЕТРОГРАФИЧЕСКИЕ И МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МАССИВОВ УЛЬТРАБАЗИТОВ

Изучение хромшпинелидов проводилось в ультрабазитовых массивах, расположенных в центральной части Восточного Саяна, в пределах Алхадырского террейна. Террейн ограничен глубинными разломами: на северо-востоке – Бирюсинским, на юго-западе – Главным Саянским (рис. 1). На северо-западе он перекрывается отложениями чехла Сибирского кратона.

Регион имеет длительную историю исследования и изучен довольно де-

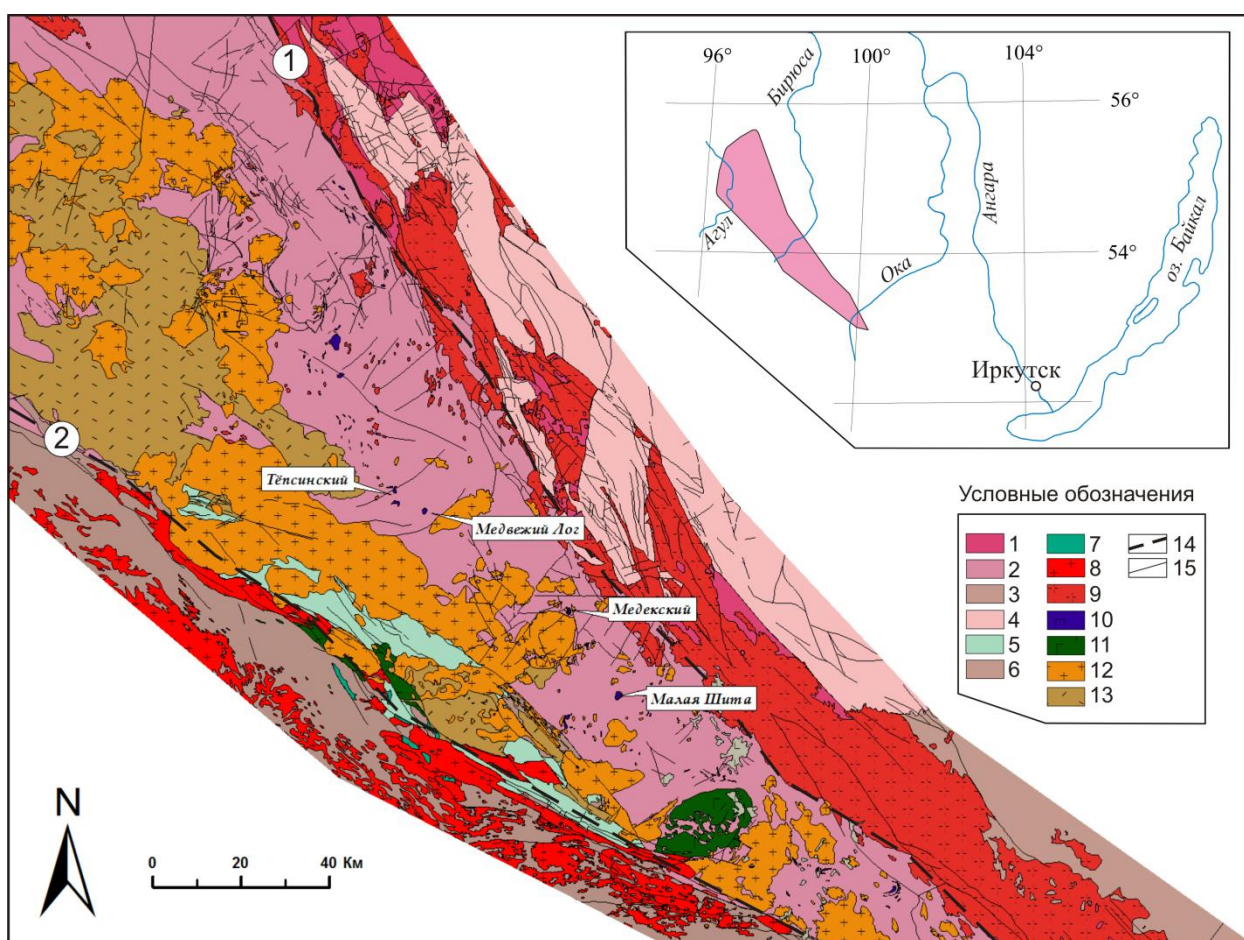


Рис. 1. Положение массивов в пределах Алхадырского террейна.

1–6 – метаморфизованные первично-осадочные образования (PR); 7–14 – магматические образования (7 – урдаокинский комплекс метагаббро, ортоамфиболитов (PR₁), 8 – дербинский комплекс гранитоидов (PR_{2,3}), 9 – саянский комплекс гранитоидов (PR₁), 10 – барбитайский и идарский комплексы дунитов, перидотитов (PR), 11 – нижнекоровые блоки высокометаморфизованных пород (PR_{2,3}), 12 – огнитский комплекс гранитов, сиенитов, диоритов (O), 13 – нерхинский комплекс трахибазальтов, андезито-базальтов (D_{1,2}), 14 – зоны глубинных разломов (цифры в кружках: 1 – Бирюсинский, 2 – Главный Саянский), 15 – разрывные нарушения. Карта составлена А.С. Мехоношиным, Т.Б. Колотилиной, А.А. Дорошковым по материалам Государственной геологической съёмки масштаба 1:200000.

тально (Дибров, 1964; Рассказчиков, 1971; Сизых, Шафеев, 1976; Широбоков, Сезько, 1979; Галимова, Бормоткина, 1983; Мехоношин, 1986). Основной чертой его строения является коллаж чешуйчато-блоковых структур, где на одном эрозионном срезе наблюдаются блоки гнейсов, мраморов, кварцитов, амфиболитов и сланцев, метаморфизованных в различных условиях. Температуры метаморфизма пород, залегающих в соседних блоках, могут варьировать от 540 до 820 °С (Мехоношин и др., 2012). Возраст амфиболитового метаморфизма пород по данным $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ и U-Pb датирования составляет 600 млн лет (Мехоношин и др., 2006).

В пределах Алхадырского террейна выделяются следующие формационные типы базит-ультрабазитовых комплексов (Мехоношин, Колотилина, 2009): 1) анортозит-пироксенит-габбровый, 2) долеритовый, 3) дунит-верлит-плагиоверлитовый, 4) дунит-гарцбургитовый.

К дунит-верлит-плагиоверлитовому типу относится большинство интрузий ультраосновного состава. Породы представлены основными и ультраосновными разностями. Возраст пород по данным U-Pb датирования оценивается в 712 ± 6 млн лет (Поляков и др., 2013). Массивы ультрабазитов разорваны на отдельные блоки в связи с многократными проявлениями пликативных и дизъюнктивных деформаций. В настоящее время они представляют собой будины, частично разлинзованные и рассланцованные, сохранившие свои первичные черты лишь в наиболее крупных телах. С ультрамафитами данного комплекса связано сульфидное медно-никелевое оруденение с платиноидами. Рассматриваемые в работе массивы этого типа (Медекский, Медвежий Лог и Малая Шита) представлены дифференцированной серией пород от дунитов и верлитов, до плагиоверлитов, реже оливинных меланогаббро. Массивы имеют изометричную, либо слегка вытянутую в одном направлении форму и близкие размеры ($\sim 2 \text{ км}^2$).

Породы дунит-гарцбургитовой формации слагают большое количество мелких будинообразных тел, представленных реститовыми дунитами и гарцбургитами, иногда полностью серпентинизированными. Массивы являются фрагментами офиолитового пояса и свидетельствуют о существовании океанической коры в данном регионе. Породы дунит-гарцбургитовой формации отличаются от разностей дунит-верлит-плагиоверлитового типа преобладанием мелкозернистой микроструктуры и низкими содержаниями титана, алюминия и

щелочей. К массивам, сложенным породами данного формационного типа, относятся Ёнза (5.5 км²), Тёпса (0.5 км²) и др.

ГЛАВА 3. ОСОБЕННОСТИ СОСТАВА ХРОМШПИНЕЛИДОВ

Основными факторами, отвечающими за состав хромшпинелидов, являются состав родоначального расплава и термодинамические параметры его кристаллизации (Kumar et al., 2005).

Хромшпинелиды встречаются во всех петрографических разновидностях пород, слагающих исследуемые массивы. Содержание хромшпинелидов в породах массивов достигает 5 %. В зависимости от формы выделения и характера взаимоотношений с породообразующими минералами выявлено три генерации хромшпинелидов (Бенедюк и др., 2010) (рис. 2): I – наиболее ранние округлые включения в оливине (0.05–0.25 мм); II – более поздние идиоморфные зёрна в интерстициях породообразующих минералов (0.25–0.5 мм); III – наиболее

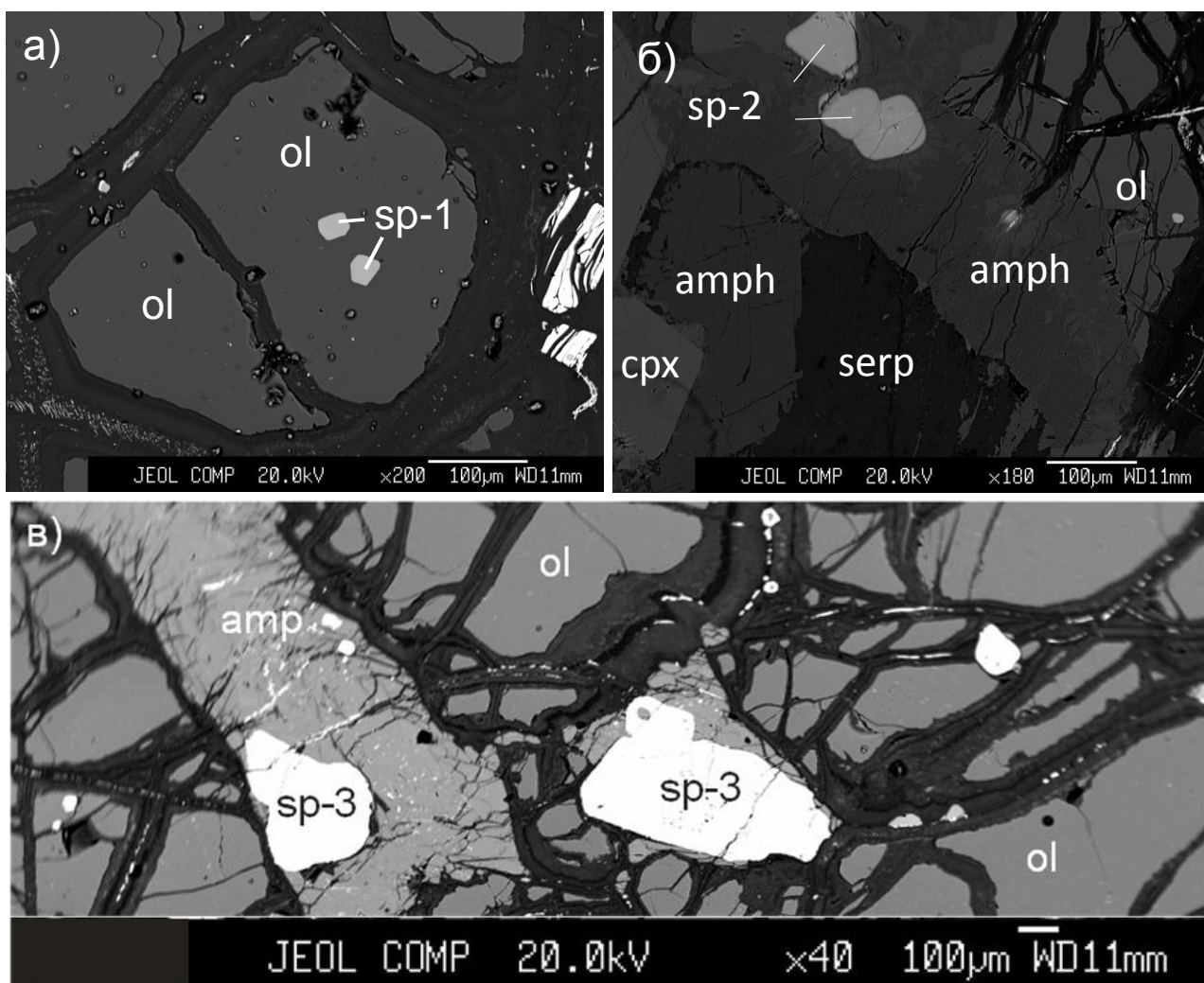


Рис. 2. Морфологические типы хромшпинелидов.

а) включения в оливине, б) интерстиционные октаэдрической формы, в) интерстиционные неправильной формы. sp – хромшпинелид, ol – оливин, срх – клинопироксен, amph – амфибол, серп – серпентин. Снимки в обратно рассеянных электронах.

поздние ксеноморфные образования в интерстициях силикатов (до 1 мм).

Выявленные типы хромшпинелидов имеют следующие особенности химического состава: а) высокая глинозёмистость хромшпинелидов-I по сравнению с разностями более поздних генераций; б) увеличение значений магнетизма в ходе эволюции от I ко II генерации шпинели при уменьшении данного коэффициента от хромшпинелидов-II к хромшпинелидам-III; в) повышение содержания MnO в ходе эволюции шпинели от ранних к поздним генерациям; г) широкие вариации хрома, никеля, титана и алюминия в хромшпинелидах III генерации по сравнению с разностями ранних генераций.

Наиболее вероятной причиной высокого содержания алюминия в хромшпинелидах-I является их кристаллизация в условиях повышенного давления (Fisk, Vence, 1980), что могло быть реализовано в докамерную стадию. Тогда, вероятно, кристаллизация хромшпинелидов I генерации началась уже в подводном канале, а разностей II и III генераций – в магматической камере. Таким образом, понижение давления в магматической камере по сравнению с подводным каналом способствовало уменьшению содержания алюминия и повышению хрома в хромшпинелидах II и III генерации.

Увеличение содержания магния, наблюдаемое в хромшпинелидах-II и части хромшпинелидов-III по сравнению с разностями I генерации (рис. 3 в), противоречит нормальному поведению этого компонента в магматическом процессе (Смит, 1968). Такое необычное поведение магния может быть связано с кристаллизацией этих хромшпинелидов значительно выше дна магматической камеры. Тогда при осаждении они испытывали возрастающее давление, а увеличение температуры плавления при этом способствовало обогащению хромшпинелида магнием в результате реакции с расплавом (Cameron, 1975).

Среди хромшпинелидов III генерации выделяются две группы, существенно отличающиеся по составу. Хромшпинелиды первой группы имеют состав схожий с разностями II генерации. Для них характерны наибольшие содержания Al_2O_3 и значения Mg#, наименьшие содержания TiO_2 , MnO и NiO (рис. 3). Эти шпинели, по всей видимости, кристаллизовались из расплава, существовавшего на момент кристаллизации шпинели II генерации. В хромшпинелидах второй группы существенно снижаются содержания Al_2O_3 и значения Mg#, растут TiO_2 , Fe_2O_3 и MnO. Такое резкое изменение содержания алюминия разностей второй группы поздней генерации хромшпинелидов может отражать изменение состава расплава в результате кристаллизации плагиоклаза (Смит,

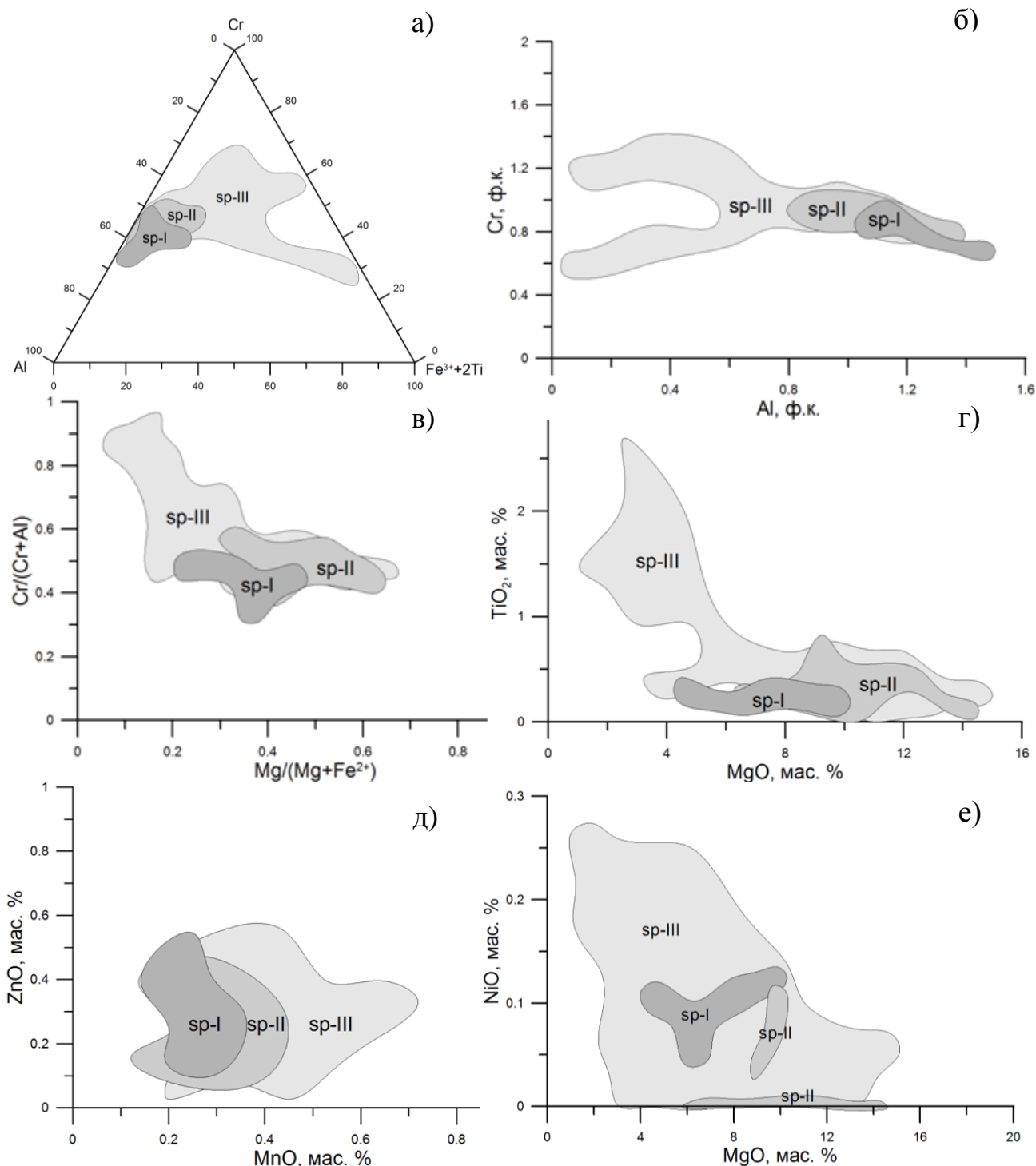


Рис. 3. Эволюция состава хромшпинелидов от ранней генерации к поздней.

1968). Вероятнее всего, кристаллизация хромшпинелидов-I, -II и части хромшпинелидов III генерации предшествовала кристаллизации плагиоклаза, а высокотитанистых и низкоглинозёмистых хромшпинелидов III генерации имела место после кристаллизации плагиоклаза.

Рост содержаний окисного железа и титана при уменьшении концентраций хрома и алюминия, находящий отражение в составе части хромшпинелидов поздней генерации (рис. 3 а), вероятно, характеризует понижение температуры

в магматической камере, т. к. состав гомогенных вкрапленников хромшпинелидов с понижением температуры меняется в сторону увеличения содержания FeO, Fe₂O₃, TiO₂ и уменьшения Cr₂O₃ и Al₂O₃, что согласуется с общей эволюцией химизма базальтового расплава в процессе его кристаллизации (Нерадовский, Смолькин, 1977).

Сравнительно невысокие содержания никеля в хромшпинелидах (рис. 3е), с одной стороны, могут свидетельствовать об их кристаллизации из обеднённой никелем магмы, что может быть связано с удалением сульфидной жидкости в процессе ликвации магмы до начала кристаллизации хромшпинелидов. С другой стороны, содержание никеля в хромшпинелидах существенно понижается в результате взаимодействия и переуравновешивания с железоникелевыми магматическими сульфидами во время остывания и кристаллизации благодаря переходу никеля из хромшпинелида в сульфид (Barnes, Kunilov, 2000). Более высокие концентрации никеля поздней генерации шпинелидов можно объяснить вхождением части никеля в состав хромшпинелида в процессе серпентинизации оливина. Широкий разброс содержаний NiO (от <0.05 до ~0.3 мас. %) может быть связан с ростом других интеркумулусных фаз, таких как пироксен и плагиоклаз, которые изолируют шпинелид от дальнейшего взаимодействия с сульфидами (Barnes, Kunilov, 2000).

Зональность хромшпинелидов

По характеру распределения компонентов среди интерстиционных хромшпинелидов выявлены однородные и зональные разности (рис. 4). В обратно рассеянных электронах зональность можно наблюдать в виде узкой каймы по периметру зерна (рис. 4 б–г), отличающейся в зависимости от состава более тёмной или светлой окраской.

На основе изучения зональных разностей хромшпинелидов исследуемых массивов выявлено три типа геохимической зональности со следующими вариациями состава от центра к краю зёрен:

I. Увеличение отношения Cr/(Cr+Al), уменьшение Mg/(Mg+Fe²⁺) при повышении содержания MnO и понижении ZnO (рис. 4 б). Большинство зёрен с такой зональностью обнаружено в Медекском массиве, единичные примеры слабозональных индивидов отмечаются в массиве Малая Шита.

II. Уменьшение отношения Cr/(Cr+Al), увеличение Mg/(Mg+Fe²⁺) при понижении содержания MnO и повышении ZnO (рис. 4 в). По характеру распределения компонентов данный тип зональности полностью противоположен

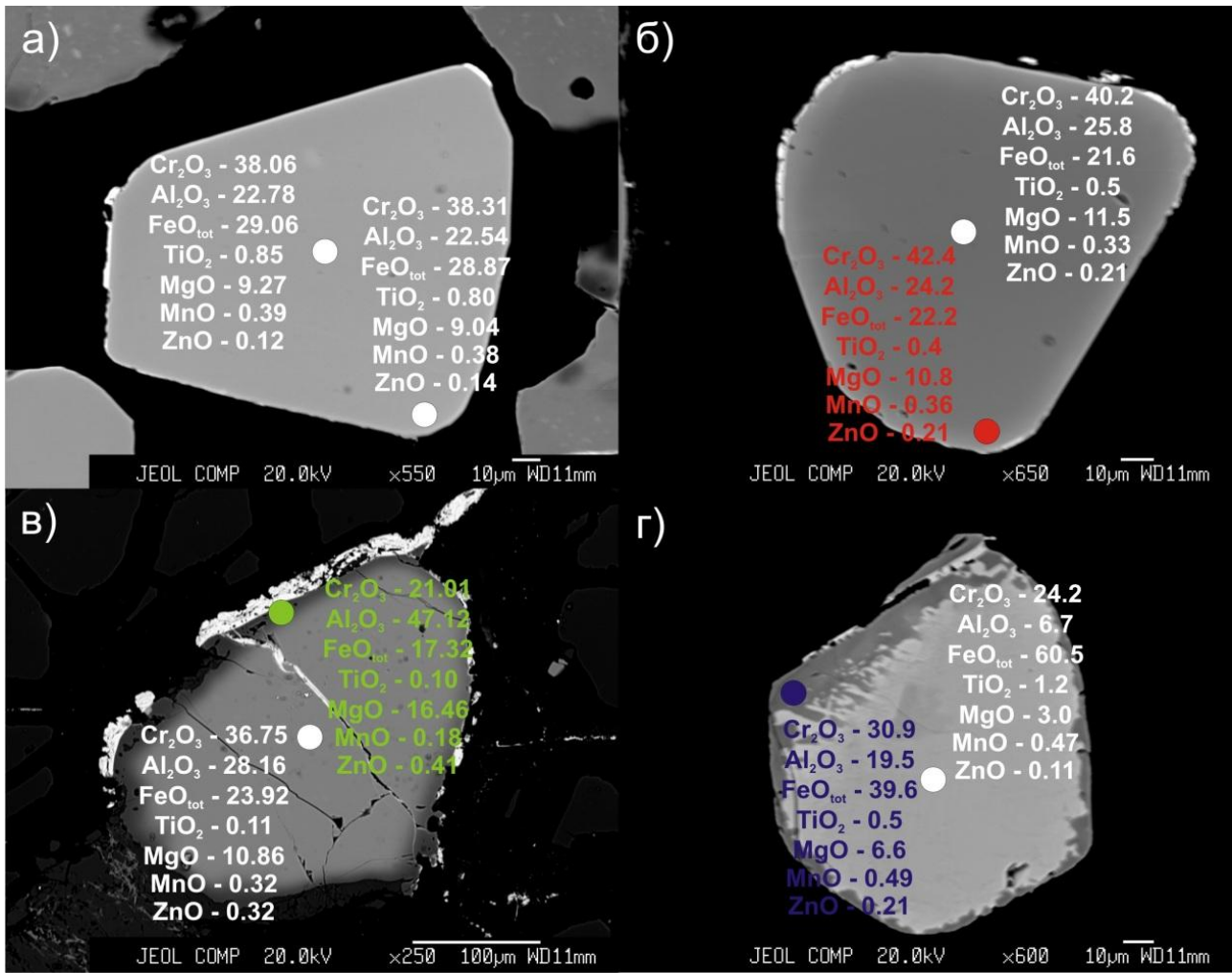


Рис. 4. Распределение компонентов в хромшпинелидах.

а) гомогенное зерно, б) зональность I типа, в) зональность II типа, г) зональность III типа. Снимки в обратно рассеянных электронах.

предыдущему. Зональность этого типа обнаружена только в зёрнах массива Медвежий Лог.

III. Повышение отношения Cr/(Cr+Al), понижение Mg/(Mg+Fe²⁺) при росте суммы Fe³⁺ и Ti, увеличении ZnO и MnO (рис. 4 г). Этот тип зональности обнаружен в единичной пробе массива Медвежий Лог.

Вероятно, обогащение внешних участков зёрен хромшпинелидов FeO и обеднение Al₂O₃ за счёт MgO и Cr₂O₃ (I тип зональности) обусловлено реакцией кумулюсного шпинелида с захваченной интеркумулюсной жидкостью (Плаксенко, 1989). А обогащение MgO и Al₂O₃ (II тип зональности) связано с посткумулюсными реакциями шпинелидов с первичными силикатами. Магматическую природу зональности I типа подтверждает присутствие в породах гомогенных хромшпинелидов, аналогичных по составу, как ядрам, так и оторочкам зональных кристаллов (Benedyuk, 2012).

Понижение отношения $Cr/(Cr+Al)$, повышение $Mg/(Mg+Fe^{2+})$ при росте Fe_2O_3 , проявленные в зональности III типа могут быть обусловлены возрастанием степени прогрессивного метаморфизма пород (Evans, 1975). Рис. 4 иллюстрирует необычный для магматических разностей характер взаимоотношения ядро-кайма в зерне хромшпинелида из плагиоверлита массива Медвежий Лог, имеющего такую зональность, что может свидетельствовать о её метаморфической природе.

Включения в хромшпинелидах

Хромшпинелиды в процессе кристаллизации способны захватывать порции родоначального расплава, по которым можно судить о составе первичных силикатных и, в случае ликвации магмы, сульфидных расплавов. В качестве включений в исследуемых хромшпинелидах присутствуют силикатные минералы, сульфиды, а также структуры распада в виде пластинок ильменита.

Силикатные включения представлены минеральными агрегатами оливина, магнезиальной роговой обманки, реже пироксена. Некоторые включения сохранили первичный состав, другие замещены серпентином, хлоритом и актинолитом. Включения оливина нередко имеют очертания кристаллов, включения остальных минералов – преимущественно округлую форму. Размер включений варьирует от 5 до 50 мкм.

Сульфидные включения в хромшпинелидах встречаются довольно редко. Как правило, это округлые каплевидные выделения размером 15–35 мкм. Присутствие сульфидных включений позволяет предполагать наличие равновесного с силикатной жидкостью сульфидного расплава. Судя по составу представленных сульфидных включений, сульфидная жидкость имела состав твёрдого раствора пентландита и халькопирита.

Появление структур распада – следствие высокотемпературных субсолидусных реакций, что является явным свидетельством первично магматической природы содержащих их хромшпинелей.

ГЛАВА 4. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ СОСТАВА РАСПЛАВНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ В ХРОМШПИНЕЛИДАХ И ПЕТРОГЕНЕЗИС УЛЬТРАБАЗИТОВ

Представления о генезисе изучаемых пород влияют на оценку перспектив их потенциальной рудоносности и имеют особую актуальность при изучении основных-ультраосновных комплексов. В решении генетических проблем важную роль играет состав хромшпинелидов и захваченных ими расплавных включений.

При изучении силикатных микровключений в хромшпинелидах пород исследуемых массивов была использована методика В.А. Симонова (Симонов и др. 2008, 2009).

Состав расплавов

Стекло прогретых двухфазных расплавных включений в хромшпинелидах обладает нормальной щелочностью, поскольку устанавливаются низкие суммы щелочей (до 1.6 мас. %), и относится к толеитовым сериям. По этим характеристикам они совпадают со значительной частью данных для расплавных включений в хромшпинелидах из базит-гипербазитовых пород Срединно-Атлантического хребта (р-он Сьерра-Леоне) и Карашатского массива (офиолиты Южной Тувы), в отличие от включений в хромитах массива Кондер, обладающих щелочными характеристиками.

По соотношению MgO–SiO₂ (рис. 5) включения в хромшпинелидах из верлита Медекского массива с содержанием магния от 13.6 до 16.9 мас. % попадают в поле пикробазальтов.

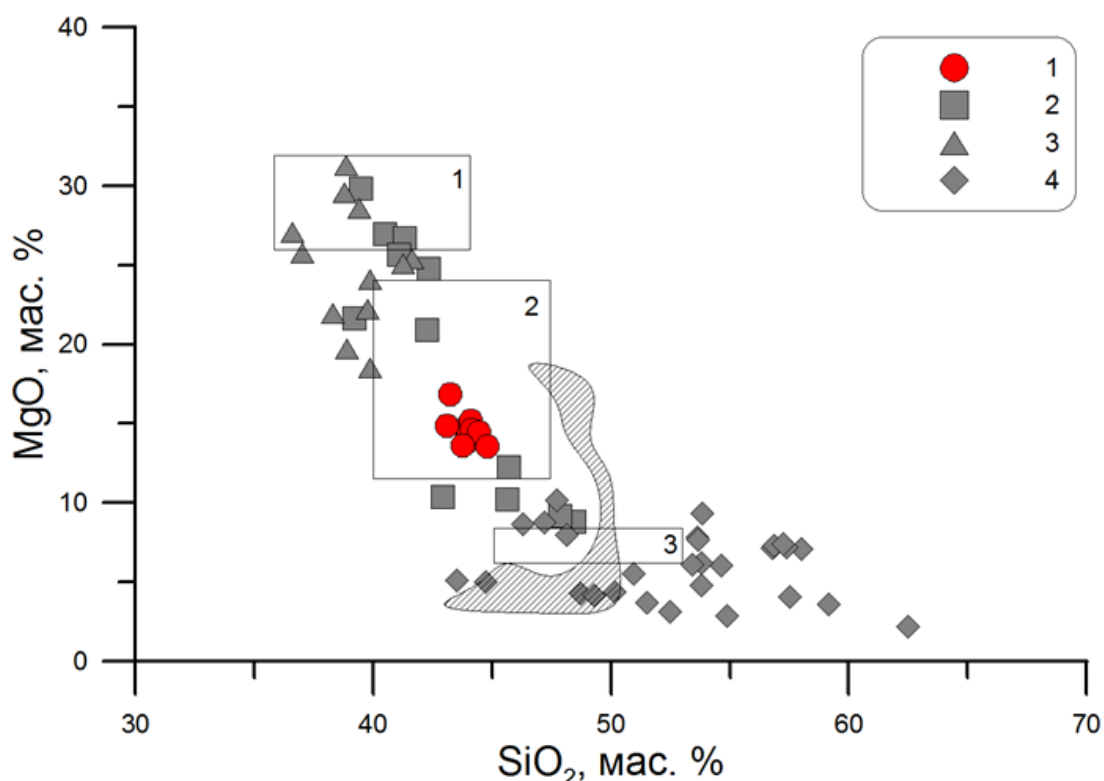


Рис. 5. Соотношение MgO–SiO₂ включений в хромшпинелидах (после высокотемпературных экспериментов).

1–4 – стекла расплавных включений в хромшпинелидах из верлита Медекского массива (1), дунитов Кондерского (2) и Инаглинского (3) массивов, троктолитов района Сьерра-Леоне (4). Поля по (Магматические горные породы, 1983): 1 - пикриты, 2 - пикробазальты, 3 - базальты. Заштриховано поле составов расплавных включений в шпинелях из дунитов Карашатского массива (Симонов и др., 2009 б). Рисунок составлен с использованием материалов (Симонов и др., 2009; Симонов и др., 2011).

Включения по своему составу близки к относительно низкотитанистым и низкокалиевым пикробазальтовым расплавам: SiO_2 – 45.2 мас. %, TiO_2 – 0.8 мас. %, Al_2O_3 – 13.4 мас. %, FeO – 10.4 мас. %, MgO – 11.0 мас. %, CaO – 16.1 мас. %, Na_2O – 1.3 мас. %, K_2O – 0.3 мас. %. По большинству основных петрохимических компонентов (SiO_2 , Al_2O_3 , FeO , MgO , CaO , Na_2O) стекла включений в целом согласуются с данными по расплавленным включениям в хромшпинелидах Карашатского и Кондерского массивов. По распределению FeO и SiO_2 изученные включения вполне соотносятся также и с информацией по расплавленным включениям в хромитах из района Сьерра-Леоне (Симонов и др., 2011).

Таким образом, исследования стекол фактически гомогенизированных (гомогенное стекло и газовый пузырек) расплавленных включений показали, что кристаллизация хромшпинелидов (и содержащих их пород рассматриваемых ультрабазитов) происходила из пикробазальтовых расплавов нормальной щелочности. Очевидно, что состав включений в хромшпинелидах отвечает расплаву, существовавшему на момент кристаллизации шпинелей и явно эволюционировавшему с момента его зарождения. В связи с этим уместно предположить, что родоначальным для пикробазальтового расплава являлся менее дифференцированный и, следовательно, более магнезиальный пикритовый расплав.

Моделирование с помощью программы PETROLOG III (Плечов, Данюшевский, 2006) позволило получить информацию о температурах формирования верлитов Медекского ультрабазитового массива. Для получения температур кристаллизации хромшпинелида использовалась модель (Ariskin & Nikolaev, 1996), оливина и клинопироксена – (Ariskin et al., 1986), а температуры кристаллизации плагиоклаза получены с использованием модели (Ariskin, Varmina, 1990). В ходе моделирования было выяснено, что верлиты Медекского гипербазитового массива кристаллизовались в интервале температур от 1310 до 1190 °C (хромшпинелид-I – 1310–1280 °C, оливин – 1290–1230 °C, клинопироксен – 1250–1230 °C, плагиоклаз 1220–1190 °C). Близкие температурные параметры кристаллизации минералов (1250–1220 °C) из верлитов Карашатского массива (офиолиты Южной Тувы) ранее были установлены на основе данных по расплавленным включениям в хромшпинелидах (Симонов и др., 2009 б).

ГЛАВА 5. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ХРОМШПИНЕЛИДОВ КАК КРИТЕРИЙ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ РУДОНОСНОСТИ УЛЬТРАБАЗИТОВ

Тип оруденения (сульфидное медно-никелевое с платиноидами, хромитовое, титан-ванадиевое) комплексов основных-ультраосновных пород определяется составом исходной магмы, характером её дифференциации и глубиной становления интрузии, что находит отражение в её формационном типе. Хромитовые и титаномагнетитовые месторождения связаны только с крупными массивами: Малотагульский титаноносный массив (площадь $\sim 160 \text{ км}^2$ (Мехоношин и др., 1986)), Кемпирсайский хромитоносный массив (площадь $\sim 1200 \text{ км}^2$ (Бакиров, 1950)), в то время как месторождения медно-никелевых руд могут быть приурочены, как к крупным (Камбалда – 400 км^2 (Gresham and Loftus-Hills, 1981)), так и к мелким телам (Кингаш – 1.4 км^2 (Глазунов и др., 2003), Джинчуан – 1.8 км^2 (Налдретт, 2003)). Таким образом, отнесение пород массивов к тому или иному формационному типу позволяет разделить их по металлогенической специализации, а в случае мелких тел – разбраковать на перспективные и бесперспективные в качестве потенциальных месторождений.

Данные, полученные в результате изучения внутреннего строения, химического состава и анализа расплавных включений в хромшпинелидах рассматриваемых массивов, позволяют выделить следующие критерии, характеризующие массивы как потенциально рудоносные.

Характер зональности. Как показано в предыдущих главах, в зёрнах исследуемых хромшпинелидов преобладает магматическая зональность, что указывает на превалирующую роль магматических процессов в формировании минералов и пород исследуемых массивов. Согласно магматической теории, медно-никелевые руды образуются в результате ликвации и последующего сегрегирования капель жидкого сульфида из первоначально однородной основной или ультраосновной никеленосной магмы (Налдретт, 2003). Таким образом, доказательство магматогенного происхождения пород, слагающих исследуемые комплексы, можно использовать в качестве предпосылки на сульфидное медно-никелевое оруденение.

Состав сульфидных и силикатных расплавных включений. Расплавные включения захватываются минералом в период его роста в высокотемпературных магматических условиях. Состав этих включений отражает состав расплава, существовавшего на момент кристаллизации минерала, захватившего эти включения. Согласно полученным в главе 4 выводам, породы рассматриваемых

массивов кристаллизовались из пикритового расплава нормальной щёлочности. С производными пикритовых магм связаны многие месторождения меди, никеля и платиноидов (Джинчуан, Кингаш и др.). Как упоминалось в предыдущих главах, в качестве включений в хромшпинелидах присутствуют сульфиды, по составу отвечающие, главным образом, пентландиту. Присутствие сульфидных и силикатных включений в хромшпинелидах указывает на то, что на раннемагматическом этапе имел место процесс ликвации магмы, и, следовательно, существовала сульфидная жидкость, которая после кристаллизации образовала рудную залежь. Данный критерий можно считать прямым признаком рудоносности изучаемых массивов.

Распределение главных элементов. Фигуративные точки составов хромшпинелидов из пород массивов Медекский, Медвежий Лог и Малая Шита по соотношению главных компонентов тяготеют к полю хромшпинелидов расслоенной интрузии Джинчуан. От акцессорных и рудных разностей Кемпирсайского реститового массива их отличают умеренные содержания Cr_2O_3 (33–42 мас. %), Al_2O_3 (20–33 мас. %) и более высокие концентрации Fe^{3+} (до 1.3 ф.к.). Хромшпинелиды массива Тёпса отличаются от разностей других рассматриваемых массивов меньшим содержанием Cr_2O_3 (17–28 мас. %) и Fe^{3+} (до 0.46 ф.к.) и большими концентрациями Al_2O_3 (26–50 мас. %). На тройной диаграмме фигуративные точки составов хромшпинелидов массива Тёпса тяготеют к полю высокоглинозёмистых акцессорных хромшпинелидов Кемпирсайского массива. На диаграмме $\text{Cr}\#\text{--Mg}\#$ разности массива Тёпса демонстрируют вариации $\text{Cr}\#$ (0.18–0.39) близкие к акцессорным хромшпинелидам Кемпирсайского массива, а значения $\text{Mg}\#$ (0.40–0.67) схожие с разностями из руд Кемпирсайского массива. Хромшпинелиды остальных рассматриваемых массивов по соотношению $\text{Cr}\#\text{--Mg}\#$ попадают в поле хромшпинелидов интрузии Джинчуан.

Распределение редких элементов. Индикаторами формационной принадлежности интрузий могут служить концентрации в хромшпинелиде таких элементов как титан, никель, цинк и марганец. Содержание TiO_2 в разностях из пород дунит-верлит-плагиоверлитового формационного типа достигает 3.0 мас. %, в то время как в хромшпинелидах из пород дунит-гарцбургитовой формации концентрации компонента варьируют в пределах 0.01–0.15 мас. %. На диаграмме $\text{TiO}_2\text{--MgO}$ большинство точек попадает в область хромшпинелидов интрузии Джинчуан, за исключением некоторых точек, отвечающих наиболее магнезиальным разностям массива Медвежий Лог и Тёпса, которые тяготе-

ют к области хромшпинелидов из хромитовых руд Кемпирсайского массива. От разностей коматиитов Австралии и Африки изучаемые хромшпинелиды отличается более высокое содержание MgO – от 1.48 до 16.10 мас. %.

Как упоминалось в главе 3, присутствие в породах рассматриваемых массивов хромшпинелидов с невысокими содержаниями никеля может быть связано с удалением сульфидной жидкости в процессе ликвации магмы или взаимодействием с железоникелевыми магматическими сульфидами. Такие обеднённые никелем шпинели могут являться минералами-индикаторами минерализованных базит-ультрабазитовых интрузий.

На диаграмме ZnO–MnO (рис. 6) фигуративные точки составов хромшпинелидов рассматриваемых массивов образуют обособленное облако, большей частью попадающее в поле хромшпинелидов интрузии Джинчуан. Точки, отвечающие составам шпинелей массива Тёпса тяготеют к полю акцессорных хромшпинелидов Кемпирсайского массива. Разности остальных массивов от шпинелей реститового Кемпирсайского массива отличаются более высокие концентрации MnO (0.16–0.70 мас. %), а от хромшпинелидов из коматиитов Австралии и Африки разности всех исследуемых массивов отличаются меньшим

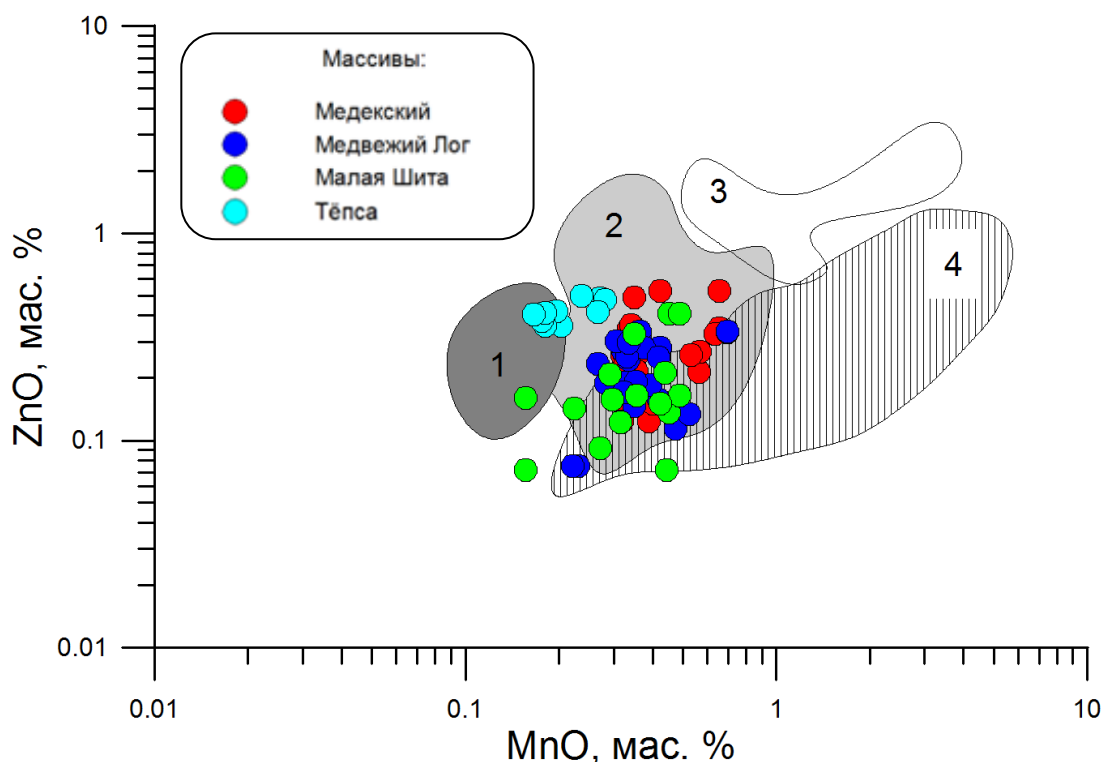


Рис. 6. Соотношение ZnO–MnO в хромшпинелидах.

1–3 – состав хромшпинелидов: Кемпирсайского массива (1), интрузии Джинчуан (Barnes, Tang, 1999) (2), коматиитов Австралии и Африки (3), безрудной интрузии Зангбугтай (Barnes, Tang, 1999) (4).

содержанием MnO и ZnO (0.07–0.53 мас. %). Часть точек соотносится с полем, отвечающим составам хромшпинелидов нерудоносной ультрабазитовой интрузии Зангбугтай (Китай).

Проведённый в главе анализ показал различия химического состава хромшпинелидов исследуемых массивов. Разности массивов Медекский, Медвежий Лог и Малая Шита имеют состав характерный для расслоенных интрузий; шпинели массива Тёпса по содержанию главных и редких элементов тяготеют к разностям из реститовых пород. Таким образом, выявленные различия химического состава хромшпинелидов позволяют разделить породы массивов по формационной принадлежности и степени потенциальной рудоносности на перспективные в отношении сульфидного медно-никелевого оруденения с платиноидами (Медекский, Медвежий Лог и Малая Шита) и бесперспективные (Тёпса). Данный вывод подтверждает возможность использования хромшпинелидов в качестве индикаторов формационной принадлежности, а особенностей их состава – в качестве критериев потенциальной рудоносности ультрабазитов.

Выявленные критерии были использованы для определения формационной принадлежности двух ультрабазитовых массивов, породы в которых полностью превращены в серпентин-хлоритовые сланцы: Голумбейский и Тёпса-2 (рис. 7 а, б). Установлено, что наиболее отчётливо разности Голумбейского массива и массива Тёпса-2 различаются по соотношению трёхвалентных катионов и титана (рис. 7 а), а также по соотношению $Cr/(Cr+Al)$ и $Mg/(Mg+Fe^{2+})$ (рис. 7 б), что позволяет отнести Голумбейский массив, к дунит-верлит-плагиоверлитовой формации, а массив Тёпса-2 – к дунит-гарцбургитовой.

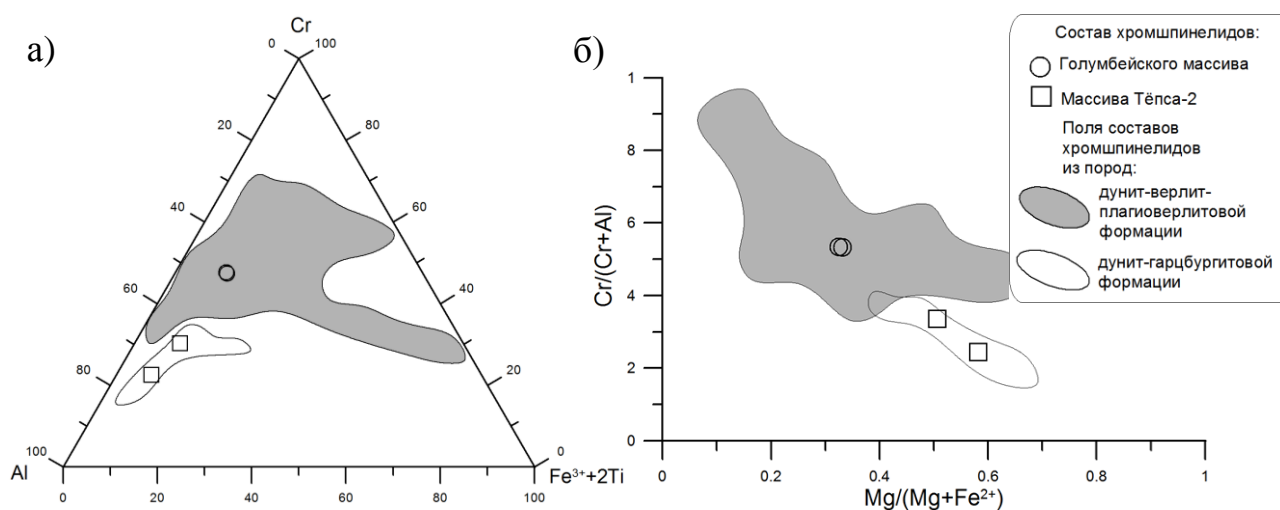


Рис. 7. Распределение Cr, Al, Fe³⁺ и Ti (а) и соотношение коэффициентов Cr#-Mg# (б) в хромшпинелидах Голумбейского массива и массива Тёпса-2 с неопределённым формационным типом пород.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты изучения геохимических особенностей хромшпинелидов ультрабазитовых массивов центральной части Восточного Саяна позволяют сделать следующие выводы:

1. В рассматриваемых породах встречается три генерации хромшпинелидов, отличающихся по форме зёрен, взаимоотношению с породообразующими минералами, составу, характеру распределения компонентов и условиям формирования. Различия химического состава хромшпинелидов выявленных генераций проинтерпретированы с трёх позиций: а) общая тенденцией поведения некоторых элементов в магматическом процессе; б) одновременная кристаллизация породообразующих минералов; в) реакции с интеркумулусной жидкостью и первичными силикатами.

2. Установлено, что родоначальный для пород рассматриваемых массивов расплав соответствовал пикритовому расплаву нормальной щёлочности.

3. Получены температурные параметры кристаллизации минералов рассматриваемых ультрабазитов, не противоречащие существующим экспериментальным данным образования минералов других комплексов.

4. Выявлены следующие критерии, указывающие на потенциальную рудоносность ультрабазитовых массивов: присутствие сульфидных включений, магматическая зональность хромшпинелидов; особенности химического состава, проявленные в характерном тренде эволюции Cr, Al и Fe^{3+} , высоком содержании TiO_2 (>0.5 мас. %), типичных для дунит-верлит-плагивоверлитового формационного типа концентрациях MnO (0.16–0.70 мас. %) и ZnO (0.07–0.53 мас. %).

5. Определён формационный тип Голумбейского массива и массива Тёпса-2 на основе полученных критериев, что подтверждает возможность использования состава хромшпинелидов в качестве индикатора формационной принадлежности и потенциальной рудоносности ультрабазитов на сульфидное платиноидно-медно-никелевое оруденение.

Основные публикации по теме диссертации

Статьи в журналах из перечня ведущих периодических изданий ВАК

1. **Бенедюк Ю.П.**, Колотилина Т. Б., Мехоношин А. С. Акцессорные хромшпинелиды Медекского массива (Восточный Саян) // Известия сибирского отделения секции наук о земле РАЕН. Геология поиски и разведка рудных месторождений. – 2010. – № 2 (37). – С. 72–76.
2. Мехоношин А.С., Толстых Н.Д., Подлипский М.Ю., Колотилина Т.Б., Вишневский А.В., **Бенедюк Ю.П.** Платинометальная минерализация дунит-верлитовых массивов Гутаро-Удинского междуречья (Восточный Саян) // Геология рудных месторождений. – 2013. – № 3. – С. 167–180.

Материалы совещаний и тезисы конференций

3. **Бенедюк Ю.П.** Петрографические особенности Медекского никеленосного массива / Проблемы геологии и освоения недр. – Труды XIV международного научного симпозиума. – Томск. – 2010. – Т 1. С. 86–87.
4. **Бенедюк Ю.П.** Особенности морфологии и химизма окисно-рудных минералов / Геохимия, петрология и рудоносность базит-ультрабазитовых комплексов. – Сборник тезисов II Всероссийской молодёжной школы-семинара. – Иркутск–Байкал. – 2010. С. 7–12.
5. **Бенедюк Ю.П.** Индикаторные признаки окисно-рудных минералов ультраосновных пород как критерий рудоносности и формационной принадлежности / Современные проблемы геохимии. – Сборник тезисов. – Иркутск. – 2011. С. 30–33.
6. **Бенедюк Ю.П.** Особенности состава хромшпинелидов ультрабазитов, производных пикритовых магм, на примере массивов центральной части Восточного Саяна / Уральская минералогическая школа. – Труды конференции. – Екатеринбург. – 2011. С. 41–43.
7. **Benedyuk Y.P.** Chemical variations of chromium spinel in Medeksky, Medvezhiy Log, Malaya Shita and Tartay differentiated ultrabasic bodies, Eastern Sayan Mountains / The VI International Siberian Early Career GeoScientists Conference. Proceedings of the conference. – Novosibirsk. – 2012. P. 54–56.
8. Мехоношин А.С., Колотилина Т.Б., Дорошков А.А., **Бенедюк Ю.П.** Геохимические особенности сульфидных руд ультрабазитов Алхадырского террейна (юг Сибири) / Современные проблемы геохимии. – Труды Всероссийского совещания. – Иркутск. – 2012. С. 97–99.
9. Симонов В.А., Мехоношин А.С., Колотилина Т.Б., **Бенедюк Ю.П.** Состав магматических систем при формировании ультраосновных пород массива Медек (Восточный Саян) / Современные проблемы геохимии. – Труды Всероссийского совещания. – Иркутск. – 2012. С. 127–129.