

Министерство образования и науки Российской Федерации  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)  
ГЕОЛОГО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

ДОПУСТИТЬ К ПРЕДСТАВЛЕНИЮ ГЭК  
Руководитель ООП

канд. геол.-минерал. наук, доцент

 Г. М. Татьянин

«06» 06 2018 г.

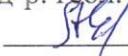
НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах подготовленной научно – квалификационной работы  
(диссертации)

ПЕТРОЛОГИЯ ХРОМИТОНОСНЫХ УЛЬТРАМАФИТОВ  
КАЛНИНСКОГО И ЭРГАКСКОГО МАССИВОВ (СВ ЗАПАДНОГО САЯНА)

по основной образовательной программе подготовки научно-педагогических кадров  
в аспирантуре  
направление подготовки 05.06.01 – Науки о Земле

Кичеева Анна Вячеславовна

Научный руководитель  
д-р. геол.-минерал. наук, профессор  
 А.И. Чернышов

«06» 06 2018 г.

Автор работы

аспирант

 А.В. Кичеева

Томск – 2018

## **ВВЕДЕНИЕ**

### **Актуальность диссертационного исследования**

Массивы ультрамафитов вызывают интерес геологов как с позиции генезиса, учитывая их мантийную природу образования и связь с ранними этапами развития складчатых сооружений, так и с позиции рудоносности. Ультраосновные породы являются источником рудных и нерудных полезных ископаемых – золота, элементов платиновой группы, никеля, меди, хрома, асбеста, драгоценных и поделочных камней. В связи с острым дефицитом легирующих добавок для черной металлургии в последние годы резко возрос интерес к изучению ультрамафитовых массивов как единственному источнику хрома.

Проявления хромовых руд в пределах Красноярского края известны на Енисейском кряже и в Западном Саяне. 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.** Выполнено комплексное петрологическое исследование ультрамафитов, результаты которых позволяют выявить эволюцию вещества верхней мантии, установить внутреннюю деформационную структуру, определить роль пластической деформации в локализации хромитовых тел.

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

### **Задачи исследования:**

- 1) Установить внутренне строение массивов;
- 2) Выделить главные петрографические разновидности пород, провести их петроструктурную типизацию;
- 3) Выявить петрогохимические особенности пород и установить закономерности их изменения;
- 4) Провести петроструктурный анализ оливина и энстатита с целью выявления механизмов пластического деформирования пород;
- 5) Установить роль пластических деформаций в локализации хромитоносности;
- 6) Предложить эволюционную модель формирования и пластического деформирования исследуемых хромитоносных ультрамафитов.

## **Объект исследований.**

Объектом изучения являются ультрамафиты Калнинского и Эргакского массивов, которые представляют собой фрагменты Куртушибинского оливинитового пояса, расположенного в северо-восточной части Западного Саяна.

**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 на Федоровском столике в 10 образцах гарцбургитов, дунитов и оливинитов. Изучение петрохимических особенностей пород проводилось на основе 50 оригинальных силикатных анализов, выполненных в Центре коллективного пользования «Аналитический центр геохимии природных систем» при Томском государственном университете и Институте геохимии СО РАН (г. Иркутск). Определение концентраций редкоземельных элементов Калнинского массива проводилось методом ICP-MS в Центре коллективного пользования «Аналитический центр геохимии природных систем» при Томском государственном университете, определение концентраций редкоземельных элементов Эргакского массива проводилось в Всесоюзном Институте Минерального Сырья (ВИМС) город Москва.

### **Защищаемые положения:**

1. Ультрамафиты в исследуемых массивах представлены породами дунит-гарцбургитового полосчатого комплекса. В них выделен широкий спектр деформационных и рекристаллизационных типов микроструктур (протогранулярный, мезогранулярный, порфиrokластовый, порфиролейстовый), которые отражают стадийность пластического деформирования пород. В Эргакском массиве выявлены оливиниты, которые возникли в результате вторичной рекристаллизации отжига.

2. Петроструктурным анализом установлено, что в мантийных условиях пластические деформации в дунитах и гарцбургитах осуществлялись преимущественно трансляционным скольжением при высоких температурах и низкой скорости. В процессе перемещения верхней части земной коры ультрамафиты претерпели интенсивные пластические деформации трансляционным скольжением с возрастанием роли синтектонической рекристаллизации в условиях снижения температур и возрастания скорости. На уровнях консолидации в результате прогрессивного метаморфизма претерпели вторичную рекристаллизацию отжига с образованием оливинитов, отличающихся отсутствием признаков пластического деформирования.

3. Калнинский и Эргакский массивы сложены в разной степени деплетированными ультрамафитами Куртушибинского оливинитового пояса. В Калнинском массиве они в

большой степени деплетированы и представлены породами дунит-гарцбургитовой ассоциацией. А в Эргакском ультрамафиты менее деплетированы и представлены породами дунит-гарцбургитовой ассоциацией с лерцолитовым уклоном.

**Благодарности.** Автор выражает особую благодарность за помощь в написании своему научному руководителю профессору кафедры петрографии Чернышову Алексею Ивановичу, а также научному сотруднику Института геологии и минералогии СО РАН (ИГиМ СО РАН) (г. Новосибирск) кандидату геолого-минералогических наук Подлипскому Максиму Юрьевичу за предоставленные образцы.

## 1 МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методика комплексного структурно-петрологического картирования магматических и метаморфических комплексов, специально разрабатываемая в течение многих лет на кафедре петрографии и в научно-исследовательской лаборатории структурной петрологии и минерагении Национального Исследовательского Томского государственного университета под руководством профессора А.И. Гончаренко, А.И.Чернышова, прошла апробацию на ультрамафитовых массивах Сибири, Урала и Казахстана (Гончаренко, Чернышов, 1980; Офиолитовая ассоциация..., 1982; Гончаренко, 1989; Строение..., 1990; Гончаренко и др., 1994; Чернышов и др. 1996 и др.).

Одна из важнейших задач изучения ультрамафитовых комплексов состоит в выделении генетических различий между слагающими массивы однотипными породами, а также в оценке соотношения процессов магматизма и метаморфизма в их формировании. Поэтому необходимость применения принципов структурно-петрологического исследования для ультрамафитовых комплексов офиолитовых ассоциаций представляется очевидным и несомненно расширит диапазон знаний об эволюции структуры и состава вещества верхней мантии на уровнях зарождения, перемещения и консолидации в земной коре.

Методами структурного картирования плоскостных и линейных элементов выявляется внутреннее анизотропное строение ультрамафитовых массивов. Картирование ультрамафитовых массивов сопровождалось взятием ориентированных образцов, частота отбора которых зависит, главным образом, от объективного фактора - степени обнаженности исследуемого объекта. В полевых исследованиях проводились массовые замеры плоскостных и линейных элементов структур пластического течения. Особое внимание уделялось изучению полосчатости, гнейсовидности (струйчатости), кливажу, сланцеватости, линейной ориентировке минералов.

Методика геометрического анализа ориентированных образцов (Чернышов, 1996; Nicolas, Poirier, 1976) позволяет выявить в них плоскость минеральной уплощенности и линейность. Плоскостные элементы существенно дополняют полевые замеры структурных элементов, а нередко в массивах с неразвитыми текстурами оказываются единственными.

Микроструктурным анализом выявлены ориентировки минералов по внутреннему строению. Их сопоставление с ориентировками по форме и анализ связей петроструктуры с элементами внутреннего строения массивов дает возможность получить информацию о механизмах деформации пород.

Изучение вещественного состава пород проводилось по результатам *силикатного анализа* по 50 оригинальным пробам, выполненных в Центре коллективного пользования «Аналитический центр геохимии природных систем» при Томском государственном университете. Определение концентраций редкоземельных элементов Калнинского массива (31 анализа) проводилось методом ICP-MS в Центре коллективного пользования «Аналитический центр геохимии природных систем» при Томском государственном университете, определение концентраций редкоземельных элементов Эргакского массива (19 анализов) проводилось в Всесоюзном Институте Минерального Сырья (ВИМС) город Москва. Установление распределения редких и РЗЭ элементов позволило получить представление о генезисе и источнике родоначального расплава исследуемых ультрамафитов.

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. Вещественный состав породообразующих минералов установлен на основании микрорентгеноспектральных определений, выполненных на электронном сканирующем микроскопе Tescan Vega II LMU с полупроводниковым Si(Li) детектором INCA x-sight в ЦКП «Аналитический центр геохимии природных систем» Томского государственного университета.

## 2 ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ЗАПАДНОГО САЯНА

Калнинский и Эргакский массивы располагаются в северо-восточной части Западного Саяна. В геологическом отношении массивы приурочены к северо-восточному окончанию Куртушибинского офиолитового пояса (рисунок 1). Офиолитовые пояса

слагаются идентичным петрографическим набором пород: ультрамафитами актовракского комплекса позднего рифея и вулканогенно-осадочными отложениями чингинской серии венд-нижнекембрийского возраста.

По данным Н.Л. Добрецова, в пределах Куртушибинского оphiолитового пояса, устанавливается первично субслоистое строение меланократового разреза оphiолитов, который имеет следующее строение (снизу вверх): дунит-гарцбургитовая (более 3 км), переходная перидотит-пироксенит-габбровая (0,2-0,3 км), габброидная (1-1,5 км) и габбро-диабазовая (1-2 км) зоны (Петрология ..., 1977).

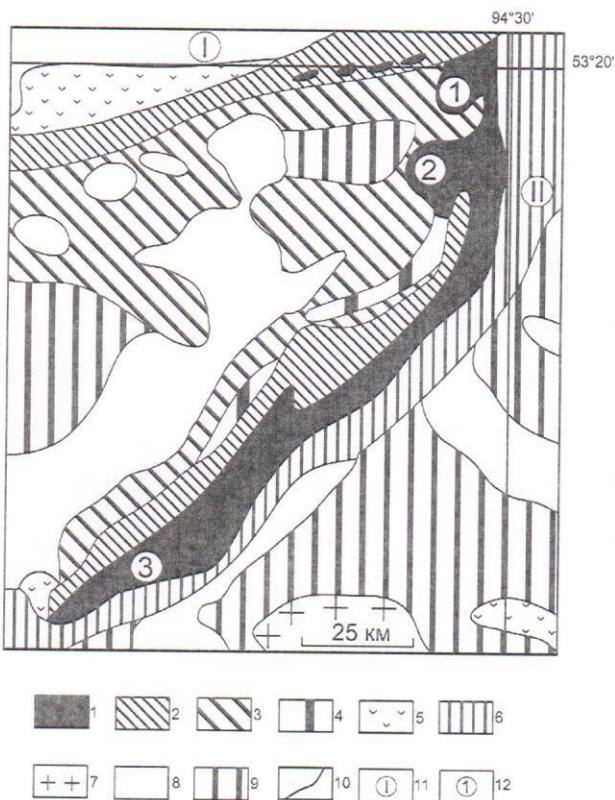


Рисунок 1 – Офиолитовые пояса Западного Саяна (Петрология ..., 1977).  
 1–офиолиты: ультрамафиты и габброиды;  
 2–чингинская кремнисто-базальтовая толща (Rf-V); 3–джебашская метаморфическая серия, зеленосланцевая зона; 4–глаукофановые сланцы (акольская формация и ее аналоги);  
 5–нижнекембрийские вулканогенные толщи (андезит-базальтовые и смешанного состава);  
 6–ишканско-аласугская (Cm<sub>2,3</sub>) и нижнеордовикская туфогенно-флишоидная серия;  
 7–средне-, верхнекембрийские гранитоиды (майнский комплекс);  
 8–позднеордовикский–раннесилурский этаж (включая гранитоиды большепорожского комплекса); 9–наложенные вулканогенные и угленосные прогибы (D<sub>1</sub>-C<sub>1</sub>); 10–прочие геологические границы; 11–офиолитовые пояса: I–Северо-Саянский, II–Куртушибинский; 12–Массивы: 1–Эргакский, 2–Калгинский, 3–Иджимский.

В геологическом строении данного района принимают участие разнообразные метаморфические, осадочные и магматические образования с возрастом от верхнего протерозоя до отделов палеозоя девонской системы. Выделяются верхнепротерозойские, рифейские, вендские, кембрийские, ордовикские, силурийские и девонские отложения.

### 3 ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ КАЛГИНСКОГО И ЭРГАКСКОГО МАССИВОВ

**Калгинский** ультрамафитовый массив имеет субизометричную форму, его площадь составляет, примерно 65 км<sup>2</sup> (рисунок 2). Массив является тектоническим блоком, сложенным метаморфическими перидотитами, который окружен тектоническим серпентинитовым меланжем (Чернышов, Юричев, 2013).

Массив представлен неравномерно рестрированными ультрамафитами. В его северо-восточной части преобладают дуниты. В юго-западной – массив сложен породами полосчатого дунит-гарцбургитового комплекса. Дуниты и гарцбургиты обычно слабо изменены вторичными процессами, лишь в приразломных зонах они обычно интенсивно

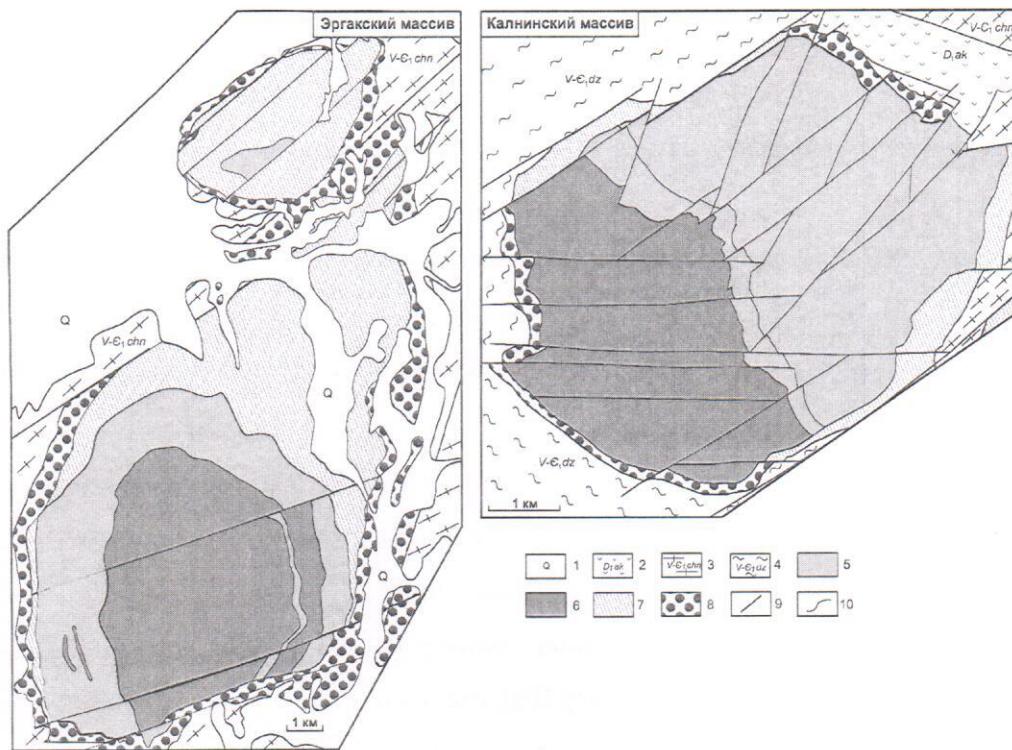


Рисунок 2 – Схема геологического строения Калнинского и Эргакского ультрамафитовых массивов (по Кривенко и др., 2002; Чернышов, Юричев, 2013 с дополнениями автора). 1–четвертичные аллювиальные отложения; 2–нижнедевонская актурурская свита: андезиты, трахиандезиты, лаво- и пирокластиты, реже трахиандезибазальты, андезибазальты, базальты; 3–венд-нижнекембрийская чингинская серия: базальты, трахибазальты, глинисто-кремнистые, углеродисто-глинисто-кремнистые, хлорит-кремнистые сланцы, микрокварциты, прослои и линзы метаалевролитов, метапесчаников, метагравелитов, метаконгломератов; 4–венд-нижнекембрийская джебашская серия: метабазальты, метаморфические сланцы кварцевые, серицит-альбит-кварцевые, хлорит-альбит-кварц-карбонатные, серицит-хлорит-кварц-альбитовые, прослои и линзы мраморов, кальцифиров; 5–дуниты; 6–гарцбургиты; 7–серпентиниты, серпентинизированные ультрамафиты нерасчлененные; 8–серпентиновый меланж; 9–разрывные нарушения, разломы; 10–геологические границы.

серпентининизированы. Среди дунитов и реже гарцбургитов установлены семь рудоносных зон полосчатых хромититов, имеющих северо-западное простижение (Сержантов и др., 2011ф). Среди ультрамафитов массива выявляются редкие дайкообразные тела ортопироксенитов, клинопироксенитов и мелкозернистых габбро.

Изучение распределение плоскостных структурных элементов в массиве позволили выявить некоторые закономерности их распределения (Чернышов, Юричев, 2013). Струйчатость ортопироксена в гарцбургитах имеет северо-западное простижение, преимущественно, с крутым падением на северо-восток. Она отражает внутреннюю структуру исходного полосчатого дунит-гарцбургитового субстрата. Струйчатость часто

подчеркивается трещинками кливажа с близким залеганием, которое устанавливается как в дунитах, так и гарцбургитах. Распределение струек и жилок хромшпинелидов в дунитах является аналогичным ориентировки струйчатости в гарцбургитах, что указывает на структурный контроль хромитового оруденения полосчатой структурой дунит-гарцбургитового комплекса массива. В зонах оруденения имеют отчетливое полосчатое строение, обусловленное чередованием безрудных ультрамафитов с вкрапленными хромититами от убого вкрапленных до густо вкрапленных. Зоны оруденения вытягиваются в северо-западном направлении согласно с полосчатой структурой массива, их мощность обычно не более 10-15 м. Ширина отдельных полосок обычно менее 10 см, нередко внутри них отмечается согласное директивное расположение как отдельных зерен хромшпинелидов, так и их агрегатов.

**Эргакский массив** имеет овальную форму с размерами 14×8 км и вытянут в субмеридиональном направлении. Тектоническим нарушением субширотного простирания массив разделен на два разновеликих блока: южный – Лысанский ( $\sim 75 \text{ км}^2$ ) и северный – Малоэргакский ( $\sim 10 \text{ км}^2$ ). Оба блока окружены тектоническим серпентинитовым меланжем.

**Лысанский блок** имеет концентрически-зональное строение (Перспективы..., 2002). В его строении принимают участие ультрамафиты дунит-гарцбургитового полосчатого комплекса. Отмечается ритмичное переслаивание дунитов и гарцбургитов, с преобладанием одних, либо других. В центральной части преобладают гарцбургиты, затем они сменяются зоной с преобладанием дунитов, а в краевых частях ультрамафиты преобразованы в серпентиниты. Среди гарцбургитов иногда отмечаются лерцолиты и верлиты. На Лысанском блоке известно пять наиболее представительных рудопроявлений хромититов (Перспективы..., 2002). Также отмечаются многочисленные участки, обогащенные хромшпинелидами. В коренном залегании среди дунитов и гарцбургитов хромититы встречаются в виде мелких шлиров и струйчатых обособлений. Мощность хромитовых зон составляет 20-80 м. В зонах серпентинитового меланжа хромититы встречаются в виде будин с размером до  $0,8 \times 1,2 \text{ м}$ , которые очевидно образовались в результате деструкции более крупных рудных тел в процессе тектонического скучивания. Содержание хромшпинелидов в хромититах значительно варьирует от убого вкрапленных (10–30 %) до густовкрапленных (до 90 %), вплоть до сплошных.

Анализ распределения элементов первичной полосчатости в ультрамафитах Лысанского блока (данные С. Г. Катанова) (Катанов и др., 2003ф) позволил выявить внутреннее строение массива, которая имеет чашеобразную структуру. При этом в восточной части залегание полосчатости варьирует от пологих до средних углов (до 40-

45°), а в западной обычно пологое (15-30°). Полясы полосчатости обнаруживают тенденцию к растягиванию по дуге малого круга с радиусом 56°, что позволяет установить складчатую внутреннюю структуру массива и отнести ее к коническому типу (Сыстра, 1978; Казаков, 1980). Ось складчатой структуры ( $\beta$ ) круто (под углом 60°) погружается на юго-восток (по азимуту 165°). В коренных обнажениях редко встречаются струйчатые обособления хромшпинелидов и мелкие шлиры вкрапленных хромититов. Их залегание согласно ориентировки полосчатости во вмещающих дунитах и гарцбургитах, что указывает на рудоконтролирующую роль исходной полосчатой структуры дунит-гарцбургитового комплекса Лысанского блока.

*Малоэргакский блок*, по сравнению с Лысанским, гораздо меньших размеров, имеет овальную форму и вытянут в северо-восточном направлении. В его строении принимают участие породы полосчатого дунит-гарцбургитового комплекса, которые интенсивно преобразованы в регенерированные серпентин-оливиновые ультраметаморфиты и оливиниты (Кривенко и др., 2005). По периферии блока располагается зона серпентинитового меланжа шириной до 0,25 км. В этом блоке выявлены два рудопроявления хромититов. Они представлены убого-, редко- и средневкрапленными хромититами и локализованы среди регенерированных ультраметаморфитов и оливинитов, которые сложенные крупными (до 4×6 мм) зернами оливина.

В Малоэргакском блоке полосчатость погружается под средними и небольшими углами. При этом поляса полосчатости концентрируются по дуге малого круга с радиусом 45°, что также позволяет отнести внутреннее строение этого блока к складчатой структуре конического типа (Сыстра, 1978). Ось складчатой структуры ( $\beta$ ) является субвертикальной и под крутым углом 83° погружается на юго-запад. Коренные хромитовые оруденения приурочены к западной эндоконтактовой зоне Малоэргакского блока и представлены мелкими прожилками вкрапленных хромититов мощностью до 8 см. Они имеют северо-восточное простирание и также контролируются внутренней полосчатой структурой массива.

#### 4 ПЕТРОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА УЛЬТРАМАФИТОВ

Изученные ультрамафиты относятся к дунит-гарцбургитовой ассоциации. Дуниты и гарцбургиты относятся к метаморфическим ультрамафитам, претерпевшие интенсивные преобразования в результате их пластического деформирования и рекристаллизации, а также серпентиниты и оливин-серпентиновые ультраметаморфиты, для которых характерны признаки метаморфических пород (Чернышов, Юричев, 2013; Чернышов и

др., 2016). При этом тела хромититов устанавливаются как среди дунитов, так и среди гарцбургитов. В Эргакском массиве в отличие от Калнинского, заметным распространением пользуются оливиниты.

Среди ультрамафитов Калнинского и Эргакского массивов нами выделены следующие основные микроструктурные типы: протогранулярный, мезогранулярный, порфиокластовый и гранобластовый, очередьность 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 (рисунок 3а) и незначительная степень деформации. Протогранулярный тип обладает наименьшей удельной поверхностью зерен оливина, которые имеют незначительную предпочтительную ориентировку по форме. Для оливина характерна субизометрическая форма с округлыми и заливообразными контурами. В тройных точках сочленения границы зерен образуют углы  $\sim 120^\circ$ , что свидетельствует об их формировании в твердом субстрате (Вернон, 1970).

**Мезогранулярный тип** микроструктуры пользуется значительным распространением как среди ультрамафитов Калнинского, так и Эргакского массивов. Он возникает на месте пород с протогранулярным типом микроструктуры, между ними отмечаются переходные разности. Для дунитов и гарцбургитов с мезогранулярным типом характерна гранобластовая микроструктура, возникающая в результате "распада" крупных зерен оливина на равновесный среднезернистый агрегат индивидов оливина, что находит отражение в увеличении удельной поверхности зерен оливина. Зерна оливина субизометрические, часто удлиненной формы, их размер по длине 1,5-4 мм, при ширине 1-2 мм. Удлиненные индивиды оливина ориентируются субпараллельно, что способствует выявлению заметной степени ориентации зерен оливина в породах. Степень ориентации определяется формой и ориентировкой зерен.

**Порфиокластовый тип** пользуется наиболее значительным распространением среди дунитов и гарцбургитов Эргакского массива. Этот тип возникает на местеproto-, либо мезогранулярного типа в результате интенсивной синтектонической рекристаллизации. Он характеризуется наличием порфиокластовых зерен оливина (рисунок 3в) и мозаичного агрегата мелких индивидов оливина, количественные соотношения между которыми определяются степенью синтектонической рекристаллизации.

Порфиокласты имеют субизометрическую, часто удлиненную форму, их размер по длиной оси составляет 1,5-3 мм при ширине 0,5-1,5 мм. Удлиненные индивиды обычно

ориентируются субпараллельно с образованием наложенной директивности и структура становится *порфиролейстовой*. Удельная поверхность порфирокластовых зерен близка зернам оливина мезогранулярного типа и возрастает в порфиролейстовом.

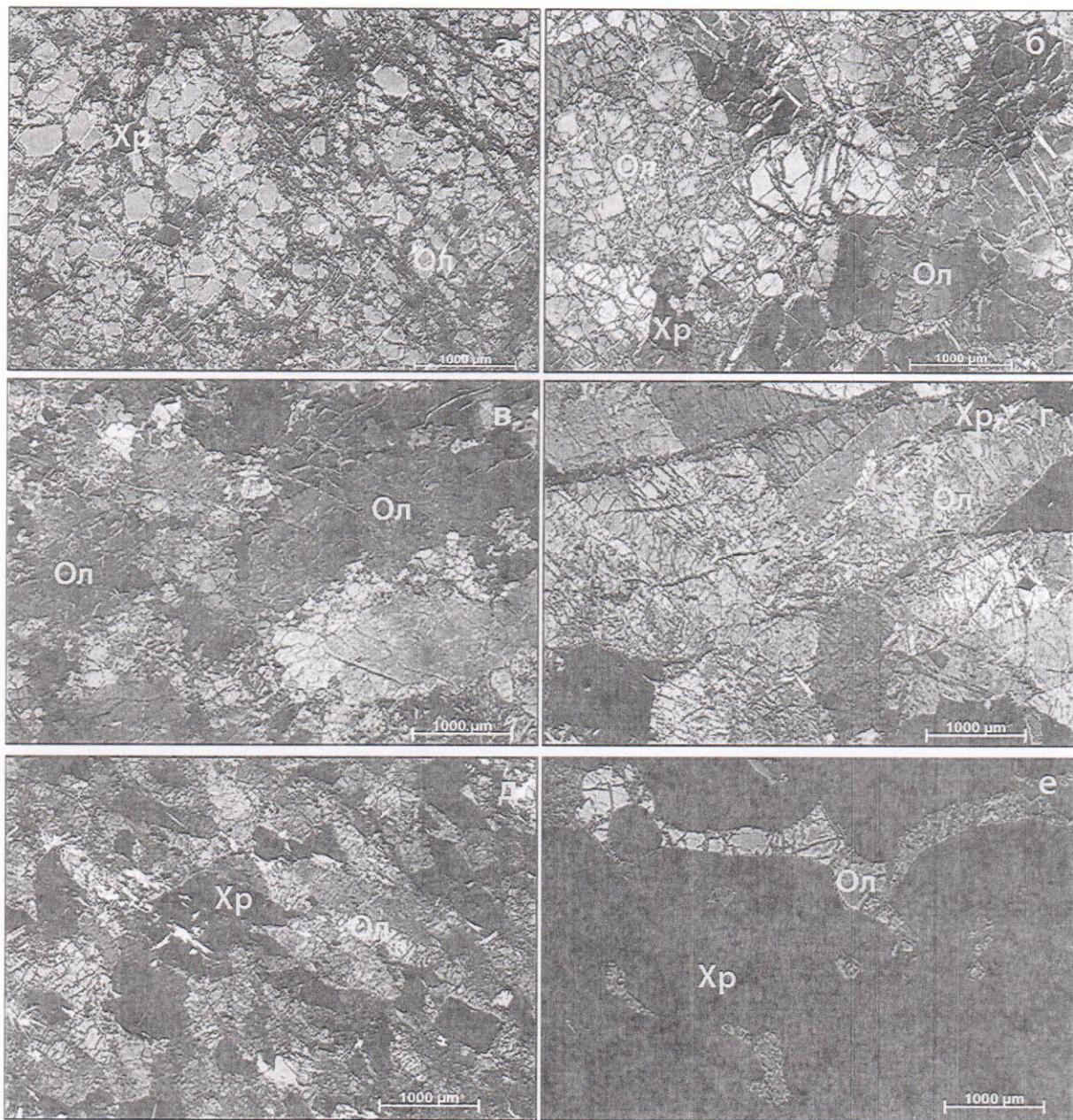


Рисунок 3 – Фотографии шлифов в ультрамафитах Калнинского (а, б) и Эргакского (в, г, д, е) массивов. а–протогранулярный дунит (Обр. 7037); б–гарцбургит с отчетливыми признаками пластических деформаций и порфирокластеза зерен оливина (Обр. 7073); в–дунит порфирокластовый (Обр. Эр-220); г–оливинит с гранобластовой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

Мозаичный синтектонически рекристаллизованный агрегат состоит из мелких субизометрических, реже слабоудлиненных зерен оливина с размерами чаще менее 0,5 мм, для которых характерна очень большая удельная поверхность. Степень ориентации мелких индивидов очень незначительная и редко становится заметной. В мелких зернах также отмечается неоднородное погасание и полосы излома.

**Гранобластовый** тип образуется при вторичной рекристаллизации отжига по мезогранулярному и порфирокластовому типам (рисунок 3г). В результате отжига признаки пластического деформирования (неоднородное погасание, полосы излома) полностью утрачиваются. Порода приобретает структуру равновесного гранобластового агрегата, при этом для зерен оливина устанавливается однородное погасание. Для гранобластового типа характерно наличие разнообразных по форме зерен оливина, среди которых встречаются призматические, субизометричные, треугольные, трапецевидные. Размер зерен колеблется от 1 до 3 мм, достигая 5 мм и более. Иногда удлиненные небольшие по размерам зерна оливина обнаруживают предпочтительную ориентировку по форме и отражают направление директивности в породе. В таком 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 (рисунок 3е). Текстура однородная либо полосчатая, обусловленная различной насыщенностью хромшпинелидами. Зерна хромшпинелидов обнаруживают как равномерное, так и неравномерное распределение в виде полосчатых субпараллельных обособлений. Зерна хромшпинелидов наблюдаются в виде отдельных обособленных индивидов, либо их сросшихся агрегатов. Форма зерен субизометрична, нередко неправильная угловатая, либо удлиненная, их размер составляет от 0,5 до 2-3 мм, а агрегатов до 5-10 мм. При этом удлиненные индивиды и агрегаты вытягиваются согласно полосчатости. Промежутки между зернами хромшпинелидов выполнены интенсивно серпентинизированным оливином, либо петельчатым агрегатом лизардита, полностью заместившим оливин.

### **Особенности минералогического состава ультрамафитов**

#### **Оливины**

Оливины из гарцбургитов и дунитов обоих массивов имеют близкие составы. По химическому составу оливин соответствует форстериту: в гарцбургитах  $Fa=7,07-10,89\%$ , в дунитах  $Fa=5,18-9,32\%$ . Содержания  $NiO$  в оливине являются близкими и составляют  $0,28-0,54\%$ .  $CaO$  и  $MnO$  обычно не выявляются в оливине, что возможно, связано с их интенсивным рестированием.

В оливинитах Эргакского массива оливин по химическому составу соответствует практически форстериту с минимальной железистостью ( $Fa=0,78-2,81\%$ ). Содержание  $NiO$  в оливинитах схоже с дунитами ( $0,36-0,53\%$ ).  $CaO$  и  $MnO$  также обычно не выявляются в оливине.

*В хромититах* Эргакского массива в оливине отмечается тенденция к снижению железистости ( $Fa=6,29\%$ ), при этом содержание  $NiO$  возрастает до  $1,14\%$ .  $CaO$  и  $MnO$  в оливине из хромититов не обнаружены.

### **Пироксены**

*Ортопироксены.* Химический состав ортопироксенов в гарцбургитах Калнинского и Эргакского массивов соответствует энстатиту с железистостью  $7,83-13,81\%$ . Однако энстатиты Калнинского массива отличаются от Эргакского тенденцией снижения содержаний  $Al_2O_3$ ,  $Cr_2O_3$ , что, очевидно, подтверждает большую степень деплетирования ультрамафитов Калнинского массива.

*Клинопироксены* были установлены только в ультрамафитах Эргакского массива. Химический состав клинопироксенов соответствует диопсиду (Трегер, 1980) с железистостью  $5,68\%$ . Существенное преобладание  $Al^{VI}$  над  $Al^{IV}$  указывает на образование диопсида в условиях высокого давления (Малахов, 1983).

### **Хромшпинелиды**

В гарцбургитах Калнинского массива хромшпинелиды имеют незначительные вариации химического состава, в дунитах – отличаются большей вариацией. Хромшпинелиды из гарцбургитов, дунитов и хромититов Эргакского и Калнинского массивов обнаруживают сходство.

*В гарцбургитах* хромшпинелиды Калнинского массива по химическому составу соответствуют хромитам и алюмохромитам (рисунок 4). Они отличаются от хромшпинелидов из гарцбургитов Эргакского массива меньшей глиноземистостью и магнезиальностью, и соответственно, большей железистостью и хромистостью.

Хромшпинелиды из дунитов как Калнинского, так и Эргакского массивов соответствуют хромитам, хромпикотитам и алюмохромитам. Для хромшпинелидов из дунитов характерны значительные вариации железистости: в Калнинском массиве от  $2,5$  до  $4,2\%$ ; в Эргакском массиве от  $0,9$  до  $2,0\%$ . Содержание  $Cr_2O_3$  и  $Al_2O_3$  в дунитах Калнинского массива заметное, соответственно,  $54,02-61,72\%$  и  $7,42-14,83\%$ , при этом в дунитах Эргакского массива наблюдается незначительное увеличение  $Cr_2O_3$  ( $25,48-63,88\%$ ) и существенное увеличение  $Al_2O_3$  ( $8,55-42,06\%$ ).

*В оливинитах* по химическому составу хромшпинелиды попадают в поле хромитов и магнетитов (рисунок 4). Наблюдаются значительные вариации железистости от  $0,7$  до  $5,0\%$ . Для них отмечается высокая хромистость ( $61,36-64,87\%$ ) и низкое содержание  $Al_2O_3$  ( $5,32-6,76\%$ ) по отношению к дунитам.

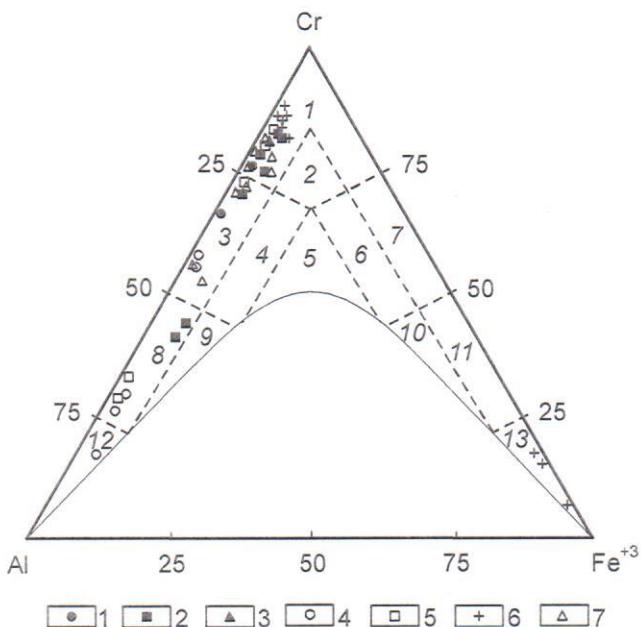


Рисунок 4 – Составы хромшпинелидов и магнетитов из ультрамафитов Калнинского и Эргакского массивов на классификационной диаграмме (Павлов, 1949). Калнинский массив: 1–гарцбургиты, 2–дуниты, 3–хромититы. Эргакский массив: 4–гарцбургиты, 5–дуниты, 6–оливиниты, 7–хромититы. Поля на диаграмме: 1–хромит,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

В хромититах хромшпинелиды Калнинского и Эргакского массивов имеют близкий состав и они отличаются от хромшпинелидов из вмещающих дунитов большей железистостью и меньшей хромистостью.

## 5 ОСОБЕННОСТИ ПЕТРОГЕОХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА УЛЬТРАМАФИТОВ

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

Изученные ультрамафиты характеризуются значительными вариациями содержаний петрогенных элементов, одни из которых на бинарных диаграммах не обнаруживают между собой какой-либо зависимости, а для других она отчетливо устанавливается. В первом случае figurативные точки составов ультрамафитов формируют плотный рой точек (рисунок 5а). 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  $MgO-Al_2O_3$  figurативные точки составов ультрамафитов образуют линейные тренды (рисунок 5б), 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 figurативные точки ультрамафитов Калнинского массива располагаются преимущественно во фронтальной части тренда, что свидетельствует об их большей степени деплелирования по сравнению с Эргакскими. Наблюдается сближенность figurативных точек ультрамафитов Калнинского и Оспинского массивов.

На диаграммах  $\text{Al}_2\text{O}_3$ – $\text{CaO}$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ – $\text{FeO}_{\text{tot}}$  figurативные точки составов формируют по два эволюционных тренда. Тренд I образуют преимущественно figurативные 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 деплелированного лерцолит-гарцбургитового парагенеза, при этом тренд II охватывает ультрамафиты более деплелированного дунит-гарцбургитового парагенезиса. Подобная неоднородность деплелирования мантийного субстрата отмечалась в ультрамафитовых массивах Полярного Урала (Шмелев, 2009). Меньшая степень деплелирования ультрамафитов Эргакского массива подтверждается присутствием в них моноклинного пироксена, количество которого варьирует от единичных зерен до заметных содержаний в лерцолитах (Кривенко и др., 2004).

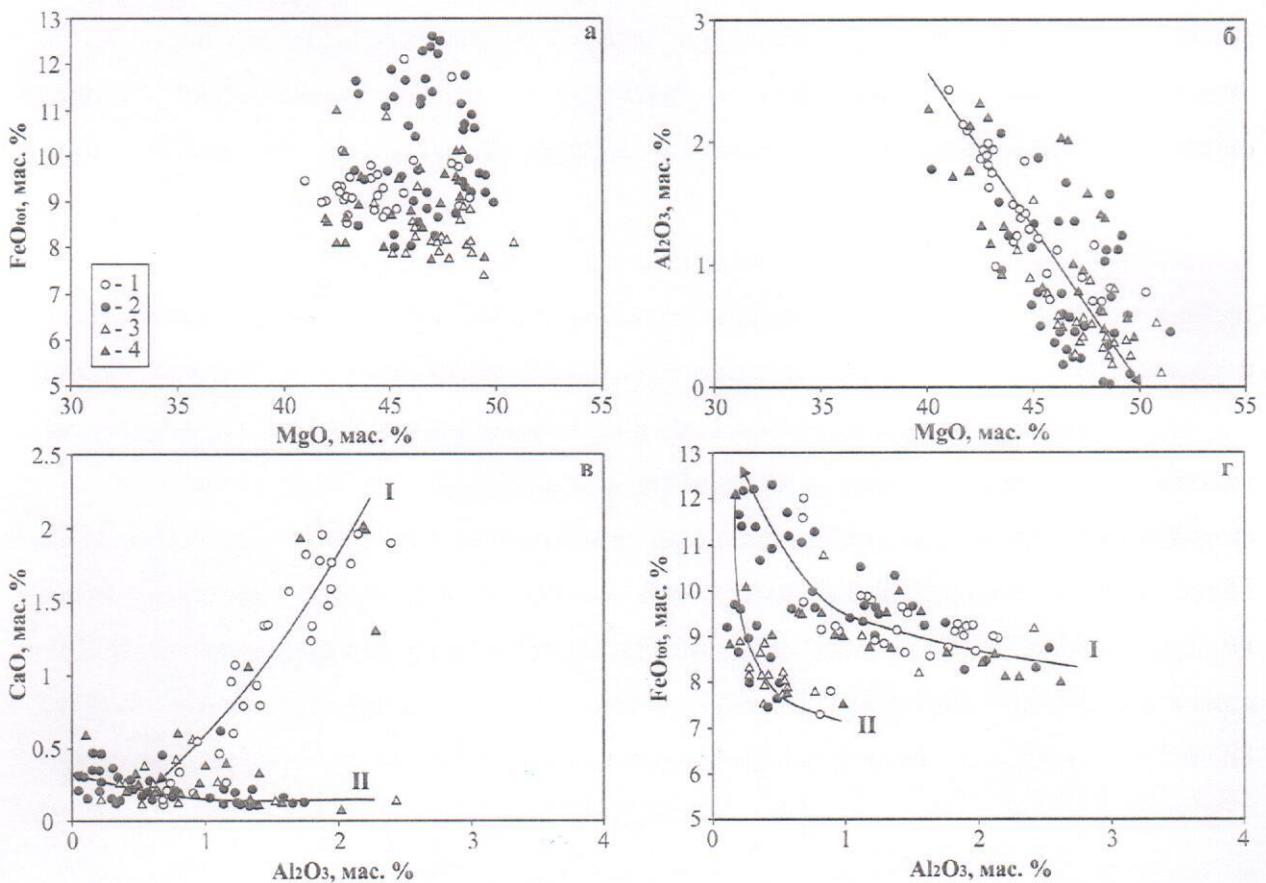


Рисунок 5 – Бинарные диаграммы для ультрамафитов Куртушибинского оphiолитового пояса.  
1–Эргакский массив, 2–Калнинский массив и их сравнение с эталонными оphiолитовыми массивами, 3–Оспинский, Восточный Саян, 4–Кемпирсайский, Южный Урал.

**Анализ распределения РЗЭ** в исследуемых массивах проводился также в сравнении с хромитоносным Кемпирсайским массивом и нехромитоносным Оспинским.

**Гарцбургиты** исследуемых массивов в сравнении с дунитами и хромититами обладают наиболее высокими содержаниями РЗЭ при однотипном характере их распределения (рисунок 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: Тб, Но и слабый Тм отрицательные пики. Природа данных отрицательных аномалий, очевидно, заключается в большей степени деплетированности гарцбургитов Калнинского массива. Ортопироксениты Калнинского массива характеризуются практически идентичным распределением лантаноидов и сопоставимым уровнем содержаний с гарцбургитами.

Средние и тяжелые РЗЭ в гарцбургитах обоих массивов имеют одинаковое распределение с гарцбургитами Оспинского 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.

**Дуниты** в обоих исследуемых массивах по морфологии обнаруживают близкие тренды распределения РЗЭ с гарцбургитами. Однако по содержанию РЗЭ дуниты Калнинского массива отличаются от Эргакского ( $(La/Yb)_n=7.4-22.2$  – Калнинский массив;  $(La/Yb)_n=4.3-10.8$  – Эргакский массив). Для дунитов Калнинского массива выделяются два типа трендов. Первый тип по морфологии и содержанию РЗЭ практически аналогичен тренду в гарцбургитах. Второй тип отличается меньшими концентрациями легких и средних лантаноидов. Для него отмечается отрицательная Eu-аномалия (рисунок 6). Этот тип, очевидно, обусловлен более существенной степенью деплетирования мантийного субстрата. Для дунитов Эргакского массива устанавливается распределение РЗЭ, близкое первому типу калнинских дунитов.

Первый тип распределения РЗЭ в дунитах исследуемых массивов оказывается близким менее деплетированным дунитам и гарцбургитам Кемпирсайского массива. При этом второй тип распределения РЗЭ в дунитах является наиболее близким тренду интенсивно деплетированных дунитов Оспинского массива.

**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. В то время как состав оливина в этих породах в процессе рекристаллизации резко изменяется, практически до форстерита.

**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 (рисунок 6).

Таким образом, для сравниваемых объектов на диаграммах отчетливо прослеживается одинаковый характер распределения РЗЭ, который характеризуется уменьшением от легких к средним и одинаковыми концентрациями средних и тяжелых. Следует отметить, что ультрамафиты Кемпирсайского массива заметно отличаются от Оспинского более высокими концентрациями РЗЭ, что, очевидно, свидетельствует о более высокой степени деплетирования ультрамафитов последнего.

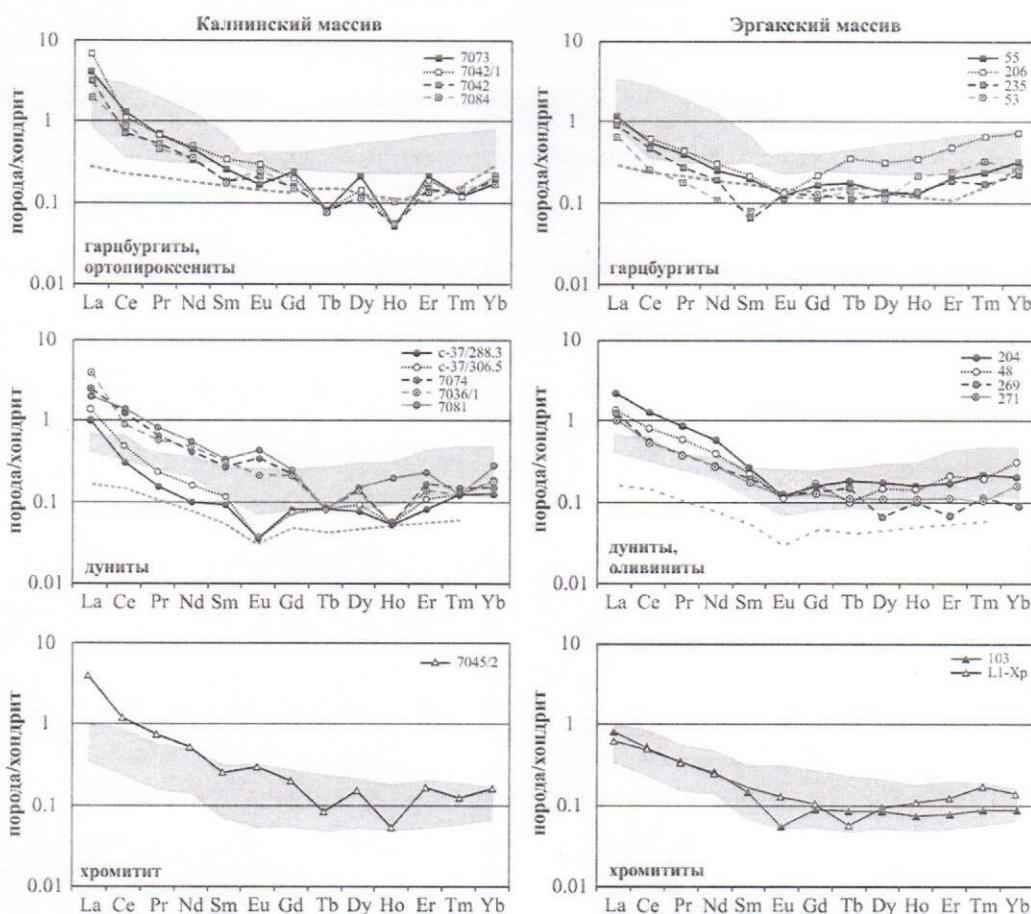


Рисунок 6 – Редкоземельные спектры ультрамафитов Калнинского и Эргакского массивов, нормированные к хондриту (Boydton, 1984). Для сравнения на графики вынесены составы аналогичных ультрамафитов Кемпирсайского массива Южного Урала (серое поле) и усредненные спектры составов дунитов и гарцбургитов Оспинского массива Восточного Саяна (серая пунктирная линия).

## 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 его 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  $900^\circ$ ), умеренной и высокой скорости ( $10^{-5} \text{с}^{-1}$  –  $10^{-2} \text{с}^{-1}$ ) и низкого всестороннего давления ( $\approx 5$  кбар). При этом трансляционное скольжение носило неоднородный характер и осуществлялось дискретно (Чернышов, Юричев, 2013). В результате зерна оливина в мезогранулярных гарцбургитах и дунитах приобретают характерное неоднородное волнистое погасание, характеризуются наличием многочисленных полос излома и, частично, подвергались порфиокластезу.

*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 ультрамафитов 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 (Николя, 1992; Чернышов, 2001). В результате формируются гарцбургиты и дуниты с крупнозернистой микроструктурой, плавными границами зерен оливина, часто сходящимися под углом  $120^\circ$ . Новообразованный оливин отличается отсутствием признаков пластических деформаций и имеет однородное погасание (Чернышов, 2001).

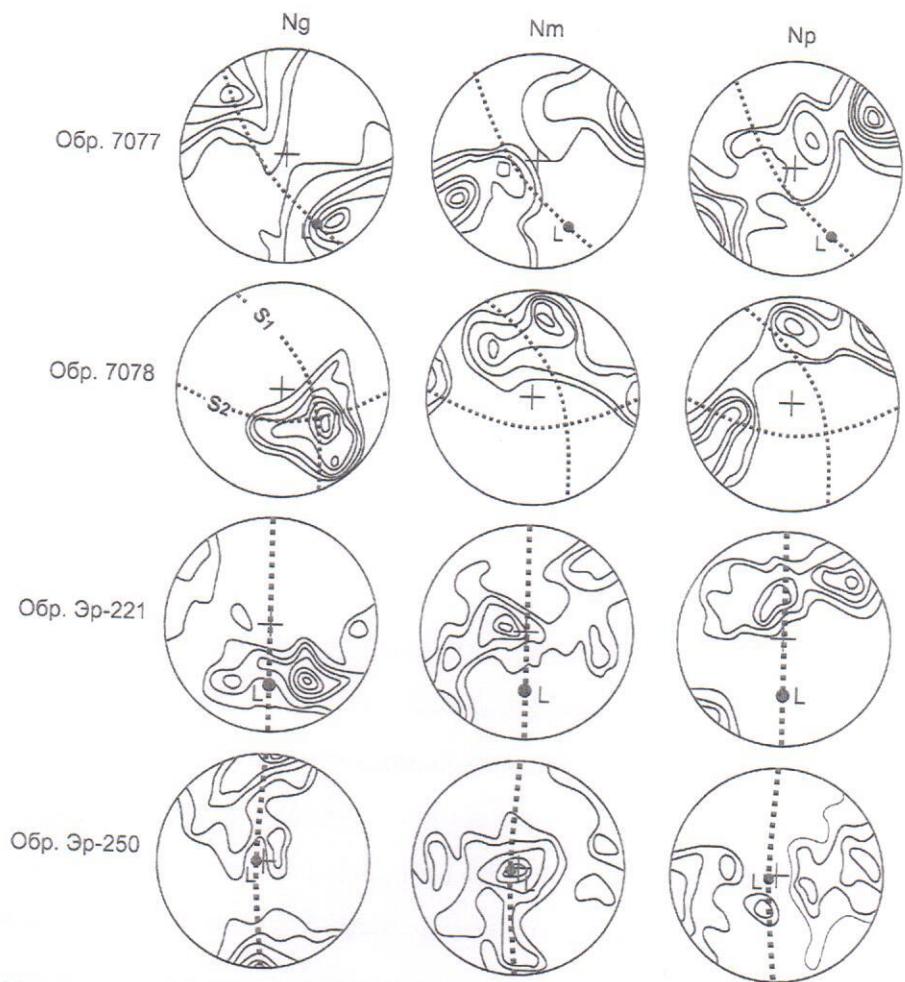


Рисунок 7 – Диаграммы ориентировки кристаллооптических осей оливина в гарцбургитах и дунитах Калнинского и Эргакского массивов. Диаграммы построены по 100 замерам кристаллооптических осей минералов. Изолинии: 1-2-4-6-8-10-12-14-16 % на 1 % сетки Шмидта. Проекция на верхнюю полусферу. Точечные линии–плоскость пластического течения S ( $S_1$ –полосчатость,  $S_2$ –кливаж), L–линейность. Калнинский массив: Обр. 7077–мезогранулярный гарцбургит, Обр. 7078–протогранулярный дунит. Эргакский массив: Обр. Эр-221–порфиролейстовый дунит, Обр. Эр-250–гранобластовый оливинит.

Петроструктурный узор оливина в дунитах с *порфирокластовой структурой* в Эргакском массиве обусловлен активизацией трансляционного скольжения по системе  $\{0kl\}[100]$ , осуществляемого в двух направлениях (Чернышов, 2001). При этом одно из направлений является доминирующим и ориентируется преимущественно согласно с направлением наложенного сдвига. Второе направление трансляции располагается под углом 60-90° к плоскости сдвига. Последовательное увеличение степени деформации с возрастанием угла сдвига до 40-60° 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 такого петроструктурных узоров, очевидно, осуществлялось в зоне перехода верхней мантии и нижних частях

земной коры при высокой скорости пластического течения (до  $\varepsilon \sim 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ ), которая способствовала возрастанию температуры (до 1000 °C) в результате внутреннего трения при сдвиговых деформациях (Kunze, 1981). В условиях быстрого возрастания скорости деформации и температуры пластическое течение не успевает реализоваться трансляционным скольжением в одном направлении, поэтому активизируется второе, субнормальное первому (Кичеева, 2014б). С увеличением степени пластического деформирования в ультрамафитах возрастает роль синтектонической рекристаллизации с образованием микрозернистого мозаичного агрегата оливина.

*Гранобластовые оливиниты* установлены в Малоэргакском блоке Эргакского массива. Они, очевидно, возникли 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 (Николя, 1992; Чернышов, 2001). При этом зерна оливина приобретают закономерную ориентировку по внутреннему строению (рисунок 7), которая контролируется внешним полем напряжения, фиксируемого максимумом осей № II  $\sigma_3$ , а также низкотемпературным трансляционным скольжением по системе (110)[001]. Главными факторами этого процесса является повышение температуры ( $T > 500^\circ\text{C}$ ), медленная скорость ( $\varepsilon < 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ ) и низкий стресс (10-20 МПа) (Чернышов, 2001).

## 7 ПЕТРОГЕНЕТИЧЕСКИЕ ВЫВОДЫ

Проведенные исследования позволили сформулировать следующие выводы:

1. Калнинский и Эргакский массивы являются фрагментами нижней части Куртушибинского олиолитового 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. Эргакский ультрамафитовый массив состоит из двух блоков: Лысанского и Малоэргакского, которые тектонически разобщены.

2. Ультрамафиты Калнинского и Эргакского массивов представлены, преимущественно, дунитами, гарцбургитами и их серпентинизированными разностями. В северном блоке Эргакского массива ультрамафиты нередко преобразованы в

регенерированные серпентин-оливиновые ультраметаморфиты и оливиниты. Среди ультрамафитов обоих массивов отмечаются хромитовые тела.

В Калнинском массиве широким распространением пользуются как гарцбургиты, так и дуниты, тогда как в Эргакском наряду с дунитами и гарцбургитами устанавливаются оливиниты. 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 порфиокластезе, обусловленном синтектонической рекристаллизацией. Среди дунитов и гарцбургитов выявляются линейные тела полосчатых хромититов. Оливиниты отличаются отсутствием признаков пластических деформаций.

По совокупности и интенсивности проявления признаков пластической деформации нами выделены следующие петроструктурные типы дунитов и гарцбургитов: протогранулярный → мезогранулярный → порфиокластовый. Для оливинитов устанавливается гранобластовый тип. Их последовательность отражает возрастающую степень пластической деформации зерен оливина. Последовательность микроструктур определяется возрастанием роли признаков пластического деформирования зерен оливина: неоднородности их погасания, полос излома, изменения формы зерен, их степени ориентации и синтектонической рекристаллизации. В участках локального термического разогрева, обусловленного пластическими деформациями, происходила вторичная рекристаллизация отжига с образованием гранобластовых оливинитов (Чернышов, 2001). Из приведенной характеристики структурных типов оливина следует, что с увеличением степени деформации пород происходит уменьшение размера зерен минералов, увеличение их удельной поверхности и, нередко, степени анизометрии, что хорошо согласуется с экспериментальными данными (Nicolas et. al., 1973).

3. Оливины в дунитах и гарцбургитах обоих массивов по химическому составу отвечают форстериту ( $Fa=5,18-10,89\%$ ). Отмечается увеличение железистости микрозернистого интенсивно деформированного оливина, что свидетельствует о синтектонической рекристаллизации, протекавшей в восстановительных условиях. Отсутствие  $CaO$  и  $MnO$  в дунитах и гарцбургитах, очевидно, связано с их интенсивным деплетированием. Оливин в оливинитах отличается от дунитов и гарцбургитов минимальной железистостью ( $Fa=0,8-1,6\%$ ). Для оливина из хромитов отмечается тенденция к снижению железистости по сравнению срудовмещающими дунитами и оливинитами. Хромшпинелиды в дунитах и гарцбургитах по химическому составу соответствуют алюмохромитам и хромитам, редко – хромпикотитам. Хромшпинелиды из

оливинитов отвечают хромитам, либо хромистым магнетитам. Хромшпинелиды в хромитах Калнинского массива представлены алюмохромитами и хромитами, тогда как в Эргакском – только хромитами.

Наблюдаемые отличия в химическом составе минералов, очевидно, связаны с неравномерной степенью деплетирования ультрамафитов, с последующей неоднородностью их пластического деформирования и с вторичной рекристаллизацией отжига.

4. 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. Ультрамафиты исследуемых массивов обнаруживают одинаковый характер распределения РЗЭ, который характеризуется уменьшением от легких к средним и одинаковыми концентрациями средних и тяжелых лантаноидов, что придает спектрам отрицательное наклонение. Устанавливается истощение средними и тяжелыми РЗЭ от гарцбургитов к дунитам, что связано с возрастанием степени деплетированности последних. При этом в ряду массивов: Кемпирсайский–Эргакский–Калнинский–Оспинский – отмечается тенденция к уменьшению содержаний РЗЭ в ультрамафитах, свидетельствующая о том, от первого к последнему они становятся более деплетированными реститами.

5. Детальное структурно-petрологическое 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 (Чернышов, 2001; Чернышов, Юричев, 2013).

*Доконсолидационный этап* включает мантийно-метаморфическую эволюцию дунит-гарцбургитового комплекса, в которой 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, мезогранулярные 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 °C до 650 °C, низкой скорости (менее  $10^{-6}$  с<sup>-1</sup>), значительного всестороннего давления (более 10 кбар) в условиях осевого сжатия (Николя, 1992). В результате образуются дуниты с равновесной среднезернистой микроструктурой. На этом этапе, вероятно, происходило формирование хромитового оруденения в дунитах в зонах интенсивного высокотемпературного послойного пластического течения, которое способствовало сегрегации хромшпинелидов в линейные зоны с образованием вкрапленных руд.

На второй стадии прогрессивного метаморфизма пластическое течение в ультрамафитах осуществлялось, очевидно, однородным высокотемпературным трансляционным скольжением, преимущественно по (010)[100] в условиях низкой скорости (менее  $10^{-6}$  с<sup>-1</sup>) при температуре ~1000°C, которое способствовало интенсивному деплетированию исходных гарцбургитов. Трансляционное скольжение в таких условиях сопровождается диффузионной ползучестью, при этом роль последней возрастает в условиях снижения скорости деформации и увеличения температуры выше 1000°C. 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 формированием разнообразных деформационных микроструктур оливина в дунитах и гарцбургитах при возрастающей роли механизма синтектонической рекристаллизации. Характерной чертой этих структур является отчетливо выраженная линейно-плоскостная минеральная ориентировка (директивность). Интенсивность пластических деформаций ультрамафитов находит отражение в формировании порфиросластвых микроструктурных типов оливина. Пластические деформации ультрамафитов на этом этапе протекали в условиях интенсивных осевых и сдвиговых деформаций при умеренно высоких и сравнительно низких температурах (~500-750°C), при значительных скоростях ( $\varepsilon > 10^{-4}$  с<sup>-1</sup>) и всестороннем давлении (~5 МПа) в процессе перемещения ультрамафитов по зонам глубинных надвигов в верхние части земной коры (Mercier, 1985). Возрастающие напряжения и скорости сдвиговых деформаций способствовали значительному повышению температуры, что нашло отражение в смене систем трансляции в оливине от

низко- к высокотемпературным (110)[001] → (001)[100] → {0KL}[100] и увеличении роли синтектонической рекристаллизации (Чернышов, 2001).

Эпиконсолидационный этап обусловлен как прогрессивным, так и регрессивным метаморфизмом ультрамафитов. Прогрессивный метаморфизм проявляется локально и обусловлен значительным повышением температур в динамически активных зонах. В результате пластически деформированные дуниты и гарцбургиты подвергаются вторичной рекристаллизации отжига с образованием регенерированной гранобластовой микроструктуры, при этом новообразованные зерна оливина отличаются отсутствием признаков пластических деформаций. Петроструктурные узоры регенерированного оливина, часто оказываются близкими петроструктурам пластически деформированного оливина, что указывает на сохраняющийся план внешнего поля напряжения при их формировании. Главными факторами вторичной рекристаллизации отжига является повышение температуры ( $T > 500^{\circ}\text{C}$ ), медленная скорость ( $\varepsilon < 10^{-6} \text{ c}^{-1}$ ) и низкий стресс (10-20 МПа). Регрессивный метаморфизм способствовал серпентинизации дунитов и гарцбургитов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного детального петрологического изучения установлены главные типы пород, слагающие Калнинский и Эргакский хромитоносные массивы. Они представлены, главным образом, метаморфическими ультрамафитами дунит-гарцбургитового комплекса. Главное внимание уделялось изучению петрографических, минералогических, петрогохимических и петроструктурных особенностей дунитов.

В Калнинском массиве широким распространением пользуются как гарцбургиты, так и дуниты, тогда как в Эргакском наряду с дунитами и гарцбургитами устанавливаются оливиниты. 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 порфиокластезе, обусловленном синтектонической рекристаллизацией. Среди дунитов выявляются линейные тела полосчатых хромититов. Оливиниты отличаются отсутствием признаков пластических деформаций.

Вещественный состав пород и минералов отражает, прежде всего, породную принадлежность. Устанавливаются также тенденции изменения состава пород и минералов, обусловленных их пластической деформацией.

Выявленная петрогохимическая неоднородность пород и хромититов связана, как с породной принадлежностью, так и с наложенными метаморфогенными преобразованиями.

Петроструктурный анализ оливина позволил выявить предпочтительные узоры его оптических ориентировок, анализ которых дает возможность выявить термодинамические условия и последовательность пластических деформаций дунитов на мантийно-коровых этапах их эволюции. Анализом установлено, что дуниты и гарцбургиты претерпели пластические деформации в процессе перемещения на уровнях верхняя мантия–земная кора механизмами трансляционного скольжения и синтектонической рекристаллизацией, в условиях снижения температур от 900 °C, умеренной и высокой скорости ( $10^{-5} \text{с}^{-1}$ – $10^{-2} \text{с}^{-1}$ ) и низкого всестороннего давления ( $\approx 5$  кбар). Оливиниты образовались в результате высокотемпературной рекристаллизации отжига (свыше 500 °C).

Таким образом, комплексное петрологическое изучение ультрамафитов Калнинского и Эргакского массивов позволило установить эволюционную направленность их структурно-текстурных особенностей и вещественного состава, выявить термодинамические условия формирования.

## 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 Российской 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. Термодинамические условия формирования оливинитов Эргакского хромитоносного массива (Западный Саян) // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XIX Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых, посвященного 70-летнему юбилею Победы советского народа над фашистской

Германией. Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – Т. 1. – С. 107-108.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

5. Кичеева А. В. Петрохимическая оценка хромитоносности Калнинского гипербазитового массива (Западный Саян) / А. В. Кичеева, А. И. Чернышов, И. Ю. Лоскутов И.Ю. // Сборник материалов 2-ой научно-практической конференции «Геология, геофизика и минеральное сырье Сибири». – Новосибирск: ФГУП «СНИИГГиМС», 2015. – Т. 1. – С. 165-166.

6. Кичеева А. В. Пластически деформированные гарцбургиты Калнинского массива (Западный Саян) / А. В. Кичеева, А. И. Чернышов, А. Н. Юричев // Петрология магматических и метаморфических комплексов. Материалы Всероссийской петрографической конференции с Международным участием. – Томск: Изд-во Томского ЦНТИ, 2016. – Вып. 8. – С. 140–143.

7. 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.

8. Кичеева А. В.Петрографические и петрогохимические особенности хромитоносных ультрамафитов Куртушибинского оphiолитового 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.

## ОТЗЫВ

на научный доклад А.В.Кичеевой «Петрология хромитоносных ультрамафитов Калнинского и Эргакского массивов (СВ Западного Саяна), представленной на соискание квалификации «Исследователь. Преподаватель исследователь»

В научном докладе А.В. Кичеева рассматривает петрологические аспекты пластического деформирования хромитоносных ультрамафитовых массивов, расположенных в северо-восточной части Западного Саяна, которые являются составной частью Куртушибинского офиолитового пояса. Ее работа является продолжением исследований, которые были начаты еще на третьем курсе и были изложены в курсовой работе по петрографии, а также в выпускных работах бакалавра и магистра. Актуальность исследования определяется дефицитом хромитовых руд в нашей стране.

Ультрамафиты офиолитовых комплексов постоянно привлекают внимание многих исследователей в связи с их потенциальной хромитоносностью и условиями формирования. Однако до настоящего времени многие аспекты этого исследования остаются дискуссионными и требуют дальнейшего их изучения с применением современных методических приемов.

В процессе учебы в аспирантуре работы А.В. Кичеева детально познакомилась с геологией исследуемого региона Западного Саяна. Основываясь на результатах предыдущих исследователей и собственного изучения она выявила внутреннее строение Калнинского и Эргакского ультрамафитовых массивов. Большое внимание уделялось детальному петроструктурному изучению ультрамафитов, в результате были выделены основные разновидности деформационных петроструктурных типов оливина, анализ оптических ориентировок которых позволил установить последовательность и термодинамические условия их формирования. Изучение состава минералов и петрогоеохимические исследования проводились на основе оригинальных анализов выполненных, главным образом, в Центре коллективного пользования «Аналитический центр геохимии природных систем» при Томском государственном университете.

Полученные результаты исследований с использованием литературных данных позволили автору рассмотреть условия формирования ультрамафитов и последующие наложенные пластические деформации, а также определить роль пластического течения в формировании хромитовых руд. За период обучения Кичеевой А.В. было написано 11 статей, из них 3 статьи в рецензируемых научных журналах рекомендованных ВАК РФ.

Научный доклад об основных результатах подготовленной научно-квалификационной работы (диссертации) удовлетворяет требованиям, а ее автор, достойна присвоения квалификации «Исследователь. Преподаватель исследователь».

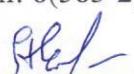
**Алексей Иванович Чернышов**

Заведующий кафедрой петрографии,  
доктор геолого-минералогических наук,

Национальный исследовательский Томский государственный университет

Почтовый адрес: 634050, Томск, пр. Ленина, 36

Телефон: 8(383-2)-52-94-45; e-mail: aich@ggf.tsu.ru

 (А.И. Чернышов)

28.05.2018 г.

## Рецензия

на научный доклад А.В.Кичеевой «Петрология хромитоносных ультрамафитов Калнинского и Эргакского массивов (СВ Западный Саян)

Работа А.В.Кичеевой посвящена актуальной проблеме в современной геологии – комплексному петрологическому исследованию хромитоносных массивов, установлению внутренних деформационных структур исследуемых пород, а также определению роли пластической деформации в локализации хромитовых тел. Объектом изучения являются ультрамафиты Калнинского и Эргакского массивов, которые представляют собой фрагменты Куртушибинского офиолитового пояса, расположенного в северо-восточной части Западного Саяна. Соискатель отчетливо формулирует стоящие перед ним задачи и решает их на большом фактическом материале и на высоком, современном уровне.

Важным элементом в решении проблемы хромитоносности массивов являются полученные данные о деформационных структурах слагающих их горных породах.

В своей работе автор применил большое количество экспериментальных методов исследований, в том числе и современные, такие как изучение горных пород при помощи растровой электронной микроскопии.

Интересным представляется то, что в ультрамафитах данных массивов впервые выделен широкий спектр деформационных и рекристаллизационных типов микроструктур, а 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.

Диссертант выполнил стоящие передним ним задачи: исследуемые ультрамафитовые массивы получили в его работе всестороннее и глубокое освещение.

Из замечаний отметим следующие:

1. Автор мало ссылается на современную литературу в области исследований.

2. Хотелось бы видеть более детальное описание в установлении роли пластических деформаций в локализации хромитоносности

Несмотря на отмеченные замечания рецензируемая работа несомненно отвечает требованиям, предъявляемых к выпускной квалификационной работе (диссертации), а ее автор, Кичеева А.В., достойна присвоения квалификации «Исследователь. Преподаватель исследователь».

Кульков Алексей Сергеевич

М.Н.С. ЛМСНС, кандидат физико-математических наук

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

Почтовый адрес: 634055, Томск, пр. Академический 2/4

Адрес: 350005, г. Екатеринбург, пр. Краудиев 10  
Телефон: 8(913) 874 54 50; e-mail: 727@ispms.ru

Согласен на включение персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку

(А. С. Кульков)

25.05.2018 Г.

## Рецензия

на научный доклад А.В. Кичеевой «Петрология хромитоносных ультрамафитов Калнинского и Эргакского массивов (СВ Западный Саян)

Генетические аспекты образования ультраосновных пород представляют важную информацию для понимания процессов эволюции земной коры и мантии, рудообразования, а также смены тектонических стилей. Поэтому работа А.В. Кичеевой, посвященная комплексному петрологическому исследованию Калнинского и Эргакского хромитоносных массивов Западного Саяна, не только актуальна, но и имеет практическое значение.

На большом фактическом материале автору удалось выделить главные петрографические разновидности пород, провести их петроструктурную типизацию, установить закономерности изменения состава пород, предложить эволюционную модель формирования изученных хромитоносных ультрамафитов. В работе использованы современные аналитические методы исследования и уже ставшие классическими методики структурно-петрологического картирования магматических и метаморфических комплексов, поэтому достоверность полученных выводов не вызывает сомнения.

Особый интерес в работе вызывают результаты петроструктурного анализа оливина, которые позволили сделать вывод, что пластические деформации в дунитах и гарцбургитах осуществлялись преимущественно трансляционным скольжением при высоких температурах и низкой скорости.

К работе имеются следующие замечания:

1) Автор использует, на наш взгляд, некорректный термин «метаморфические перидоты», если породы имеют метаморфическую природу, то это - ультраосновные гранулиты, например, а если это перидотиты, то они - метаморфизованы.

2) Автор констатирует, что в «хромититах Эргакского массива отмечается тенденция к снижению железистости», не совсем понятно, по отношению к каким породам.

3) К сожалению в работе отсутствуют графики, характеризующие состав оливинов.

4) Графики распределения редкоземельных элементов плохо читаемые, их можно было бы сделать крупнее.

5) Одной из задач исследования являлся петроструктурный анализ энстатита, однако его результаты в работе не представлены.

Несмотря на отмеченные замечания рецензируемая работа несомненно отвечает требованиям, предъявляемым к выпускной квалификационной работе (диссертации), а ее автор, Кичеева А.В., достойна присвоения квалификации «Исследователь. Преподаватель исследователь».

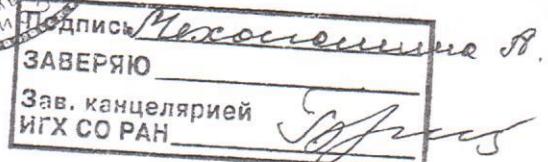
Алексей Сергеевич Мехонюшин  
ИГХ СО РАН

Почтовый адрес: 664033, Иркутск, ул. Фаворского, 1А  
Телефон: 8(395-2)-42-46-01; e-mail: [mekhonos@igc.irk.ru](mailto:mekhonos@igc.irk.ru)

Согласен на включение персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку

(А.С. Мехонюшин)

07.06.2018 г.



# Отчет о проверке на заимствования №1

Автор: 1990.15.10@mail.ru / ID: 3280429

Проверяющий: (1990.15.10@mail.ru / ID: 3280429)

Отчет предоставлен сервисом «Антиплагиат» - <http://www.antiplagiat.ru>

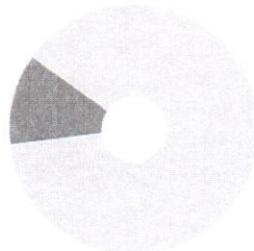
## ИНФОРМАЦИЯ О ДОКУМЕНТЕ

№ документа: 11  
 Начало загрузки: 25.05.2018 09:41:48  
 Длительность загрузки: 00:00:01  
 Имя исходного файла: Научный Доклад  
 Размер текста: 1321 кБ  
 Символов в тексте: 55820  
 Слов в тексте: 6132  
 Число предложений: 410

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ ОТЧЕТЕ

Последний готовый отчет (ред.)  
 Начало проверки: 25.05.2018 09:41:50  
 Длительность проверки: 00:00:02  
 Комментарии: не указано  
 Модули поиска:

ЗАИМСТВОВАНИЯ	ЦИТИРОВАНИЯ	ОРИГИНАЛЬНОСТЬ
12,44%	0%	87,56%



Заимствования — доля всех найденных текстовых пересечений, за исключением тех, которые система отнесла к цитированием, по отношению к общему объему документа.  
 Цитирования — доля текстовых пересечений, которые не являются авторскими, но система посчитала их использование корректным, по отношению к общему объему документа. Сюда относятся оформленные по ГОСТу цитаты; общеупотребительные выражения; фрагменты текста, найденные в источниках из коллекций нормативно-правовой документации.  
 Текстовое пересечение — фрагмент текста проверяемого документа, совпадающий или почти совпадающий с фрагментом текста источника.  
 Источник — документ, проиндексированный в системе и содержащийся в модуле поиска, по которому проводится проверка.  
 Оригинальность — доля фрагментов текста проверяемого документа, не обнаруженных ни в одном источнике, по которым шла проверка, по отношению к общему объему документа.  
 Заимствования, цитирования и оригинальность являются отдельными показателями и в сумме дают 100%, что соответствует всему тексту проверяемого документа.  
 Обращаем Ваше внимание, что система находит текстовые пересечения проверяемого документа с проиндексированными в системе текстовыми источниками. При этом система является вспомогательным инструментом, определение корректности и правомерности заимствований или цитирований, а также авторства текстовых фрагментов проверяемого документа остается в компетенции проверяющего.

№	Доля в отчете	Доля в тексте	Источник	Ссылка	Актуален на	Модуль поиска	Блоков в отчете	Блоков в тексте
[01]	0%	3,09%	Download issue PDF	<a href="http://izvestiya.tpu.ru">http://izvestiya.tpu.ru</a>	11 Ноя 2016	Модуль поиска Интернет	0	26
[02]	2,03%	2,79%	8 Ультрабазит-базитовые ко...	<a href="http://diss.seluk.ru">http://diss.seluk.ru</a>	07 Фев 2017	Модуль поиска Интернет	6	8
[03]	1,11%	2,69%	КАЛНИНСКИЙ УЛЬТРАМАФ...	<a href="http://cyberleninka.ru">http://cyberleninka.ru</a>	08 Окт 2015	Модуль поиска Интернет	8	23

Еще источников: 14

Еще заимствований: 9,3%

Научный руководитель  
 А.В. Кудинова