

На правах рукописи

Рыбакова

Рыбакова Анна Вячеславовна

**ПЕТРОЛОГИЯ ХРОМИТОНОСНЫХ УЛЬТРАМАФИТОВ
КАЛНИНСКОГО И ЭРГАКСКОГО МАССИВОВ
(СЕВЕРО-ВОСТОК ЗАПАДНОГО САЯНА)**

Специальность 25.00.04 – петрология, вулканология

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени
Кандидата геолого-минералогических наук

Томск
2019

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

Научный руководитель: **Чернышов Алексей Иванович**
доктор геолого-минералогических наук, профессор Томского государственного университета

Официальные оппоненты: **Симонов Владимир Александрович**
доктор геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, ФГБУН Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск

Мехоношин Алексей Сергеевич
кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, ФГБУН Институт геохимии им. А.П. Виноградова, г. Иркутск

Ведущая организация: **Институт горного дела, геологии и геотехнологий**
Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

Защита состоится «24» декабря 2019 года в 11 часов на заседании Диссертационного совета Д 003.002.01 при Геологическом институте СО РАН по адресу: г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, д. ба, в конференц-зале.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГИН СО РАН и на сайте института (www.geo.stbur.ru).

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения, просим присылать по адресу: 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, д.ба ученому секретарю диссертационного совета О.К. Смирновой. e-mail: meta@ginst.ru.

Автореферат разослан «____» _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 003.002.01
кандидат геол.-мин. наук



О.К. Смирнова

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность диссертационного исследования

Наиболее существенные достижения в петрологии альпинотипных ультрамафитов связаны с развитием представлений о тектонической природе пород, о чем свидетельствует широкое развитие в них признаков интенсивных пластических деформаций. Совокупность последних определяет разнообразие деформационных структур, постоянно фиксируемых в ультраосновных породах и отражающих степень их пластической переработки, проявление которой обуславливает структурную и вещественную анизотропию ультрамафитов. Предпринятое автором комплексное петрологическое исследование пород Калнинского и Эргакского массива, с применением нетрадиционных методов петроструктурного анализа, позволило получить оригинальные данные по внутреннему строению, структурно-вещественному преобразованию пород и минералов, что представляется интересом для решения вопросов петрогенезиса, а также дает возможность разработать критерии поисков полезных ископаемых, специфичных для данной формации ультрамафитов.

Наиболее перспективным признан Амыльский хромитоносный район. В пределах данного района располагаются Калнинский и Эргакский массивы перспективные на хромиты. В последние годы интерес к изучению и последующему освоению массивов возрастает, в связи с перспективой развития инфраструктуры Западного Саяна.

Новизна и практическое значение работы. Выполнено комплексное петрологическое исследование ультрамафитов, результаты которых позволяют выявить эволюцию вещества верхней мантии, установлена роль пластической деформации в локализации хромититов.

Цель работы – комплексное петрологическое исследование Калнинского и Эргакского хромитоносных массивов.

Задачи исследования: 1) Установить внутреннее строение массивов; 2) Выделить главные петрографические разновидности пород, провести их петроструктурную типизацию; 3) Выявить петрогеохимические особенности пород и установить закономерности их изменения; 4) Провести микроструктурный анализ оливина и энстатита с целью выявления механизмов пластического деформирования пород; 5) Установить роль пластических деформаций в локализации хромитового оруденения; 6) Предложить эволюционную модель формирования исследуемых хромитоносных ультрамафитов.

Фактический материал. В процессе выполнения работы проведено детальное петрографическое изучение пород в Калнинском и Эргакском массивах в 108 прозрачных шлифах на поляризационном микроскопе фирмы Zeiss «Axioskop 40». Петроструктурный анализ оливина и энстатита выполнен в 10 образцах ультрамафитов. Изучение вещественного состава пород проводилось по результатам рентгенофлуоресцентного анализа по 50 оригинальным пробам. Изучение петрохимии пород проводилось по 50 оригинальным силикатным анализам. Геохимические исследования проводились в 32 образцах. Определение состава минералов выполнено в 20 обр. Аналитические исследования выполнялись в Центре геохимии природных систем при ТГУ (г. Томск), Институте геохимии СО РАН (г. Иркутск) и в ВИМСе (г. Москва).

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Диссертация соответствует паспорту специальности 25.00.04 – Петрология, вулканология в пунктах: 2. «Магматическая петрология», 3. «Рудоносный магматизм».

Защищаемые положения:

1. Ультрамафиты, в исследуемых массивах, представлены породами дунит-гарцбургитового полосчатого комплекса. В дунитах и гарцбургитах установлен широкий спектр деформационных типов микроструктур (протогранулярный, мезогранулярный, порфинокластовый, порфиroleйстовый), отражающий степень их пластического деформирования.

2. Исследуемые массивы сложены в разной степени деплетированными ультрамафитами. В Эргакском – они менее деплетированы и представлены породами дунит-гарцбургитовой ассоциации с лерцолитовым уклоном. В Калнинском – ультрамафиты в большей степени де-

плетированы и представлены только дунитами и гарцбургитами. В первом массиве в породах отмечается тенденция к обогащению кремнеземом, кальцием, глиноземом, во втором – к их обеднению.

3. Установлено, что в мантийных условиях пластические деформации в дунитах и гарцбургитах осуществлялись преимущественно трансляционным скольжением при высоких температурах и низкой скорости. В процессе перемещения ультрамафиты пластически деформировались трансляционным скольжением с возрастанием роли синтетектонической рекристаллизации в условиях снижения температур и возрастании скорости. На уровнях консолидации ультрамафиты претерпели вторичную рекристаллизацию отжига с образованием оливинитов.

Апробация работы и публикации. По теме диссертации опубликовано 19 печатных работ, в том числе 3 статьи в научных журналах и изданиях, которые включены в перечень российских рецензируемых научных журналов. Основные результаты работы представлялись и докладывались на всероссийских, международных совещаниях, конференциях и симпозиумах: Международный научный симпозиум имени академика М.А.Усова «Проблемы геологии и освоения недр» (г. Томск, 2012-2016 гг.); Всероссийская конференция «Современные проблемы магматизма и метаморфизма» (г. Санкт-Петербург, 2012 г.); Металлогения древних и современных океанов (г. Миасс, 2013-2015 гг.); Всероссийская Байкальская молодежная научная конференция по геологии и геофизике (г. Улан-Удэ, 2015 г.); Всероссийская петрографическая конференция «Петрология магматических и метаморфических комплексов» (г. Томск, 2016, 2017 гг.).

Структура и объем работ. Диссертация состоит из введения, восьми глав и заключения общим объемом 151 страниц текста, включая 9 таблиц и 31 рисунка. Список литературы состоит из 129 библиографических наименований.

Благодарности. Автор выражает особую благодарность за помощь в написании диссертации своему научному руководителю, профессору кафедры петрографии Чернышову Алексею Ивановичу. М.Ю.Подлипскому, И.Ю.Лоскутову (г. Новосибирск) за совместные исследования. Сотрудникам кафедры петрографии за ценные советы.

1 МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методами структурного картирования выявляется внутреннее анизотропное строение ультрамафитовых массивов по массовым замерам структурных элементов. В камеральных условиях, методом геометрического анализа в ориентированных образцах определялись плоскости минеральной уплощенности и линейности, которые дополняют полевые замеры. Микроструктурным анализом выявлены ориентировки минералов по внутреннему строению. Их петроструктурный анализ дает возможность получить информацию о механизмах и термодинамических условиях деформации пород.

Изучение петрографического состава ультрамафитов, хромититов, их микроструктурных особенностей позволило выделить широкий спектр деформационных типов микроструктур (протогранулярный, мезогранулярный, порфиорокластовый, порфиролейстовый) в дунитах и гарцбургитах, которые отражают стадийность их пластического деформирования. Микронзондовым анализом установлены особенности состава хромшпинелидов и ассоциирующих с ними минералов, в том числе платиноидов.

Петрохимические особенности пород устанавливались по оригинальным результатам силикатного анализа, что позволило установить формационную принадлежность ультрамафитов в исследуемых массивах и различную степень их деплетирования. Распределение редких и РЗЭ элементов позволило получить представление о генезисе и источнике родоначального расплава исследуемых ультрамафитов. Используя метод оценки потенциальной хромитонности ультрамафитов по петрохимическим данным (Лоскутов, Велинский, 1989) в исследуемых массивах выделены перспективные площади на обнаружение рудопроявлений хромититов.

Оценка статистических параметров вещественного состава пород и минералов проводилась с использованием математических методов с помощью пакетов программы STATISTIKA 6.0 и Microsoft Excel. Интерпретация полученных результатов исследования проводилась с использованием опубликованных источников российских и зарубежных исследователей.

2 ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ СВ ЧАСТИ ЗАПАДНОГО САЯНА

Калнинский и Эргакский массивы располагаются на СВ Западного Саяна. В геологическом отношении массивы приурочены к северо-восточному окончанию Куртушибинского офиолитового пояса (рис. 1). В геологическом строении данного района принимают участие разнообразные метаморфические, осадочные и магматические образования с возрастом от верхнего протерозоя до отделов палеозоя девонской системы.

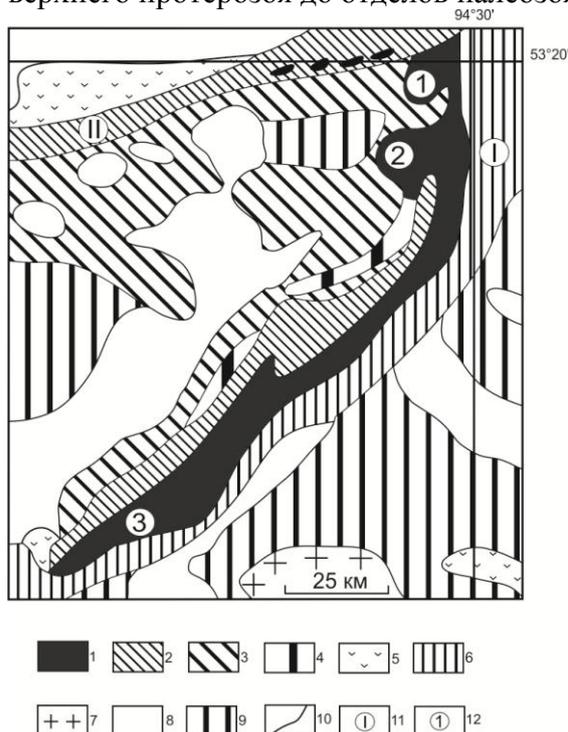


Рисунок 1 – Офиолитовые пояса Западного Саяна (Петрология ..., 1977).

1–офиолиты: ультрамафиты и габброиды; 2–чингинская кремнисто-базальтовая толща; 3–джебашская метаморфическая серия, зеленосланцевая зона; 4–глаукофановые сланцы (акольская формация и ее аналоги); 5–нижнекембрийские вулканогенные толщи (андезит-базальтовые и смешанного состава); 6–ишкинско-аласугская и нижнеордовикская туфогенно-флишoidная серия; 7–средне-, верхнекембрийские гранитоиды (майнский комплекс); 8–позднеордовикский–раннесилурийский этап (включая гранитоиды большепорожского комплекса); 9–наложенные вулканогенные и угленосные прогибы (D₁-C₁); 10–прочие геологические границы; 11–офиолитовые пояса: I–Северо-Саянский, II–Куртушибинский; 12–Массивы: 1–Эргакский, 2–Калнинский, 3–Иджимский.

3 ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ МАССИВОВ

Калнинский ультрамафитовый массив имеет субизометричную форму, его площадь составляет, примерно, 65 км² (рис. 2). Массив является тектоническим блоком, сложенным метаморфическими перидотитами, который окружен тектоническим серпентинитовым меланжем (Чернышов, Юричев, 2013).

Изучение распределения плоскостных структурных элементов в массиве позволили выявить полосчатое строение дунит-гарцбургитового субстрата, которое является контролирующим для хромитового оруденения. Зоны оруденения полосчатых хромититов вытягиваются в северо-западном направлении согласно с внутренней полосчатой структурой массива, их мощность обычно не более 10-15 м.

Эргакский массив имеет овальную форму с размерами 14×8 км и вытянут в субмеридиональном направлении. Тектоническим нарушением массив разделен на два разновеликих блока: южный – Лысанский (~75 км²) и северный – Малоэргакский (~10 км²). Оба блока окружены тектоническим серпентинитовым меланжем.

Лысанский блок имеет концентрически-зональное строение (Перспективы..., 2002). В его строении принимают участие ультрамафиты дунит-гарцбургитового полосчатого комплекса. В центральной части преобладают гарцбургиты, затем они сменяются зоной с преобладанием дунитов. Среди гарцбургитов, иногда, отмечаются лерцолиты и верлиты. На Лысанском блоке известно пять наиболее представительных рудопроявлений хромититов (Пер-

спективы..., 2002). Также отмечаются многочисленные участки, обогащенные хромшпинелидами.

Малоэргакский блок. В его строении принимают участие породы полосчатого дунит-гарцбургитового комплекса, которые интенсивно преобразованы в регенерированные серпентин-оливиновые ультраметаморфиты и оливиниты. В этом блоке выявлены два рудопроявления хромититов, которые локализованы среди регенерированных ультраметаморфитов.

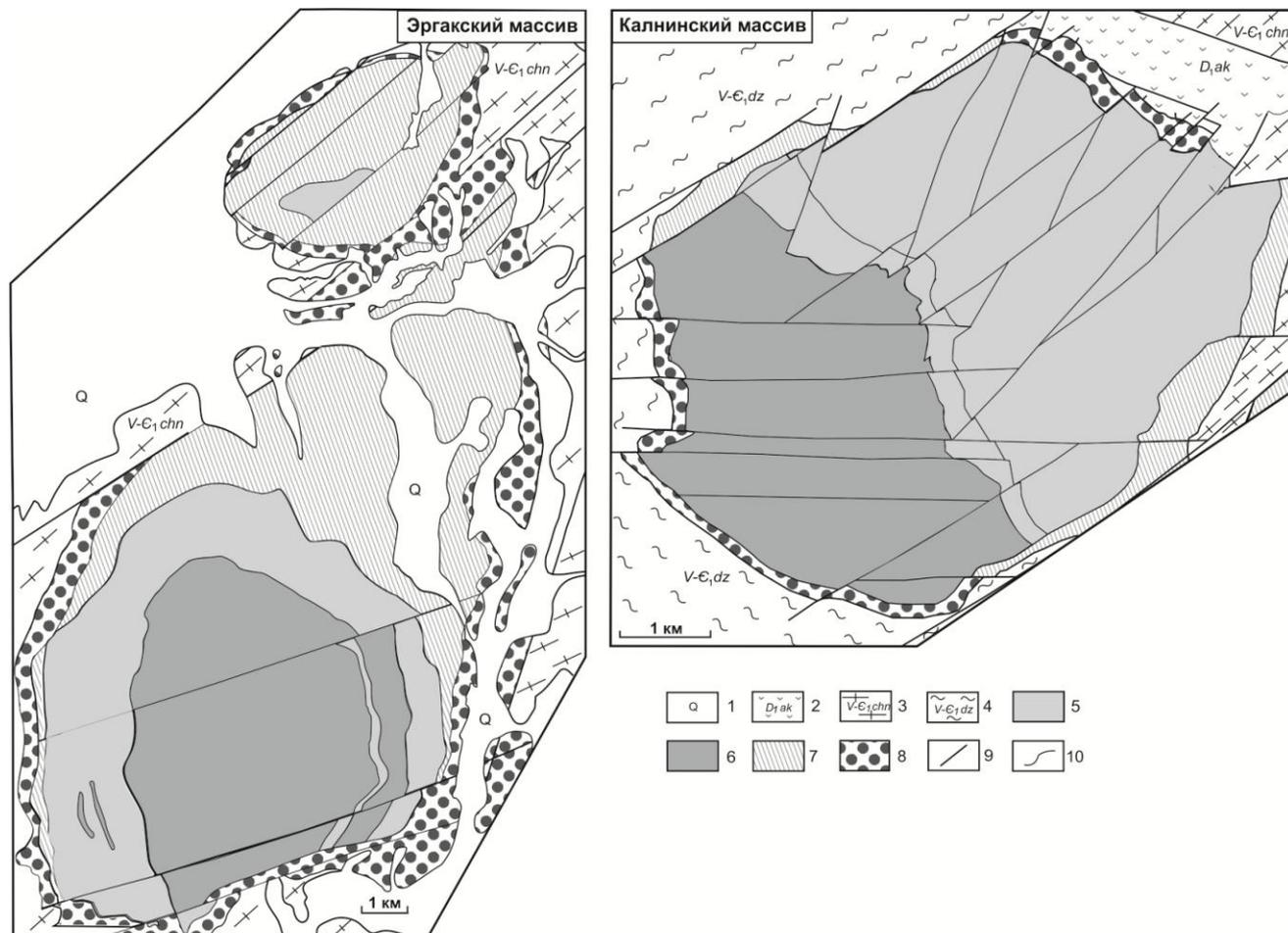


Рисунок 2 – Схема геологического строения Калнинского и Эргакского ультрамафитовых массивов (по Кривенко и др., 2002; Чернышов, Юричев, 2013 с дополнениями автора).

1–четвертичные отложения; 2–нижнедевонская актуругская свита: андезиты, трахиандезиты, лаво- и пирокластиты; 3–венд-нижнекембрийская чингинская серия: базальты, трахибазальты, глинисто-кремнистые, углеродисто-глинисто-кремнистые, хлорит-кремнистые сланцы, микрокварциты; 4–венд-нижнекембрийская джебашская серия: metabазальты, метаморфические сланцы кварцевые, серицит-альбит-кварцевые, хлорит-альбит-кварц-карбонатные, серицит-хлорит-кварц-альбитовые; 5–дуниты; 6–гарцбургиты; 7–серпентиниты; 8–серпентиновый меланж; 9–разрывные нарушения; 10–геологические границы.

4 ПЕТРОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА УЛЬТРАМАФИТОВ

Изученные метаморфические ультрамафиты относятся к дунит-гарцбургитовой ассоциации. Они претерпели интенсивные преобразования в результате пластического деформирования и рекристаллизации.

Среди ультрамафитов Калнинского и Эргакского массивов выделены следующие основные микроструктурные типы: протогранулярный, мезогранулярный, порфирокластовый и гранобластовый, очередность которых отражает последовательность их пластического деформирования.

Протогранулярный тип пользуется наибольшим распространением среди дунитов Калнинского массива и, редко, встречается в Эргакском. Для него характерны максимальные размеры зерен оливина 3-10 мм (рис. 3а) и незначительная степень деформации. Протогранулярный тип обладает наименьшей удельной поверхностью зерен оливина, которые имеют незначительную предпочтительную ориентировку по форме. Для оливина характерна субизометричная форма с округлыми и заливообразными контурами.

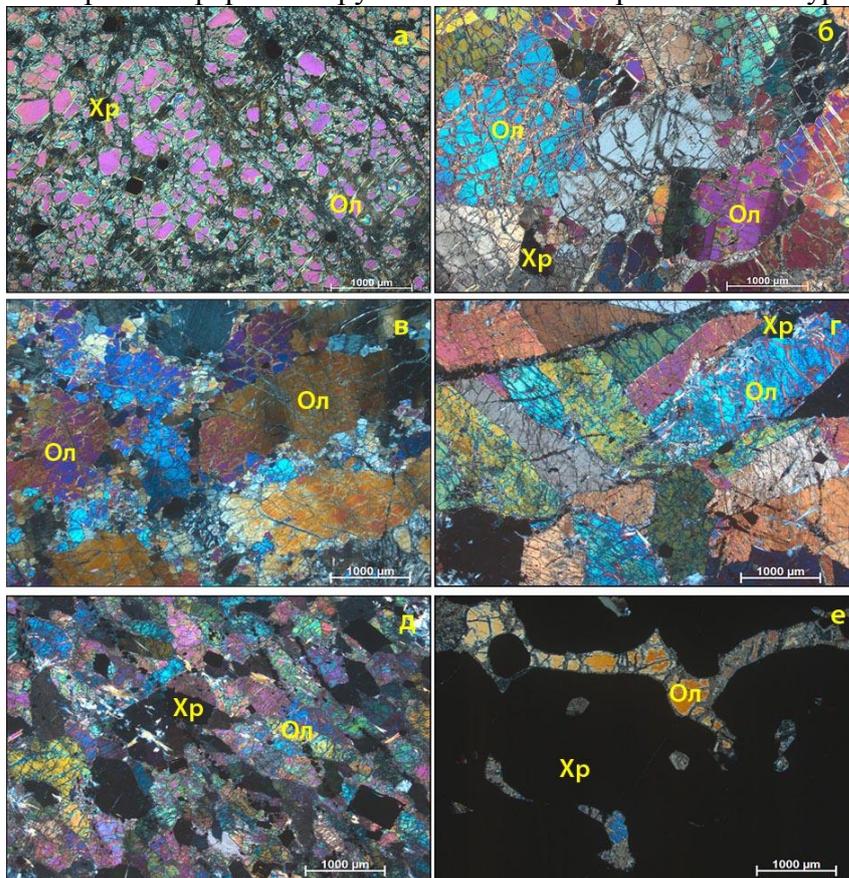


Рисунок 3 – Фотографии шлифов в ультрамафитах Калнинского (а,б) и Эргакского (в, г, д, е) массивов. а–протогранулярный дунит (Обр. 7037); б–гарцбургит с отчетливыми признаками пластических деформаций и порфиrokластеза зерен оливина (Обр. 7073); в–дунит порфиrokластовый (Обр. Эр-220); г–оливинит с гранобластовой структурой (Обр. Эр 250); д–оливинит лейстовый (Обр. Эр-268); е–хромит сливной (Обр. Эр-203). Примечание: Ол-Оливин, Хр-Хромшпинелид, Ник. Х.

Мезогранулярный тип микроструктуры пользуется значительным распространением в обоих массивах (рис. 3б) и возникает на месте пород с протогранулярным типом. Для дунитов и гарцбургитов этого типа характерна микроструктура, возникающая в результате “распада” крупных зерен оливина на равновесный среднезернистый агрегат индивидов оливина, что находит отражение в увеличении удельной поверхности зерен оливина. Степень ориентации определяется формой и ориентировкой зерен.

Порфиrokластовый тип пользуется наиболее значительным распространением среди дунитов и гарцбургитов Эргакского массива. Этот тип возникает на месте предыдущих типов в результате интенсивной синтетектонической рекристаллизации. Он характеризуется наличием порфиrokластовых зерен оливина (рис. 3в) и мозаичного агрегата мелких индивидов, количественные соотношения между которыми определяются степенью синтетектонической рекристаллизации.

Удлиненные порфиrokласты обычно ориентируются субпараллельно, с образованием наложенной директивности, и структура становится *порфиroleйстовой*. Удельная поверхность порфиrokластовых зерен близка к удельной поверхности зерен оливина в мезогранулярном типе и возрастает в порфиroleйстовом. Мозаичный рекристаллизованный агрегат состоит из мелких зерен оливина (менее 0,5 мм) с очень большой удельной поверхностью.

Гранобластовый тип характерен для оливинитов. Он образуется при вторичной рекристаллизации отжига по предыдущим типам (рис. 3г). В результате отжига признаки пластического деформирования полностью утрачиваются и порода приобретает структуру равновесного гранобластового агрегата зерен оливина, иногда с выраженной директивностью. В

последнем случае структура становится *лейстовой*. При этом удельная поверхность и степень ориентации зерен оливина возрастает от гранобластовых оливинитов к лейстовым.

Хромититы имеют, преимущественно, вкрапленную и густовкрапленную структуру (рис. 3е). Текстура однородная либо полосчатая, обусловленная различной насыщенностью хромшпинелидами. При этом удлиненные индивиды и агрегаты вытягиваются согласно полосчатости. Промежутки между зернами хромшпинелидов выполнены интенсивно серпентинизированным оливином, либо петельчатым агрегатом лизардита.

Особенности минералогического состава ультрамафитов

Оливины из *гарцбургитов* и *дунитов* обоих массивов имеют близкие составы и соответствуют форстериту: в гарцбурггитах $Fa=7,07-10,89\%$, в дунитах $Fa=5,18-9,32\%$. В *хромититах* отмечается снижение его железистости ($Fa=6,29\%$). В *оливинитах* оливин соответствует форстериту с минимальной железистостью ($Fa=0,78-2,81\%$).

Пироксены. *Ортопироксены* в гарцбурггитах обоих массивов соответствуют энстатиту с железистостью $7,83-13,81\%$. Однако энстатиты Калнинского массива отличаются от Эргакского тенденцией снижения Al_2O_3 , Cr_2O_3 , что, очевидно, связано с его большей степенью деплетирования. *Клинопироксены* установлены только в Эргакском массиве. Химический состав клинопироксенов соответствует диопсиду с железистостью $5,68\%$.

Хромшпинелиды из *дунитов* и *гарцбургитов* Калнинского массива отличаются от хромшпинелидов Эргакского массива меньшей глиноземистостью и магнизиальностью, и соответственно, большей железистостью и хромистостью. По составу они соответствуют хромитам, хромпикотитам и алюмохромитам. В *оливинитах* хромшпинелиды попадают в поле хромитов и магнетитов (рис. 4). Для них отмечается высокая хромистость и низкое содержание Al_2O_3 по отношению к дунитам. В *хромититах* хромшпинелиды обоих массивов имеют близкий состав. Они отличаются от хромшпинелидов из вмещающих дунитов большей железистостью и меньшей хромистостью.

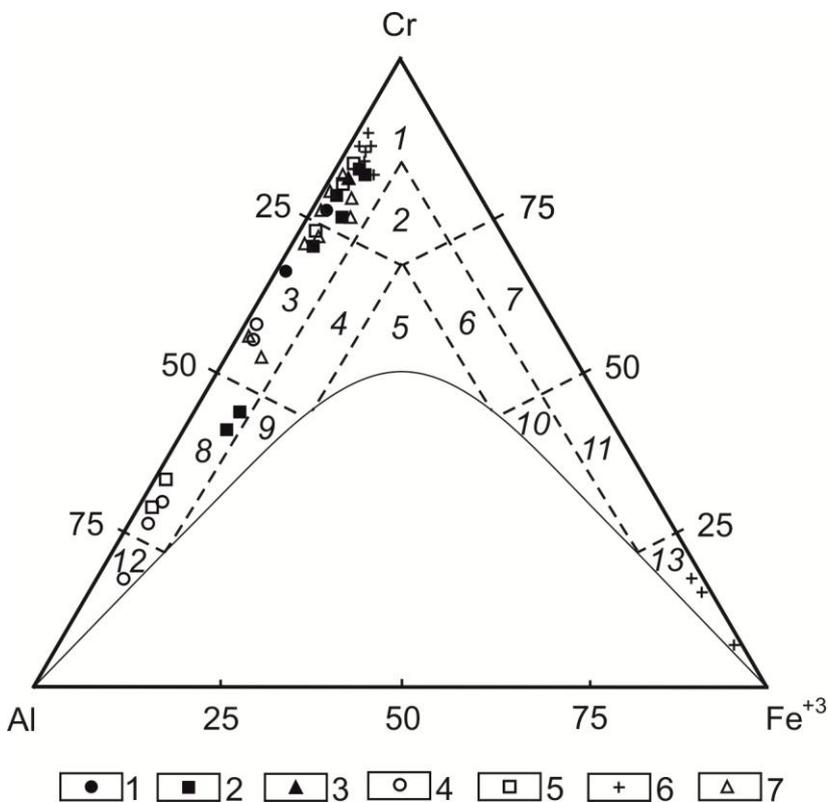


Рисунок 4 – Составы хромшпинелидов и магнетитов из ультрамафитов Калнинского и Эргакского массивов на классификационной диаграмме (Павлов, 1949). Калнинский массив: 1–гарцбурггиты, 2–дуниты, 3–хромититы. Эргакский массив: 4–гарцбурггиты, 5–дуниты, 6–оливиниты, 7–хромититы.

Поля на диаграмме: 1–хромит, 2–субферрихромит, 3–алюмохромит, 4–субферриалюмохромит, 5–ферриалюмохромит, 6–субалюмоферрихромит, 7–феррихромит, 8–хромпикотит, 9–субферрихром-пикотит, 10–субалюмохроммагнетит, 11–хроммагнетит, 12–пикотит, 13–магнетит.

По методу, предложенному Ф.П. Лесновым (Леснов и др., 2008), по составу аксессуарных хромшпинелидов проведена оценка степени деплетирования ультрамафитов исследуемых массивов. На рисунке 5 отчетливо видно, что наиболее истощенными являются дуниты и гарцбурггиты Калнинского массива. Степень их деплетирования составляет примерно 40%.

Тогда как ультрамафиты Эргакского массива в разной степени деплетированы. Их фигуративные точки образуют два поля концентрации. Одно из них пространственно совмещается с фигуративными точками Калнинского массива и соответствует интенсивно деплетированным ультрамафитам дунит-гарцбургитового парагенезиса. Второе поле фигуративных точек отвечает степени деплетирования 10-20%, характерному для слабо истощенных ультрамафитов и соответствует лерцолитовому парагенезису.

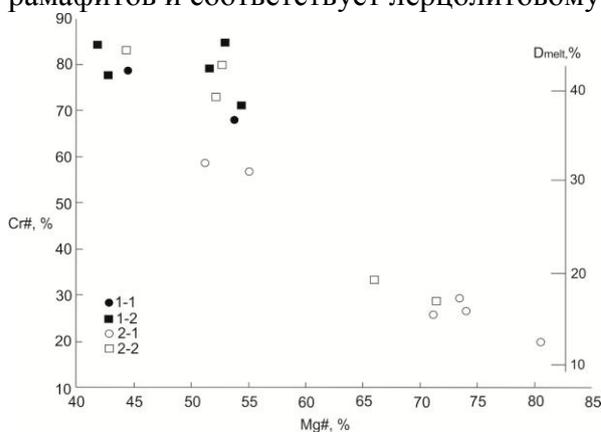


Рисунок 5 – Соотношение значений параметров ($Cr\#$, $Mg\#$) в акцессорных хромшпинелидах из ультрамафитов. 1-1:1-2 – Калнинский массив: 1-1 – гарцбургиты, 1-2 – дуниты; 2-1: 2-2 – Эргакский массив: 2-1 – гарцбургиты, 2-2 – дуниты. $Cr\# = Cr / (Cr + Al + Fe) \%$, $Mg\# = Mg / (Mg + Fe^{2+}) \%$, $D_{melt} = 0,426 \times Cr\# + 1,538 \%$ по методике Ф.П. Леснова (Леснов, 2008).

Платиноиды. Минералы ЭПГ определялись в Эргакском массиве. Они были установлены только в густовкрапленных хромититах, тогда как в умеренно- и бедновкрапленных хромититах и акцессорных хромшпинелидах из ультрамафитов они не были выявлены. Минералы ЭПГ наблюдаются преимущественно в виде мелких субизометричных, реже эвгедральных зерен размером до 7 мкм, локализованных в центральных частях зерен хромшпинелидов. Установленные минералы ЭПГ по своему составу объединяются в пять групп: металлические твердые растворы ($Cu-Ru-Os$, $Ir-Os-Ru$), сульфиды (дисульфиды ряда лаурит-эрликманит, мышьяксодержащие лауриты, сульфиды состава $Ru-Fe$, $Ru-Ni-Fe$) и сульфоарсениды с преобладанием второй и третьей.

Температуры оливин-хромитовых равновесий. Для оценки оливин-хромитового равновесия нами использован геотермометр Фабри (Fabries, 1979), который позволяет определять термальные уровни динамического равновесия, связанных с эволюцией ультрамафитов. Наиболее высокотемпературными являются хромититы (~ 1000 °C), которые образовывались среди дунитов в зонах интенсивного пластического течения в процессе рестирования исходных гарцбургитов. Пластически деформированные ультрамафиты с протогранулярными и мезогранулярными структурами характеризуются высокими температурными равновесиями ~ 850-770 °C. Ультрамафиты с порфирокластовыми типами структур обладают значительным диапазоном температурных равновесий ~ от 640 до 800 °C, который обусловлен неравной степенью проявления пластического течения, осуществляемого как трансляционным скольжением так и синтектонической рекристаллизацией в условиях увеличения скорости деформаций, возрастающей роли стресса и снижения температур. Регенерированные оливиниты в результате вторичной рекристаллизации отжига (~ 450-500 °C) под влиянием термического воздействия на пластически деформированные ультрамафиты более молодых габбровых интрузий.

5 ОСОБЕННОСТИ ПЕТРОГЕОХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА УЛЬТРАМАФИТОВ

Петрохимия. Исследование химического состава ультрамафитов обоих массивов проводилось с целью определения особенностей, отражающих эволюцию на уровнях формирования и последующего перемещения в верхней мантии и земной коре. Для сравнения, в качестве эталонов, использованы составы ультрамафитов Кемпирсайского массива (южный Урал), включающего месторождение хромитов и нехромитоносного Оспинского массива (ЮВ Восточного Саяна) (Савельев и др., 2008; Гончаренко, Чернышов, 1990).

Изученные ультрамафиты характеризуются значительными вариациями содержаний пет-

рогенных элементов, одни из которых на бинарных диаграммах не обнаруживают между собой какой-либо зависимости, а для других она отчетливо устанавливается. В первом случае, фигуративные точки составов ультрамафитов формируют плотный рой точек (рис. 6а). При этом Калнинские ультрамафиты на диаграмме $MgO-FeO_{tot}$ обнаруживают тенденцию к увеличению железистости по отношению к ультрамафитам из других массивов. Во втором случае, когда наблюдается устойчивая зависимость между элементами, на диаграмме $MgO-Al_2O_3$ фигуративные точки составов ультрамафитов образуют линейные тренды (рис. 6б), которые отражают увеличение магнезиальности при отчетливом снижении содержаний кремния, кальция и глинозема от гарцбургитов к дунитам. Данное обстоятельство обусловлено снижением суммарного количества нормативного пироксена в ультрамафитах (Шмелев, 2011). При этом фигуративные точки ультрамафитов Калнинского массива располагаются, преимущественно, во фронтальной части тренда, что свидетельствует об их большей степени деплетирования по сравнению с Эргакскими. Наблюдается сближенность фигуративных точек ультрамафитов Калнинского и Оспинского массивов.

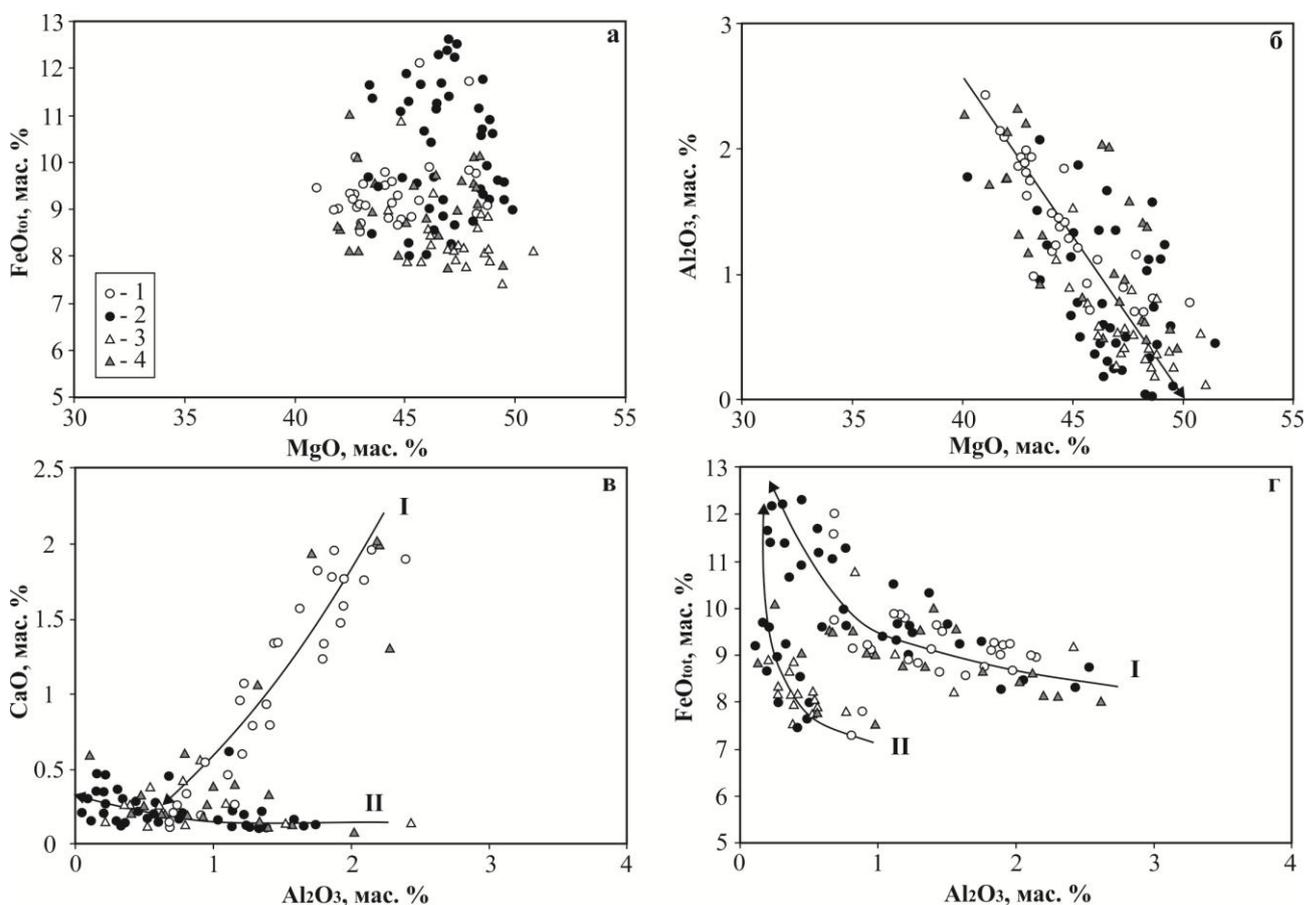


Рисунок 6 – Бинарные диаграммы для ультрамафитов Куртушибинского офиолитового пояса. 1–Эргакский массив, 2–Калнинский массив и их сравнение с эталонными офиолитовыми массивами, 3–Оспинский, Восточный Саян, 4–Кемпирсайский, Южный Урал.

На диаграммах Al_2O_3-CaO и $Al_2O_3-FeO_{tot}$ фигуративные точки составов формируют по два эволюционных тренда. Тренд I образуют преимущественно фигуративные точки ультрамафитов Эргакского и Кемпирсайского массивов, а тренд II – Калнинского и Оспинского массивов. Данные тренды отражают эволюцию исходного мантийного субстрата. Тренд I включает ультрамафиты менее деплетированного лерцолит-гарцбургитового парагенезиса, при этом, тренд II охватывает ультрамафиты более деплетированного дунит-гарцбургитового парагенезиса. Подобная неоднородность деплетирования мантийного субстрата отмечалась в ультрамафитовых массивах Полярного Урала (Шмелев, 2009). Меньшая степень деплетирования ультрамафитов Эргакского массива подтверждается присутствием в них моноклинного пирок-

сена, количество которого варьирует от единичных зерен до заметных содержаний в лерцоли-тах.

Геохимия. *Гарцбургиты* исследуемых массивов, в сравнении с дунитами и хромититами, обладают наиболее высокими содержаниями РЗЭ при однотипном характере их распределения (рис. 6). Для обоих массивов характерны тренды, обусловленные снижением концентраций от легких к средним лантаноидам. От средних к тяжелым наблюдаются примерно одинаковые их концентрации, либо слабое увеличение последних. При этом калнинские гарцбургиты, по отношению к эргакским, выделяются большей обогащенностью легкими РЗЭ ($(La/Yb)_n=11.2-31.7$ – Калнинский массив; $(La/Yb)_n=1.4-4.0$ – Эргакский массив) и имеют более дифференцированные спектры в области тяжелых РЗЭ: Tb, Ho и слабый Tm отрицательные пики. Природа данных отрицательных аномалий, очевидно, заключается в большей степени деплетированности гарцбургитов Калнинского массива. Средние и тяжелые РЗЭ в гарцбургитах обоих массивов имеют одинаковое распределение с гарцбургитами Оспинского

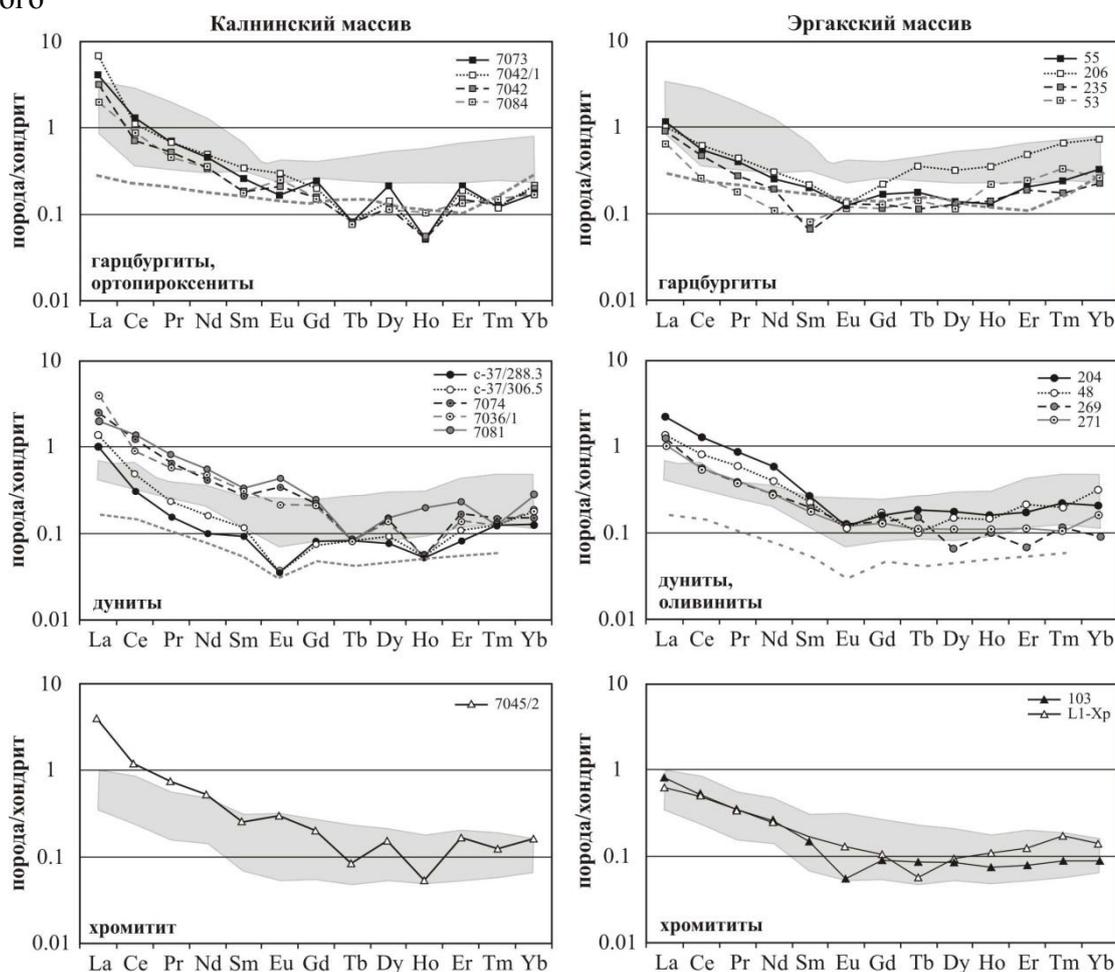


Рисунок 7 – Редкоземельные спектры ультрамафитов Калнинского и Эргакского массивов, нормированные к хондриту (Boynon, 1984). Для сравнения на графики вынесены составы аналогичных ультрамафитов Кемпирсайского массива Южного Урала (серое поле) и усредненные спектры составов дунитов и гарцбургитов Оспинского массива Восточного Саяна (серая пунктирная линия).

массива, однако, существенно отличаются от последнего по содержанию легких. При этом следует отметить, что все лантаноиды в Эргакском массиве отличаются меньшими концентрациями от Кемпирсайского и большими от Калнинского, что указывает на большую деплетированность последнего.

Оливиниты, образовавшиеся в результате вторичной рекристаллизации отжига, полностью унаследуют концентрации РЗЭ от исходных дунитов ($(La/Yb)_n=6.7-13.9$). Это свидетельствует об их пассивной роли в этом процессе. *Хромититы* обоих массивов формируют

спектры РЗЭ, которые по общему содержанию лантаноидов и морфологии оказываются близкими распределению РЗЭ в гарцбургитах и первом типе дунитов. Они, также, соответствуют хромититам Кемпирсайского массива, практически полностью ложатся в область распространения их спектров (рис. 7).

6 ПЕТРОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ ОЛИВИНА В УЛЬТРАМАФИТАХ

Петроструктурные исследования проводились в гарцбургитах, дунитах и оливинитах Калнинского и Эргакского массивов с различными деформационными структурами, отражающими неоднородность их пластического деформирования.

Анализ петроструктурных узоров оливина в гарцбургитах и дунитах с *мезогранулярным и протогранулярным типами* в Калнинском массиве позволил установить две стадии его формирования в процессе пластического деформирования. *Первая стадия*, очевидно, осуществлялась в динамически активной зоне верхней мантии. На этой стадии пластическое течение мезогранулярных гарцбургитов, вероятно, сопровождалось рестированием вещества верхней мантии с образованием полосчатого дунит-гарцбургитового субстрата. Петроструктурный узор оливина показывает, что его пластическое деформирование осуществлялось высокотемпературным внутрикристаллическим трансляционным скольжением по высокотемпературным системам $(010)[100]$ и $\{0kl\}[100]$, в условиях осевых деформаций, в режиме снижения температур (от 900°), умеренной и высокой скорости ($10^{-5}\text{c}^{-1} - 10^{-2}\text{c}^{-1}$) и низкого всестороннего давления (≈ 5 кбар). При этом трансляционное скольжение носило неоднородный характер и осуществлялось дискретно. В результате зерна оливина, в мезогранулярных гарцбургитах и дунитах, приобретают характерное неоднородное волнистое погасание, характеризуются наличием многочисленных полос излома и, частично, подвергались порфирокластезу.

Вторую стадию отражают петроструктурные узоры крупных слабо деформированных зерен оливина в гарцбургитах и дунитах с протогранулярным типами микроструктур. Они являются близкими узорам в мезогранулярном типе и отличаются наличием угловых расстояний между главными максимумами кристаллооптических осей Ng. Отсутствие признаков пластических деформаций в крупных зернах оливина показывает, что этот этап носил прогрессивный характер и осуществлялся при повышении температур. При этом пластические деформации сменяются первичной статической рекристаллизацией отжига. Процесс протекал за счет упругой, постепенно уменьшающейся, внутрикристаллической энергии зерен оливина, которая способствовала росту свободных от дислокаций зерен, за счет поглощения насыщенных дислокациями деформированных индивидов, посредством перемещения границ. В результате формируются гарцбургиты и дуниты с крупнозернистой микроструктурой, плавными границами зерен оливина, часто сходящимися под углом 120° . Новообразованный оливин отличается отсутствием признаков пластических деформаций и имеет однородное погасание.

Петроструктурный узор оливина в дунитах с *порфирокластовой структурой* в Эргакском массиве обусловлен активизацией трансляционного скольжения по системе $\{0kl\}[100]$, осуществляемого в двух направлениях. При этом одно из направлений является доминирующим и ориентируется преимущественно согласно с направлением наложенного сдвига. Второе направление трансляции располагается под углом $60-90^\circ$ к плоскости сдвига. Последовательное увеличение степени деформации, с возрастанием угла сдвига до $40-60^\circ$, способствует формированию двух множеств зерен оливина, в которых многочисленные полосы излома ориентируются симметрично к направлению их удлинения, т.е. обнаруживают перистое расположение. При этом наиболее благоприятно ориентированными оказываются зерна, в которых плоскости трансляции совпадают с плоскостью сдвига. Формирование таких петроструктурных узоров, очевидно, осуществлялось в зоне перехода верхней мантии и нижних частях земной коры при высокой скорости пластического течения (до $\varepsilon \sim 10^{-2}\text{c}^{-1}$), которая способствовала возрастанию температуры (до 1000°C), в результате внутреннего трения при

сдвиговых деформациях. В условиях быстрого возрастания скорости деформации и температуры, пластическое течение не успевает реализоваться трансляционным скольжением в одном направлении, поэтому активизируется второе, субнормальное первому. С увеличением степени деформирования в ультрамафитах возрастает роль синтетектонической рекристаллизации с образованием микрозернистого агрегата оливина.

Гранобластовые оливиниты образовались в процессе высокотемпературной вторичной рекристаллизации отжига пластически деформированных дунитов и гарцбургитов, обусловленной их прогрессивным метаморфизмом на уровнях консолидации в земной коре. Такая вторичная отжиговая рекристаллизация способствовала разрастанию свободных от напряжений оливиновых индивидов без признаков пластического деформирования. При этом зерна оливина приобретают закономерную ориентировку по внутреннему строению (рис. 8), которая контролируется внешним полем напряжения, фиксируемого максимумом осей N_p σ_3 , а также низкотемпературным трансляционным скольжением по системе (110)[001]. Главными факторами этого процесса являются повышение температуры ($T > 500^\circ\text{C}$), медленная скорость ($\epsilon < 10^{-6} \text{ c}^{-1}$) и низкий стресс (10-20 МПа).

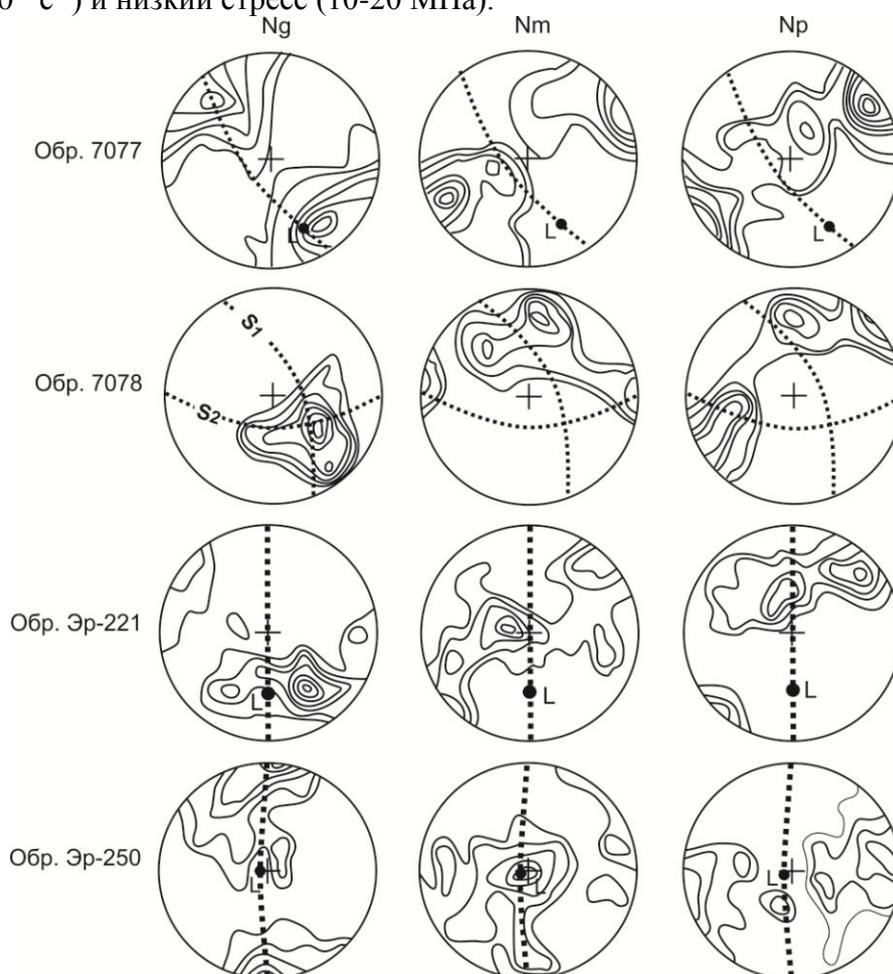


Рисунок 8 – Диаграммы ориентировки кристаллооптических осей оливина в гарцбургитах и дунитах Калнинского и Эргакского массивов. Диаграммы построены по 100 замерам кристаллооптических осей минералов. Изолинии: 1-2-4-6-8-10-12-14-16 % на 1 % сетки Шмидта. Проекция на верхнюю полусферу. Точечные линии – плоскость пластического течения S (S1 – полосчатость, S2 – кливаж), L – линейность. Калнинский массив: Обр. 7077 – мезогранулярный гарцбургит, Обр. 7078 – протогранулярный дунит. Эргакский массив: Обр. Эр-221 – порфиroleйстовый дунит, Обр. Эр-250 – гранобластовый оливинит.

7 ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ХРОМИТОНОСНОСТЬ ИССЛЕДУЕМЫХ МАССИВОВ

Оценка потенциальной хромитоносности Калнинского и Эргакского массивов, проведена по результатам химического состава ультрамафитов по методике И.Ю. Лоскутова и В.В. Велинского.

Для оценки северной части **Калнинского массива** обработаны 13 оригинальных анализов и 22 заимствованных. Установлено, что наиболее оптимальным («контрастным») является суммирование упрощенного и полного показателя ($Z_3 = Z_1 + Z_2$). Как видно из рис. 9, преобладающими являются положительные значения этого показателя, что свидетельствует о перспективности массива в целом. Полученный тип распределения дискриминатора близок к таковому в рудных выборках серпентинитов Урала. Построение изолиний дискриминатора хромитоносности (Z_3) на площади северной части массива (рис. 10) показывает, что имеющиеся рудоносные зоны попадают в потенциально благоприятные площади, выделенные по изолиниям. Вытянутость аномальных зон дискриминатора контролируется полосчатой внутренней структурой массива, вдоль которой залегают хромитоносные зоны. Фиксируемые наиболее перспективные участки ($Z_3 > 10$) находятся южнее известных рудоносных площадей, где детальные поисковые работы не проводились, это позволяет предполагать их продолжение в южном направлении по простиранию.

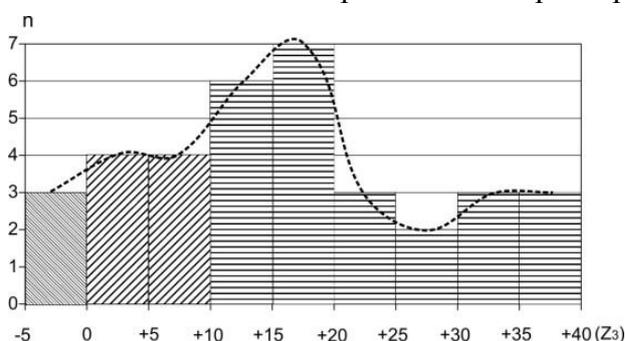


Рисунок 9 – Характер распределения дискриминатора хромитоносности в ультрамафитах Калнинского массива ($n=35$). n – число анализов, штриховкой выделены неперспективные (тонкая косая штриховка, $Z_3 < 0$), благоприятные ($Z_3 > 0$) и наиболее благоприятные для оруденения (горизонтальная штриховка $Z_3 > 10$) значения дискриминатора хромитоносности.

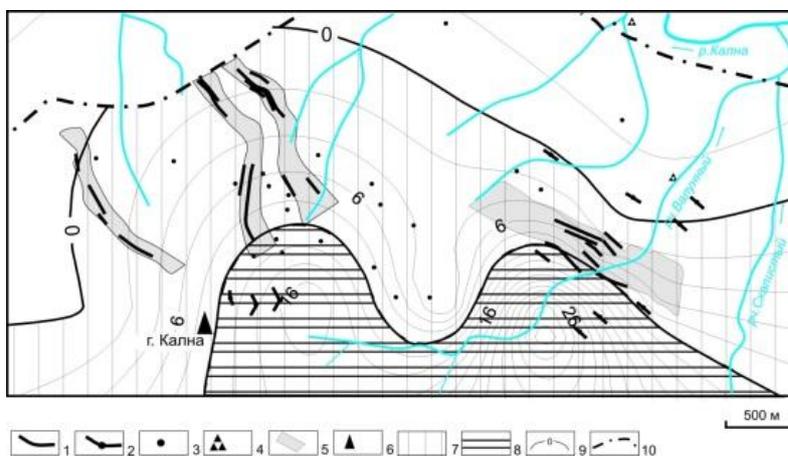


Рисунок 10 – Оценка хромитоносности северной части Калнинского массива по петрохимическим данным. 1-5 известные рудопроявления хромитов по С. Г. Катанову 2003 г.: 1 - пласты, линзы, шлиры, эшелонированные по падению и простиранию, 2 - отдельные линзы, шлиры (вне масштаба), 3 - единичные шлиры, "струйки", 4 - аллювиальные гальки, валуны, 5 - рудоносные горизонты вкрапленных хромитов. 6 - горные вершины. 7 - перспективные площади на хромититы, выделенные по

комплексному петрохимическому показателю. 8 - наиболее перспективные площади ($Z_3 > 10$). 9 - изолинии дискриминатора хромитоносности. 10 - северная граница массива.

При оценке перспектив **Эргакского массива** на хромититы учитывались результаты 38 оригинальных силикатных анализов ультрамафитов, по которым рассчитывался петрохимический показатель Z_3 . Характер распределения показателя Z_3 для Эргакского массива, в сравнении с хромитоносными уральскими серпентинитами, приведён на рис. 10. Как следует из рисунка, в ультрамафитах Эргакского массива отмечаются большие, по сравнению с уральскими, отрицательные значения Z_3 (до -20), а в области положительных преобладающие значения близки к уральским. При этом положительные значения Z_3 на гистограммах говорят о перспективной хромитоносности вмещающих ультрамафитов.

В Лысанском блоке преобладают положительные значения показателя Z_3 , что свидетельствует о повышенной перспективности блока в целом (рис. 12а). При этом наиболее ин-

тересным представляется участок вокруг горы Лысан, который составляет примерно третью часть площади с показателем $Z_3 > 10$. На этой площади ранее были выявлены основные рудопроявления хромититов.

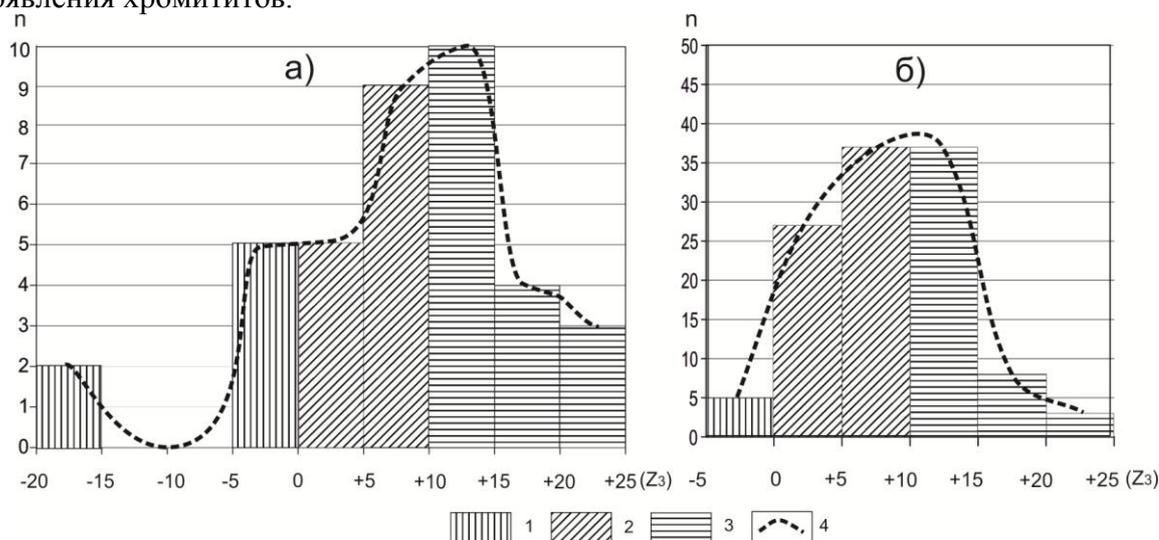


Рисунок 11 – Гистограммы распределения петрохимического показателя (Z_3) для: а) хромитонесных ультрамафитов Эргакского массива ($n=38$) и б) для хромитонесных серпентинитов Урала ($n=116$). Значения петрохимических показателей: 1 – неперспективные на хромитонесность ($Z_3 < 0$), 2 – благоприятные ($Z_3 = 0+10$), 3 – наиболее перспективные ($Z_3 > 10$), 4 – аппроксимирующая кривая. n – количество анализов.

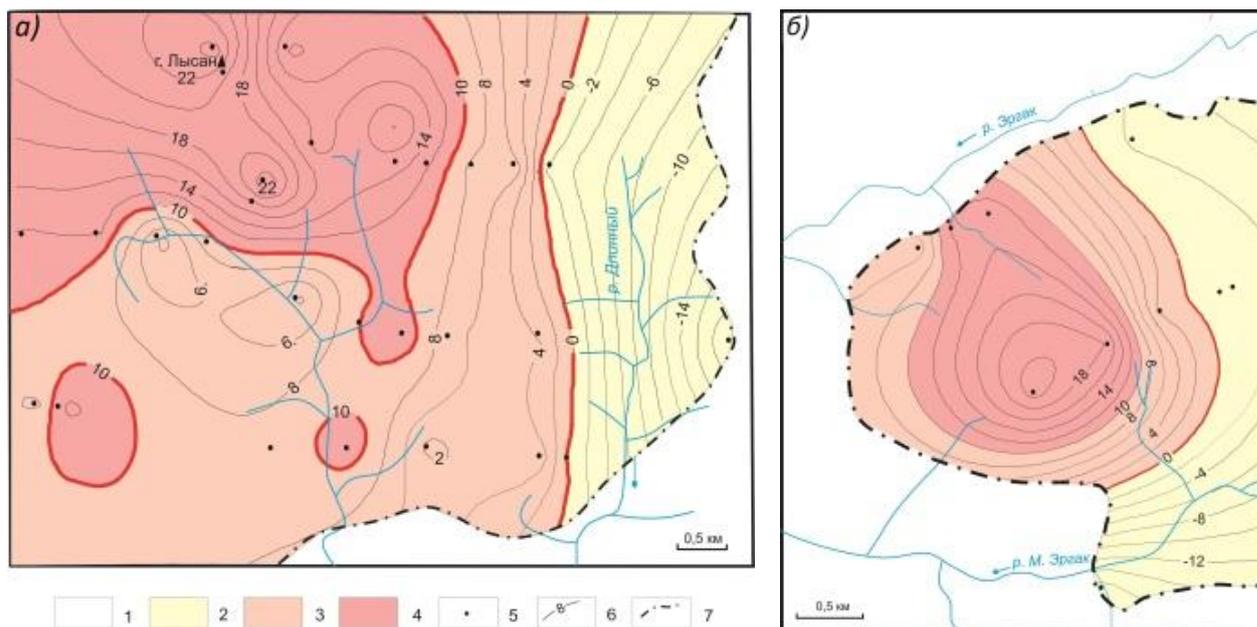


Рисунок 12 – Оценка перспектив хромитонесности Лысанского (а) и Малоэргакского (б) блоков по петрохимическим данным. 1 – вмещающие породы, 2 – бесперспективные площади ($Z_3 < 0$), 3 – перспективные площади ($10 > Z_3 > 0$), 4 – наиболее перспективные ($Z_3 > 10$), 5 – точки, используемые для построения изолиний Z_3 (28 шт.), 6 – изолинии комплексного петрохимического показателя Z_3 ; 7 – контуры массива. Изолинии Z_3 проведены через 2 единицы.

В Малоэргакском блоке потенциально перспективна на хромититы его западная часть, для которой характерны преимущественно положительные показатели Z_3 (рис. 12б). Непосредственно на её западной окраине ранее были установлены два рудопроявления. По полученным данным высокие показатели $Z_3 > 10$ характерны для центральной части западного блока, что указывает на её наибольшую перспективность. Именно здесь следует провести детальные поисковые работы в целях обнаружения новых рудопроявлений хромититов.

8 ПЕТРОГЕНЕТИЧЕСКИЕ ВЫВОДЫ

Калнинский и Эргакский массивы являются фрагментами нижней части Куртушибинского офиолитового пояса и сложены породами полосчатого дунит-гарцбургитового комплекса. Внутренняя структура массивов определяется полосчатостью. Среди дунитов обоих массивов выявляются линейные зоны полосчатых хромититов, согласных с внутренней структурой массивов.

Ультрамафиты исследуемых массивов представлены, преимущественно, дунитами, гарцбургитами и их серпентинизированными разностями. В северном блоке Эргакского массива ультрамафиты преобразованы в регенерированные оливиниты. Среди ультрамафитов обоих массивов выявлены как хромитоносные зоны, так и хромитовые тела.

Дуниты и гарцбургиты, обычно, имеют средне-, крупнозернистые структуры, нередко грубозернистые. Они в различной степени подвержены пластическим деформациям, что выражается в появлении неоднородного погасания минералов, полос пластического излома и порфирикластезе, обусловленном синтетектонической рекристаллизацией. По совокупности и интенсивности проявления признаков пластической деформации выделены следующие петроструктурные типы дунитов и гарцбургитов: протогранулярный → мезогранулярный → порфирикластовый. Их последовательность определяется возрастанием роли признаков пластического деформирования зерен оливина: неоднородности их погасания, полос излома, изменения формы зерен, их степени ориентации и синтетектонической рекристаллизации. В участках локального термического разогрева, обусловленного пластическими деформациями, происходила вторичная рекристаллизация отжига с образованием регенерированных оливинитов.

Оливины в дунитах и гарцбургитах обоих массивов по химическому составу отвечают форстериту ($Fa=5,18-10,89\%$). Отмечается тенденция к уменьшению железистости оливина в порфирикластовых дунитах, что, очевидно, свидетельствует о синтетектонической рекристаллизации, протекавшей в окислительных условиях. Оливин в оливинитах отличается от дунитов и гарцбургитов минимальной железистостью ($Fa=0.8-1.6\%$). Для оливина из хромититов отмечается тенденция к снижению железистости по сравнению с рудовмещающими дунитами и оливинитами. Хромшпинелиды в дунитах и гарцбургитах соответствуют алюмохромитам и хромитам, редко – хромпикотитам, в оливинитах – хромитам и хромистым магнетитам, в хромититах – алюмохромитам и хромитам. Наблюдаемые отличия в химическом составе минералов, очевидно, связаны с неравномерной степенью деплетирования ультрамафитов, с последующей неоднородностью их пластического деформирования и с вторичной рекристаллизацией отжига.

Проведенные петрохимические исследования показывают, что наименее деплетированными являются ультрамафиты Эргакского массива с лерцолитовым уклоном, которые часто содержат клинопироксен и по своему составу оказываются наиболее близкими Кемпирсайскому хромитоносному массиву. В Калнинском массиве степень деплетирования ультрамафитов возрастает, в нем значительным распространением пользуются дуниты, в ультрамафитах отсутствует клинопироксен. Они по своему составу приближаются к наиболее истощенным ультрамафитам Оспинского массива. При этом в ряду массивов: Кемпирсайский–Эргакский–Калнинский–Оспинский – отмечается тенденция к уменьшению содержаний РЗЭ в ультрамафитах, свидетельствующая о том, что от первого к последнему они становятся более деплетированными.

Детальное структурно-петрологическое исследование ультрамафитов с установлением взаимоотношений и последовательности формирования деформационных структур, а также анализ вещественных преобразований пород и минералов позволили выделить три этапа их деформационной истории: доконсолидационный, синконсолидационный, постконсолидационный.

Доконсолидационный этап включает мантийно-метаморфическую эволюцию дунит-гарцбургитового комплекса, в котором выделяются две стадии пластических деформаций. В первую стадию пластическое течение ультрамафитов протекало в динамически активной зоне в верхней мантии. В процессе реализации этой стадии образуются пластически деформированные среднезернистые дуниты и гарцбургиты. Пластические деформации оливина осуществлялись, главным образом, высокотемпературным трансляционным скольжением и поверхностной диффузионной ползучестью. Пластические деформации этого этапа протекали в режиме снижения температур от 1000 °С до 750 °С, низкой скорости (менее 10^{-6} с⁻¹), значительного всестороннего давления (более 10 кбар), в условиях осевого сжатия. В результате образуются дуниты с равновесной среднезернистой микроструктурой. На этом этапе, вероятно, происходило формирование хромитового оруденения в дунитах в зонах интенсивного высокотемпературного послонного пластического течения, способствующего сегрегации хромшпинелидов в линейные зоны с образованием вкрапленных руд.

На второй стадии прогрессивного метаморфизма, при дальнейшем повышении температуры, пластические деформации сменяются первичной статической рекристаллизацией отжига, которая способствовала росту свободных от дислокаций зерен оливина за счет поглощения неблагоприятно ориентированных. В результате формируются дуниты с крупнозернистой протогранулярной микроструктурой. При этом оптическая ориентировка зерен оливина контролируется, главным образом, внешним полем напряжения.

Синконсолидационный этап формирования ультрамафитов сопровождался образованием порфирокластовых деформационных микроструктур оливина в дунитах и гарцбургитах, при возрастающей роли механизма синтетектонической рекристаллизации. Характерной чертой этих структур является отчетливо выраженная линейно-плоскостная минеральная ориентировка (директивность). Пластические деформации ультрамафитов на этом этапе протекали в условиях интенсивных осевых и сдвиговых деформаций при значительном интервале температур (~800-650°С), при значительных скоростях ($\epsilon > 10^{-4}$ с⁻¹) и всестороннем давлении (~5 МПа) в процессе перемещения ультрамафитов, по зонам глубинных надвигов, в верхние части земной коры.

Постконсолидационный этап обусловлен метаморфическими изменениями ультрамафитов в результате термического воздействия на них более молодых интрузий габброидов. Этот этап наиболее отчетливо проявлен в Эргакском массиве. В результате пластически деформированные ультрамафиты подвергаются вторичной рекристаллизации отжига, с образованием регенерированных оливинитов без признаков пластических деформаций. Вторичная рекристаллизация отжига протекала при температурах (Т~ 450-500°С), медленной скорости ($\epsilon < 10^{-6}$ с⁻¹) и низкий стресс (10-20 МПа). Регрессивный метаморфизм способствовал серпентинизации, оталькованию и амфиболизации ультрамафитов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование показало, что изученные ультрамафиты Западного Саяна отражают длительную и сложную структурно-вещественную эволюцию вещества верхней мантии.

Формирование дунит-гарцбургитового комплекса осуществлялось в активной динамической обстановке, способствовавшей образованию полосчатых структур. Установленные типы петроструктур оливина и энстатита отражают условия высокотемпературной пластической деформации механизмом внутрикристаллического скольжения.

В процессе перемещения ультрамафитовых тел на уровни консолидации, в земной коре устанавливается возрастание роли механизма синтетектонической рекристаллизации, действующего в обстановке понижения температуры. В этих условиях течение вещества ультрамафитов осуществляется совместно с породами их обрамления, что приводит к созданию конформных деформационных структур.

На заключительном постконсолидационном этапе ультрамафиты подвергались как регрессивному, так и прогрессивному метаморфизму, соответственно серпентинизации и вто-

ричной оливинизации, без существенного изменения внутренней деформационной структуры массивов.

Полученные данные позволяют идентифицировать деформационные структуры ультрамафитовых массивов и выделять структуры благоприятные для локализации хромитового оруденения.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В журналах и изданиях рекомендованных ВАК РФ:

1. **Кичеева А. В.** Связь химизма и рудоносности Калнинского массива (Западный Саян) / **А. В. Кичеева**, А. И. Чернышов, И. Ю. Лоскутов И.Ю // Вестн. том. ун-та. – 2015. – № 400. – С. 366-370.

2. **Кичеева А. В.** Петроструктурные неоднородности ультрамафитов Эргакского хромитоносного массива (СВ Западного Саяна) / **А. В. Кичеева**, А. И. Чернышов, М. Ю. Подлипский // Записки Российского минералогического общества. – 2016. – № 5. – С. 25-38.

3. **Кичеева А. В.** Потенциальная хромитоносность ультрамафитов Эргакского массива (Северо-Восток Западного Саяна) / **А. В. Кичеева** [и др.] // Руды и металлы. – 2018. – № 1. – С. 47-53.

В других журналах и изданиях:

1. **Кичеева А. В.** Особенности минералогического состава ультрамафитов и хромититов Эргакского массива (Северо-восточная часть Западного Саяна) // Металлогения древних и современных океанов–2015. Месторождения океанических структур: геология, минералогия, геохимия и условия образования. Научное издание. – Миасс: ИМин УрО РАН, 2015. – С. 86-89.

2. **Кичеева А. В.** Распределение редкоземельных элементов в хромитоносных ультрамафитах Западного Саяна (СВ Западного Саяна) / **А. В. Кичеева**, А. И. Чернышов, М. Ю. Подлипский // Вопросы естествознания. – Иркутск: ИГХ СО РАН, 2015. – № 4. – С. 59-62.

3. **Кичеева А. В.** Петроструктурные особенности дунитов и оливинитов Эргакского массива / **А. В. Кичеева**, А. И. Чернышов, М. Ю. Подлипский // Байкальская молодежная научная конференция по геологии и геофизике: Материалы III всероссийской молодежной научной конференции. – Улан-Удэ, 2015. – С. 15-17.

4. **Кичеева А.В.**, Юричев А.Н. Рудная минерализация ультрамафитов Калнинского хромитоносного массива (Западный Саян) // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XX Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых. Том I; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2016. С. 151-152.

5. **Кичеева А. В.** Петрографические и петрогеохимические особенности хромитоносных ультрамафитов Куртушибинского офиолитового пояса (СВ Западного Саяна) / **А. В. Кичеева**, А. И. Чернышов // Петрология магматических и метаморфических комплексов. Материалы IX Всероссийской петрографической конференции с международным участием. – Томск: Изд-во Томского ЦНТИ, 2017. Вып. 9. – С. 192–198.