

*На правах рукописи*



**ИЛЬИНА Ольга Владимировна**

**СОДЕРЖАНИЕ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ГРУППЫ  
ПЛАТИНЫ В МАНТИЙНЫХ КСЕНОЛИТАХ КИМБЕРЛИТОВОЙ  
ТРУБКИ УДАЧНАЯ (ЯКУТИЯ)**

25.00.09 – «геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

НОВОСИБИРСК 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетной учреждении науки Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГМ СО РАН), г. Новосибирск.

### **Научный руководитель**

**Агашев Алексей Михайлович**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник ИГМ СО РАН

### **Официальные оппоненты:**

**Костровицкий Сергей Иванович** – доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник ФГБУН Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (г. Иркутск)

**Малич Крешимир Ненадович** - доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник ФГБУН Института геологии и геохимии им. акад. Заварицкого А.Н. УрО РАН (г. Екатеринбург)

### **Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения Российской академии наук (ИГАБМ СО РАН), г. Якутск.

Защита состоится **«27» сентября 2022 г.** в 11-00 на заседании диссертационного совета Д 003.067.02 при Федеральном государственном бюджетной учреждении науки Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук, в конференц-зале.

Адрес: 630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, д.3; факс: 8(383)373-05-61; e-mail: gaskova@igm.nsc.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИГМ СО РАН и на сайте <https://www.igm.nsc.ru/index.php/obrazov/dissovety>

Автореферат разослан «20» августа 2022 года.

Ученый секретарь диссертационного совета  
Д 003.067.02, д.г.-м.н.



О.Л. Гаськова

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность.** Литосферная мантия под древними архейскими кратонами сложена преимущественно перидотитами, и, в меньшей степени, эклогитами и пироксенитами [Соболев, Соболев, 1964; Sobolev, 1977; Boyd et al., 1997, 1998; Korylova et al., 1999; Griffin et al., 2003; Агашев и др., 2006]. Ксенолиты этих пород, вынесенные на поверхность кимберлитами, являются прямыми источниками сведений о составе и термальном режиме литосферной мантии [Nixon & Boyd, 1973; Griffin et al., 2003; Herzberg & Rudnick, 2012]. Определение химического состава, петрографических характеристик и генезиса перидотитовых ксенолитов из кимберлитов Сибирского кратона были представлены в работах отечественных и зарубежных петрологов [Бобриевич и др., 1959; Sobolev, 1977; Boyd, 1984; Похиленко, 1990; Sobolev et al., 2009; Ziberna et al., 2013]. Трубка Удачная является одним из крупнейших месторождений алмазов в мире [Pokhilenko et al., 1977]. В последнее десятилетие в уникально свежем кимберлите [Kamenetsky et al., 2012; Golovin et al., 2018] из этой трубки было собрано много крупных и исключительно свежих, практически не затронутых процессами вторичных изменений ксенолитов, что дало новый толчок многочисленным исследованиям мантийных пород [Agashev et al., 2013; 2018; Doucet et al., 2012, Ionov et al., 2010; 2017; Pokhilenko, 2018; Шацкий и др., 2020]. Таким образом, несмотря на десятилетия исследований ксенолитов трубки Удачная, их изучение остается актуальным и вызывает большой интерес.

В последние годы все больше внимания уделяется изучению распределения элементов группы платины (ЭПГ) в породах, так как они являются индикаторами петрогенетических процессов в верхней мантии [Lorand et al., 2013; Aulbach et al., 2016]. Считается, что во время аккреции Земли все ЭПГ были удалены из силикатной части планеты и сконцентрированы в ядре [O'Neill, 1991; Fisher-Godde et al., 2011]. Однако содержания ЭПГ в верхней мантии достигают уровня нескольких частей на миллиард (мг/т) [Palme et al., 2003; Lorand et al., 2008b], что всего на два порядка ниже таковых в хондритовых метеоритах. Наиболее признанной гипотезой повышенного содержания ЭПГ в мантии является «поздняя хондритовая добавка», которая подразумевает привнос метеоритного вещества в силикатную оболочку Земли после формирования ядра [Chou, 1978; Jagoutz et al., 1979; Morgan, 1986; O'Neill, 1991; Schmidt et al., 2000]. Кратонные перидотиты дают возможность оценить фракционирование ЭПГ при очень высоких степенях частичного плавления (30–50 %), несравнимых с таковыми в некротонных перидотитах (<30 %) [Pearson et al., 2004; Walter, 2014]. Данные по распределению ЭПГ в ксенолитах кимберлитовой трубки Обнаженная (Якутия) представлены в работе [Калашникова, 2017]. На основании проведенных исследований автор предположила воздействие акстеносферных расплавов и привнос Pt, Pd и Re в ксенолиты. Данные по ЭПГ и Re-Os системе в равномернозернистых и деформированных перидотитах

кимберлитовой трубки Удачная были приведены в работах [Ionov et al., 2015; Pernet-Fisher et al., 2015]. Перидотитовые ксенолиты имеют содержания Os и Ir близкие или чуть выше, чем в примитивной мантии (ПМ). Эти элементы могут концентрироваться в Os-Ir интерметаллических соединениях во время исходного частичного плавления перидотитов. Содержания Pd значительно ниже, чем в ПМ, что может объясняться потерей сульфида, который является главным концентратором этого элемента, при частичном плавлении >20 %. В некоторых перидотитах наблюдается слабое повышение концентраций Pd и Pt, при этом изменяется отношение Pt/Pd. Такая характеристика указывает на метасоматическое преобразование пород [Ionov et al., 2015].

В данной работе приведены результаты исследования четырех типов пород из кимберлитовой трубки Удачная: деформированных перидотитов, равномернозернистых перидотитов, мегакристаллических гарцбургит-дунитов и эклогитов. Минералого-петрографическая характеристика, составы изученных пород по главным и рассеянным элементам ранее были представлены в работах [Agashev et al., 2013; 2018; Похиленко и др., 2014; Ильина и др., 2022]. Исследования по содержанию ЭПГ в деформированных и равномернозернистых перидотитах были представлены в работах [Ильина и др., 2016; 2022]. В диссертации эти данные были дополнены изучением распределения ЭПГ в мегакристаллических гарцбургит-дунитах и эклогитах кимберлитовой трубки Удачная. Стоит отметить, что впервые была сделана попытка интерпретировать генезис глубинных мантийных ксенолитов, используя распределение ЭПГ в валовом составе пород и в минеральных фазах из них. Это стало возможным благодаря уникальной методике изотопного разбавления, которая позволяет работать с малыми навесками образцов и при этом учитывать погрешности неравномерного распределения фаз, содержащих ЭПГ, по образцу.

**Цель работы.** Выявление особенностей распределения элементов группы платины в мантийных ксенолитах различного генезиса кимберлитовой трубки Удачная.

**Задачи:**

- 1) Минералогическая и геохимическая характеристика перидотитов и эклогитов трубки Удачная.
- 2) Определение содержаний ЭПГ в изученных породах методом изотопного разбавления.
- 3) Определение содержаний ЭПГ в минеральных фазах исследуемых перидотитов и эклогитов.
- 4) Интерпретация полученных данных.

**Практическая значимость работы.** Полученные результаты вносят вклад в понимание эволюции литосферной мантии под древними архейскими кратонами.

**Научная новизна.** На сегодняшний день существует небольшое количество работ по распределению ЭПГ в мантийных перидотитах из кимберлитовых трубок, но всего несколько из них посвящены изучению

распределения ЭПГ в уникально свежих мантийных ксенолитах трубки Удачная [Ionov et al., 2015; Pernet-Fisher et al., 2015, 2019]. В диссертации на материале мантийных ксенолитов впервые были измерены содержания ЭПГ в минеральных фазах и породах и определена взаимосвязь распределения ЭПГ с метасоматическими процессами.

**Основные защищаемые положения.**

1) Большая часть ЭПГ в перидотитах кимберлитовой трубки Удачная находятся в сульфидах и во вкраплениях интерметаллических соединений (5–15 мкм) в оливинах. Содержания ЭПГ в оливинах на 2-3 порядка ниже, чем в сульфидах.

2) При силикатном метасоматозе деформированных перидотитов кимберлитовой трубки Удачная увеличение количества граната и клинопироксена сопровождается обеднением пород тугоплавкими ЭПГ и неравномерным обогащением легкоплавкими ЭПГ, которое происходит в результате формирования субмикронных сульфидных фаз в межзерновом пространстве.

3) ЭПГ в равномернозернистых перидотитах кимберлитовой трубки Удачная содержатся во включениях интерметаллических соединений в оливинах. Вариации содержаний Os, Ir, Ru отражают различную исходную степень плавления перидотитов. Сульфиды метасоматического генезиса приурочены к обогащенным палладием образцам. Распределение ЭПГ в эклогитах кимберлитовой трубки Удачная находятся в пределах значений, характерных для MORB-базальтов.

**Фактический материал и личный вклад соискателя.** Основой для данной диссертации стала коллекция 25 мантийных ксенолитов из кимберлитовой трубки Удачная, полученная из фонда лаборатории №451. Автором было изучено более 30 плоскополированных пластинок и шлифов, сделано более 500 фотографий минералов исследованных пород. Проведена подготовка проб для определения в них содержаний ЭПГ методом изотопного разбавления с масс-спектрометрическим окончанием. Пробоподготовка включала в себя обрезку пород и выбор центральной части, чтобы избежать влияния кимберлита на результаты, дробление, отбор навесок зерен сульфидов (0,02 г) и оливинов (0,02 г) менее 1 мм, изготовление шашек с зёрнами оливинов, хромитов, гранатов, ортопироксенов из гарцбургит-дунитов.

**Соответствие диссертации Паспорту научной специальности:** Результаты работы соответствуют пункту 13 (Изучение поведения химических элементов и изотопов в геологических процессах) паспорта специальности 25.00.09.

**Апробация работы и публикации:** По теме диссертации опубликовано 13 работ, из них 2 статьи в российских рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК. Основные результаты представлены в материалах российских и зарубежных конференций.

**Структура и объем работы:** Работа состоит из введения, 8 глав и заключения общим объемом 91 страница. В ней содержится 27 рисунков, 12 таблиц. Список литературы включает 116 наименований.

**Благодарности:** Автор искренне благодарит к.г.-м.н. А.М. Агашева за научное руководство и всестороннюю поддержку на различных этапах выполнения работы. Глубокую признательность автор выражает к.г.-м.н. Л.Н. Похиленко за неоценимую помощь и поддержку. Диссертант искренне благодарит Академика РАН д.г.-м.н. Н.П. Похиленко за ценные советы при подготовке диссертации. Автор выражает благодарность д.г.-м.н. В.П. Афанасьеву за консультации и поддержку. За ценные замечания автор благодарит академика РАН д.г.-м.н. Н.В. Соболева. За поддержку и всестороннюю помощь автор благодарит заведующего лабораторией к.г.-м.н. Н.С. Тычкова. За конструктивную критику и ценные замечания автор благодарит д.г.-м.н. О.М. Туркину, А.Э. Изоха, Е.Ф. Синякову, А.А. Томиленко, О.Л. Гаськову, А.И. Чепурова, к.г.-м.н. Е.В. Агашеву, д.г.-м.н. Н.Д. Толстых. Автор выражает искреннюю благодарность О.А. Козьменко и С.В. Палесскому за постановку уникальной методики и ценные советы. Автор признателен за помощь и всестороннюю поддержку со стороны к.г.-м.н. А.М. Логвиновой, к.г.-м.н. Барабаш Е.О., Ивановой О.А., Е.В. Петрушина, М.А. Вавилова, А.М. Логвиновой, Л.В. Черемных, В.С. Цибульчик, Т.М. Блинчик. Автор выражает благодарность всем сотрудникам лаборатории №451.

Работа выполнена в Лаборатории литосферной мантии и алмазных месторождений (лаб. 451) ИГМ СО РАН при частичной финансовой поддержке в рамках гранта Министерства науки и высшего образования РФ № 075-15-2020-781 от 02 октября 2020 года.

**Условные обозначения, принятые в автореферате:** Grt – гранат, Crx – клинопироксен, Orx – ортопироксен, Ol – оливин, Csr – халькопирит, Pn – пентландит, Po – пирротин, Dj – джерфшерит, ПМ – примитивная мантия, ЭПГ – элементы группы платины, МТР – минералы твердых растворов.

## **Глава 1. Литературные данные о распределении ЭПГ в перидотитах**

Считается, что ИЭПГ (иридиевая подгруппа – Os, Ir, Ru) являются тугоплавкими, а ПЭПГ (платиновая подгруппа – Pt, Pd, Rh) – легкоплавкие элементы [Mungall et al., 2005]. В предшествующих исследованиях мантийных перидотитов из кимберлитовой трубки Удачная было выявлено, что ксенолиты имеют повышенное содержание ИЭПГ по сравнению с ПЭПГ [Ionov et al., 2015; Pernet-Fisher et al., 2015; 2019]. Это связано с их геохимическим поведением при плавлении мантии. Однако некоторые образцы характеризуются повышенными содержаниями ПЭПГ. Это указывает на влияние метасоматических процессов на перидотиты. Содержание ЭПГ в ксенолитах варьирует от 0,00001 до 0,01 хондритовых единиц (х.е.). Такие характеристики ЭПГ прослеживаются и в перидотитах кратонов мира [Irvine et al., 2003; Peason et al., 2004; Smith et al., 2009; Wittig et al., 2010; Walter et al., 2014; Liu et al., 2016].

По результатам экспериментальных исследований сульфидных и силикатных систем было выявлено, что ИЭПГ в верхней мантии могут накапливаться в Cu-Fe-Ni сульфидах, моносульфидном твёрдом растворе (МТР), минералах платиновой группы, которые содержатся в твердых растворах сульфидов, Os-Ir интерметаллических сплавах, хромшпинели [Park et al., 2012]. Известно, что ПЭПГ (Pd, Pt) распределяются в Cu-Fe-Ni сульфиды, реже в МТР, а Pt, при определенных условиях, входит в Pt-Ir-Os интерметаллические соединения [Fleet et al., 1991, 1999; Ballhaus et al., 2001; Barnes et al., 2001; Mungall et al., 2005, 2014; Vockrath et al., 2004].

Несмотря на выполненные ранее исследования содержания ЭПГ в мантийных ксенолитах трубки Удачная, в работах не проводились изучения содержания ЭПГ в минеральных фазах (оливины, сульфиды) и сравнения распределения ЭПГ в них с валовым составом пород.

## **Глава 2. Геологическая характеристика объекта исследования.**

В данной главе приведена информация о местонахождении, геологическом строении, возрасте и тектонической позиции кимберлитовой трубки Удачная-Восточная.

Кимберлитовая трубка Удачная находится на Сибирской платформе и принадлежит к Далдыно-Алаakitскому полю Якутской кимберлитовой провинции, занимающей северо-восточную часть платформы [Харькив и др., 1998].

## **Глава 3. Методы исследования.**

Макроскопическое изучение перидотитов проводилось с помощью бинокулярного микроскопа Nikon С-PS160. Минералого-петрографическое исследование перидотитов выполнялось с использованием микроскопа Olympus VX51, оснащенного фотовидеокамерой высокого разрешения Olympus ColorView III. Химический состав пород был определен методом рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) на приборе СМР-25 в Аналитическом центре Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева (ИГМ СО РАН, Новосибирск.). Химический состав породообразующих минералов определялся методом рентгеноспектрального микроанализа с электронным зондом на микроанализаторе JEOL JXA 8100 в аналитическом центре ИГМ СО РАН.

*Метод изотопного разбавления.* Для определения микроколичеств ЭПГ (Os, Ir, Ru, Pt, Pd, Re) в перидотитах, сульфидах и оливинах из перидотитов применялся метод изотопного разбавления с масс-спектрометрическим окончанием на приборе высокого разрешения ELEMENT Finnigan Mat в ИГМ СО РАН. Следует отметить, что данная методика сложна в исполнении и впервые в России были получены анализы перидотитов и минеральных фаз на содержание ЭПГ в ИГМ СО РАН (Новосибирск). Основная проблема в использовании элементов группы платины в качестве индикатора петрогенетических процессов является их крайняя негомогенность в распределении по образцу (эффект «орешка») [Pearson et al., 2004]. Сплавы, интерстиционные фазы, шпинели, в которых содержатся ЭПГ, неравномерно

распределены в породах и, таким образом, представляют собой неблагоприятный объект для аналитики. Козьменко с соавторами первыми удалось максимально увеличить параметры разложения образца для достижения изотопного равновесия [Козьменко и др., 2011]. Метод позволяет даже при малых навесках образцов (меньше 1 грамма) учитывать неоднородность породы, и при этом дает возможность прямого отделения ЭПГ.

Относительное стандартное отклонение результатов анализа составляет от 5 до 15 %. Для каждого образца размер навески составлял 1 грамм, для сульфидов и оливинов – до 0,02 грамма. Порошки пород и минералы-концентраторы вместе с рассчитанным количеством трассеров-растворов, содержащих обогащенные изотопы  $Ru^{99}$ ,  $Pd^{106}$ ,  $Re^{185}$ ,  $Os^{190}$ ,  $Ir^{191}$  и  $Pt^{194}$ , помещались в трубки Кариуса, затем добавлялась смесь концентрированных кислот (3 мл HCl + 4 мл HNO<sub>3</sub>). После разложения пробы трубки вскрывались, и, в первую очередь, выделялся осмий. После его отделения содержимое трубки Кариуса приводили в раствор, подходящий по свойствам для анализа методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) без разбавления. Содержания измеренных ЭПГ рассчитывали по стандартным уравнениям для анализа изотопных разбавлений. Результаты проверки правильности разработанной методики на основе анализа стандартных образцов лерцолита (GP-13) и серпентинита (UB-N) [Козьменко и др., 2011] согласуются с данными, полученными многими авторами для стандартного образца GP-13 [Pearson et al., 2004; Meisel and Moser, 2004].

#### **Глава 4. Петрографическая характеристика исследованных пород.**

Изученная коллекция представлена деформированными перидотитами (11 обр.), равномернозернистыми перидотитами (6 обр.), мегакристаллическими гарцбургит-дунитами (4 обр.) и эклогитами (3 обр.).

Деформированные перидотиты представлены гранатовыми лерцолитами и состоят из порфирокластов граната, клинопироксена, ортопироксена и оливина, обособленных или вытянутых в виде цепочек в матрице, сложенной полигональными необластами рекристаллизованного оливина (**Рис.1**).

Равномернозернистые перидотиты представлены лерцолитами (**Рис. 1**). Они состоят из оливина, пироксенов, шпинели или граната. Породы имеют протогранулярную структуру по классификации Мерсье и Николя [Mercier, Nikolas, 1975].

Мегакристаллические гарцбургит-дуниты – породы, которые более чем на 95% состоят из оливина и вероятно являются обломками глубинных гигантозернистых пород, в которых размеры отдельных зерен оливина достигают 19 см [Похиленко и др., 1977, 1993]. Три образца из исследованных пород являются дунитами, один - гарцбургитом (**Рис. 1**).

Эклогиты – породы, которые состоят из пироп-альмандин-гроссулярового граната и клинопироксена (**Рис. 1**). Эклогиты тр. Удачная имеют гранобластовую структуру.

В восьми образцах деформированных перидотитов и в одном образце зернистого перидотита были обнаружены сульфиды [Ильина и др., 2022]. Они образуют полисульфидные агрегаты и встречаются как в виде включений в гранатах, так и в межзерновом пространстве пород. Составы сульфидных глобул следующие: пирротин + пентландит, пирротин + пентландит ± халькопирит и пирротин + джерфишерит ± пентландит ± халькопирит. Пентландит обнаружен в виде ламелей в пирротине, а халькопирит – в виде прерывистой каймы по периферии включений. Интерстиционные сульфиды представлены следующими ассоциациями: пирротин + пентландит ± джерфишерит (деформированные), пирротин + пентландит (равномернозернистые перидотиты) (**Рис. 2**).

В эклогитах сульфиды состава пентландит + пирротин + халькопирит и пирит находятся в межзерновом пространстве пород.

### **Глава 5. Химический состав перидотитов и эклогитов.**

Относительно состава ПМ [McDonough, Sun, 1995], деформированные перидотиты обогащены MgO (38,5–46,1 мас. %) и истощены магнезиальными компонентами, такими как Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0,7–2,5 мас. %), CaO (1,0–2,8 мас. %) и TiO<sub>2</sub> (0,07–0,19 мас. %) (**Рис. 3**). Наблюдаются отрицательная корреляция CaO с MgO (**Рис. 3в**) и положительная с Na<sub>2</sub>O. Содержание Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> варьирует в диапазоне от 0,27 до 0,62 мас. %. Концентрации FeO изменяются в широком диапазоне (7,95–11,07 мас. %); имеется положительная корреляция FeO с TiO<sub>2</sub> и MnO. Деформированные перидотиты обогащены Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и CaO в сравнении с реститами высокой степени частичного плавления – гарцбургит-дунитами (**рис. 5а**) [Похиленко и др., 1993]. По степени обогащения этими элементами деформированные перидотиты тр. Удачная можно разделить на слабообогащенные – их составы самые низко кальциевые и близкие по содержанию Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> к составу гарцбургит-дунитов и обогащенные в различной степени деформированные перидотиты.

Равномернозернистые перидотиты обогащены MgO (41,5–45,0 мас. %) и обеднены Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0,7–2,6 мас. %) и CaO (0,9–1,5 мас. %) относительно ПМ. На диаграмме CaO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> они образуют поле состава между составами ПМ и гарцбургит-дунитов, но отстоят от тренда деформированных перидотитов и имеют узкий диапазон по содержанию CaO (**Рис. 3а**). Концентрации FeO изменяются незначительно – от 6,41 до 7,99 мас. %, и, в целом, среднее значение FeO (7,36) ниже, чем в деформированных перидотитах (9,08) (**Рис. 3з**). Равномернозернистые перидотиты обогащены K<sub>2</sub>O (0,21 мас. %) по отношению к ПМ и деформированным разностям (0,029 и 0,13 мас. %, соответственно).

Потери при прокаливании для всех образцов положительные и варьируют в диапазоне от 0,14 до 1,21 мас. %. В обоих типах пород отсутствуют корреляции LOI с CaO и FeO, в отличие от серпентинизированных перидотитов по данным Бойда с соавторами [Boyd et al., 1997].

Два эклогита тр. Удачная являются высокомагнезиальными (Mg# 75и 76), один – низкомагнезиальным (Mg# 58). Эклогиты по составу главных химических элементов схожи с MORB базальтами (**Рис. 3**). Значения LOI в эклогитах варьируют от 0,83 до 1,46 мас. %, что указывает на незначительные вторичные приповерхностные изменения или на их отсутствие.

Содержание  $Al_2O_3$  в оливинах гарцбургит-дунитов варьирует в незначительном диапазоне от 0,004 до 0,015 мас. %. Оливины всех четырех образцов мегакристаллических гарцбургит-дунитов показывают неоднородность по содержанию FeO (6,84–8,10 мас. %) в пределах небольших участков. Это возможно объясняется наличием микровостков железосодержащих минералов (**Рис. 4**), обнаруженных в оливинах [Похиленко Л.Н., личное сообщение].

### **Глава 6. PT параметры равновесия минеральных парагенезисов.**

Температура и давление последнего равновесия минеральных ассоциаций деформированных перидотитов, равномернозернистых перидотитов и эклогитов трубки Удачная ранее были представлены в работах [Agashev et al., 2013; 2018; Ильина и др., 2022]. PT параметры перидотитов определены с помощью термобарометра [Brey et al., 1990]. Значения составляют 1230–1350°C, 56–67 кбар для деформированных и 750–1300°C, 30–67 кбар для равномернозернистых перидотитов. Точки значений последнего равновесия деформированных и трех равномернозернистых перидотитов на PT диаграмме располагаются равномерно между кривыми теплового потока 34 и 40 мВт/м<sup>2</sup>, попадая в поле стабильности алмаза (**Рис. 5**). Точки значений оставшихся трех зернистых перидотитов находятся вдоль геотермы 34 мВт/м<sup>2</sup>, причем одна из них располагается в поле стабильности графита.

Температура последнего равновесия минеральных ассоциаций эклогитов при давлениях 3 и 6 ГПа была рассчитана с помощью геотермометра Элиса и Грина (1979). Значения температуры составляют 1135-1320°C. Давление, полученное после проецирования этих данных на геотерму для кимберлитовой трубки Удачная [Тычков и др., 2014], составляет 5,5-6,5 ГПа [Agashev et al., 2018] (**Рис. 5**).

### **Глава 6. Распределение ЭПГ в мантийных ксенолитах трубки Удачная.**

Все значения содержаний ЭПГ в породах далее по тексту приводятся в мг/т. Данные по ЭПГ в исследованных породах представлены в таблице 1.

Содержание ЭПГ в валовом составе пород.

**Деформированные перидотиты.** Содержания ЭПГ были измерены в одиннадцати образцах деформированных перидотитов [Ильина и др., 2016, 2022]. Концентрации Os и Ir в перидотитах изменяются в диапазонах 2,41–4,06 и 2,79–4,02 мг/т, соответственно. Среднее значение Os (3,25) в деформированных перидотитах чуть ниже, чем в ПМ (Os=3,4), а Ir (3,46) - выше, чем в ПМ (Ir=3,2 мг/т). Содержания Ru варьируют в диапазоне от 2,02 до 7,96, а Rh – от 0,72 до 1,55 мг/т. Средние значения Ru (5,94) и Rh (1,15) чуть выше, чем в ПМ (Ru 5, Rh 0,9). Содержание Pd изменяются от 0,08 до 6,13 мг/т. Среднее значение (1,94) ниже, чем в ПМ (3,9). Содержание Pt в ксенолитах

изменяются в диапазоне от 3,05 до 7,06 мг/т. Среднее значение элемента (4,84) ниже, чем в ПМ (7,1).

Деформированные перидотиты характеризуются близкими формами спектров в ряду Os-Pt, около 0,01 хондритовых единиц, за исключением образца Uv-27/01, и широкими диапазонами по Pd и Re (от 0,0001 до 0,01 хондритовых единиц) (**Рис. 6а**). ИЭПГ показывают отрицательную корреляцию с главными элементами CaO + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (**Рис. 7ж**). Прослеживается общая тенденция к обеднению Os и Ir от слабообогатщенных петрогенными компонентами образцов к обогащенным с увеличением содержания CaO и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (**Рис. 7ж**). Корреляций ЭПГ с FeO в перидотитах не наблюдается. Образцы с повышенным содержанием FeO в большинстве своем не содержат сульфиды, кроме одного ксенолита (Uv-27/01) (**Рис. 7е**). На графике приведено распределение ЭПГ, нормированное на хондрит, в кимберлите тр. Удачная. Содержание ЭПГ в нем находится в пределах 0,001-0,01 х.

Деформированные перидотиты по содержанию Pd показывают широкий спектр от сильно деплетированных (0,08) до обогащенных (6,13) [Ильина и др., 2016, 2022]. Причем обогащение по палладию не совпадает с обогащением силикатным компонентом CaO + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Прослеживается слабая зависимость ПЭПГ с CaO + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (**Рис. 7з**).

Значение Os/Ir не показывает корреляций с индексом деплетирования расплавом – содержанием Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, так как ИЭПГ не фракционируют между собой. Pd/Ir, Pt/Ir и Pd/Pt имеют положительные корреляции с Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (**Рис. 7б, в-д**).

Таким образом, содержание ЭПГ в деформированных перидотитах находится в диапазонах ЭПГ, диагностированных ранее в кратонных перидотитах трубок Удачная и Лесото [Pearson et.al., 2004; Ionov et.al., 2015]. Однако, исследованные нами деформированные перидотиты характеризуются несколько повышенным содержанием Pd по сравнению с данными из литературы.

**Равномернозернистые перидотиты.** Содержания ЭПГ были измерены в шести образцах равномернозернистых перидотитов [Ильина и др., 2022]. Концентрации Ir изменяются от 0,14 до 5,13, Os от 0,19 до 8,56. Среднее значение Ir в образцах схоже с таковым в ПМ (3,2), а средняя концентрация Os – ниже, чем в ПМ (3,4). Содержание Ru варьирует в широком диапазоне от 1,61 до 14,78 мг/т, среднее его значение (5,78) схоже с ПМ (5,94). Концентрации Rh и Pd изменяются в диапазонах от 0,07 до 1,49 и от 0,87 до 3,35 мг/т. Средние значения Rh (0,51) и Pd (2,02) ниже такового в ПМ (Rh 0,9, Pd 3,9). Содержания Pt изменяются в широком диапазоне от 0,26 до 11,05 мг/т. Среднее значение Pt 4,13 ниже, чем в ПМ (7,1).

Равномернозернистые перидотиты имеют широкий диапазон концентраций по всем значениям ЭПГ (~0,001 - 0,01 хондритовых единиц), кроме Pd (**Рис. 6б**). На графике распределений ЭПГ, нормированных на хондрит, видна слабая тенденция уменьшения концентраций в среднем от

ИЭПГ к ПЭПГ. Выделяются образцы с положительными (3 шт) и с отрицательными пиками (3 шт) по содержанию Pt.

Значения Os/Ir не коррелируют с  $Al_2O_3$  (Рис. 7а). Значения Pd/Ir показывают положительные корреляции с  $Al_2O_3$ , а Pt/Ir - отрицательные (Рис. 7г, в).

Наблюдается отрицательная корреляция ЭПГ с  $Al_2O_3 + CaO$ . С повышением концентраций FeO увеличивается общее содержание ЭПГ ((Pt + Pd) от 1,12 до 14,4 мг/т; (Ir + Os) от 0,33 до 13,69 мг/т) (Рис. 7).

Содержание Pd изменяется в более узком диапазоне по сравнению с другими ЭПГ. Зависимости Pd от индекса степени мантийного метасоматоза  $(La/Yb)_n$  не наблюдается (Рис. 8).

**Эклогиты.** Содержания ЭПГ были измерены в трех образцах эклогитов. Концентрации Os и Ir изменяются от 0,03 до 2,75 и от 0,03 до 2,47, соответственно. Средние содержания Os (0,95) и Ir (0,87) ниже, чем в ПМ (Os 3,4, Ir 3,2). Содержание Ru варьирует в диапазоне от 2,3 до 10,74. Среднее его значение (7,56) выше, чем в ПМ (5,0). Концентрации Rh и Re меняются в диапазонах от 0,04 до 1,33 и от 0,37 до 0,82, соответственно. Среднее содержание Rh (0,56) ниже, чем в ПМ (Rh 0,9), а Re (0,59) выше, чем в ПМ (Re 0,28). Значения Pt и Pd варьируют в широких диапазонах от 0,99 до 9,75 и от 2,09 до 9,76. Средняя концентрация Pt (Pt 5,58) ниже, чем в ПМ (7,1), а Pd (6,87) в два раза выше, чем в ПМ Pd (3,9).

Эклогиты трубки Удачная показывают широкие диапазоны по ЭПГ (0,0001–0,01 х.е.) и более узкий – по Re (около 0,01 х.е.) (Рис. 6г). В двух образцах наблюдается увеличение концентраций ПЭПГ и Re относительно ИЭПГ. Эклогиты имеют пики по содержанию Re на хондрит-нормализованных графиках.

#### **Содержание ЭПГ в минеральных фазах.**

**Деформированные перидотиты.** В оливинах (3 образца) и сульфидах (2 образца) деформированных перидотитов были измерены концентрации ЭПГ [Ильина и др., 2022]. Так же содержание ЭПГ было измерено в ювелирном, чистом оливине без видимых включений, в тексте обозначен как оливин-стандарт. Оливины деформированных перидотитов характеризуются содержаниями ЭПГ в пределах от ~0,0001 до ~0,01 хондритовых единиц (Рис. 9). Спектры ЭПГ в оливинах, нормированные на хондрит, имеют различные формы. В двух образцах (Uv18/04, Uv27/01) оливины показывают прямое распределение ЭПГ, за исключением пика по Os в 27/01, отрицательных пиков по Pd и пиков по Re (Рис. 9а, в). В оливинах трех образцов содержание Pd варьирует от 0,0004 до 0,003 х.е., Re – от 0,003 до 0,015 х.е. Перидотит 703/11 характеризуется повышенным содержанием Pd в оливине по сравнению с таковым в двух других перидотитах (Рис. 9б). В целом, распределение ЭПГ в оливинах деформированных перидотитов схоже с таковым для валового состава пород (Рис. 9а, б, в). Формы спектров ЭПГ оливинов из перидотитов и оливина, взятого в качестве стандарта, схожи в рядах Ru-Pt и Pd-Re. Содержание ЭПГ в стандартном оливине ниже такого в оливинах из пород на

~1,5 порядка и варьирует в диапазоне от 0,000001 до 0,0001 хондритовых единиц и характеризуется обогащением ПЭПГ по отношению к ИЭПГ.

В сульфидах деформированных перидотитов концентрация ЭПГ повышена по сравнению с таковой по валу (на 2-3 порядка), выше чем в оливинах (на 3-4 порядка) и в стандартном оливине (на 4-5 порядка) (**Рис. 9**). На хондрит-нормализованном графике сульфидные спектры ЭПГ располагаются в диапазоне от 1 до 10 хондритовых единиц. В пределах этого диапазона перидотит Luв703/11 имеет повышенные содержания ИЭПГ и пониженные концентрации ПЭПГ в сульфидах (**Рис. 9а**). Форма спектров в ряду Ir-Rh в сульфидах, оливинах и валовом составе схожи, за исключением пика по Ru в оливине. Сульфиды характеризуются обеднением по Pt, а оливины и валовой состав – обогащением по Pt (**Рис. 9а**). Форма спектров в ряду Ir-Re в валовом составе пород, в сульфидах и оливинах в образце Uv27/01 схожая (**Рис. 9б**).

**Равномернозернистые перидотиты.** Содержание ЭПГ в оливине было измерено в одном образце равномернозернистого перидотита (Uv122/11). Оливин характеризуется почти прямым распределением ЭПГ в пределах 0,001 хондритовых единиц на хондрит-нормализованном графике (**Рис. 9г**). В нем концентрация ЭПГ на один порядок ниже такового в валовом составе пород. Формы спектров ЭПГ в оливине и валовом составе пород схожи, за исключением отрицательного пика по Ru в оливине. Распределение ЭПГ в оливине перидотита отличается повышенной концентрацией на два порядка от такового в чистом оливине. Формы спектров ЭПГ в оливинах схожи в рядах Ir-Pt и Pd-Re (**Рис. 9**).

**Мегакристаллические гарцбургит-дуниты.** Содержания ЭПГ были измерены в оливинах четырех образцов мегакристаллических гарцбургит-дунитов. Дуниты характеризуются широкими диапазонами составов по ИЭПГ – от 0,0001 до 0,01 хондритовых единиц и узкими диапазонами концентраций по ПЭПГ и Re – около 0,001 хондритовых единиц (**Рис. 6в**). Наблюдается обогащение ИЭПГ по сравнению с ПЭПГ.

Содержание Os и Ir изменяется в одинаковых диапазонах от 0,11 до 5,6 и от 0,11 до 5,21, соответственно. Средние значения Os (2,32) и Ir (2,26) ниже, чем в ПМ (Os 3,4, Ir 3,2, соответственно). Содержания Ru находятся диапазоне значений от 1,23 до 11,74 и среднее значение элемента (5,37) схоже с таковым в ПМ (5,0). Концентрации Rh и Re изменяются незначительно (0,19 – 0,92 и 0,01 – 0,07, соответственно). Содержания Pt и Pd варьируют в узких диапазонах – от 0,88 до 1,53 и от 0,16 до 0,68. Средние значения содержаний Pt (1,13) и Pd (0,43) существенно ниже, чем в ПМ (Pt 7,1, Pd 3,9).

Дуниты показывают положительную корреляцию между ИЭПГ и CaO+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (**Рис. 7ж**). ПЭПГ не коррелируют с (CaO+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) (**Рис. 7з**), но имеют положительную корреляцию с FeO. ИЭПГ с FeO не коррелируют (**Рис. 7е**).

**Эклогиты.** Концентрации ЭПГ в сульфидах были измерены в образцах трех эклогитов. В сульфидах двух эклогитов содержание ЭПГ превышает

такое в валовом составе в  $\sim 3$  раза, и находится в диапазоне от 0,01 до 10 хондритовых единиц (**Рис. 10б, в**). В целом, ЭПГ в сульфидах имеют такое же повышенное значение ПЭПГ и Re по отношению к ИЭПГ, как и валовые составы пород. Формы спектров ЭПГ в сульфидах и по валу схожи, за исключением некоторых особенностей. В образце Uv60/09 сульфиды представлены пентландитом, пирротином, халькопиритом и пиритом. На определение составов ЭПГ были отобраны сульфиды различной морфологии: 1) ограненные кристаллы со штриховкой (предположительно пирит) и 2) ксеноморфные зерна. Распределение ЭПГ в таких сульфидах идентично, кроме пониженного содержания Pd в первом типе и повышенной концентрации Pd во втором типе (**Рис. 10б**). Сульфиды отбирались из дробленной породы, поэтому определить их местоположение в породе не удалось. В образце Uv70/09 распределение ЭПГ в ряду Ir-Os прямое, и затем наблюдается резкое увеличение от Pt к Re в диапазоне от 0,1 до 10 х.е. (**Рис. 10в**). Формы спектров ЭПГ в этих образцах совпадают с таковыми в валовом составе, за исключением высокого пика по Ru в последнем (**Рис. 10б, в**).

Сульфиды из эклогита 11/99 имеют пониженную концентрацию ЭПГ на уровне 0,001 х.е. по сравнению валовым составом. Формы спектров схожи, за исключением отрицательного пика по Pd в сульфидах (**Рис. 10г**).

По данным Барнс с соавторами [Barnes et al., 2001] пентландит концентрирует все ЭПГ, за исключением Pt. Пирротин и пирит так же концентрируют все ЭПГ, за исключением Pt и Pd. Халькопирит реже всего содержит ЭПГ. Ru может распределяться в лаурит ( $RuS_2$ ) [Brenan et al., 2002]. Таким образом, сульфиды ксенолитов трубки Удачная имеют типичный состав для концентрации ЭПГ.

#### **Обоснование защищаемых положений.**

**Первое защищаемое положение.** Большая часть ЭПГ в перидотитах кимберлитовой трубки Удачная находятся в сульфидах и во вкраплениях интерметаллических соединений (5-15 мкм) в оливинах. Содержания ЭПГ в оливинах на 2-3 порядка ниже, чем в сульфидах.

Содержания ЭПГ в сульфидах деформированных перидотитов на 2-3 порядка выше такового в породе в целом (**Рис. 9**). Образцы деформированных перидотитов, в которых визуальны были обнаружены сульфиды, обогащены Pd и на графике представлены светлым цветом. Форма спектров ЭПГ сульфидов и породы в целом совпадает.

Концентрации ЭПГ в сульфидах из эклогитов так же на 2-3 порядка выше такового в породе (**Рис. 10**). В целом формы спектров ЭПГ сульфидов схоже с таковым в породе, за исключением пика по рутению в породе. Сульфиды в одном образце имеют содержания ЭПГ на один порядок ниже, чем в породе.

Содержания ЭПГ в оливинах деформированных перидотитов на один порядок ниже такового в валовом составе пород (**Рис. 9**). В равномернозернистых перидотитах оливины также имеют концентрацию ЭПГ на примерно 2 порядка ниже такового в породе. Содержание ЭПГ в

стандартном оливине ниже такового в оливине из породы на 2-3 порядка. В качестве стандарта был проанализирован ювелирный оливин из концентрата, без видимых включений. Он имеет концентрации ЭПГ ниже такового в оливинах деформированных, равномернозернистых перидотитов и гарцбургит-дунитов на 2-3 порядка. Следовательно, ЭПГ в оливинах перидотитов и гарцбургит-дунитов могут концентрироваться во включениях интерметаллических соединений. В оливинах мегакристаллических дунитов трубки Удачная нами были найдены микронные включения ( $< 10$  мкм) Fe-Ni-Mn- соединений (Рис. 4).

**Второе защищаемое положение.** При силикатном метасоматозе деформированных перидотитов кимберлитовой трубки Удачная увеличение количества граната и клинопироксена сопровождается обеднением пород тугоплавкими ЭПГ и неравномерным обогащением легкоплавкими ЭПГ, которое происходит в результате формирования субмикронных сульфидных фаз в межзерновом пространстве.

Содержание  $Al_2O_3$  в перидотитах понижается при увеличении степени частичного плавления и поэтому часто используется в качестве индекса деплетирования. Деформированные перидотиты трубки Удачная не показывают корреляций Os + Ir с увеличением содержаний  $Al_2O_3$  в породе, что подтверждает совместимый характер ИЭПГ (Рис. 7а). Между значениями Os/Ir и  $Al_2O_3$  нет корреляций, так как Os и Ir не фракционируют между собой (Рис. 7б). Деформированные перидотиты имеют тенденцию к уменьшению Pt/Ir отношений от 1,80 до 0,84 при понижении содержаний  $Al_2O_3$  (Рис. 7в). Также наблюдается тренд снижения Pd/Ir отношений от 1,90 до 0,02 ( $R^2=0,67$ ) в деформированных (Рис. 7г). Такие тренды возможно предполагают несовместимый характер Pd и Pt в исследованных породах. Эти характерные черты поведения ЭПГ также прослеживаются в ксенолитах перидотитов из кимберлитов других кратонов мира (Каапваль, Слэйв, Северо-Атлантический, Балтийский кратоны) [Lorand et al., 2013]. Pd/Pt отношения уменьшаются от 0,87 почти до 0 в деформированных перидотитах (Рис. 7д).

Распределение ЭПГ в изученных нами деформированных перидотитах схоже с таковым в гранатовых перидотитах переходного типа [Ionov et al., 2015; Pernet-Fisher et al., 2015] и в перидотитах кратона Каапваль [Pearson et al., 2004] (Рис. 12г). Данные по ЭПГ в стандартных образцах лерцолита (GP-13) и серпентинита (UB-N) схожи (Табл. 1), поэтому вероятно серпентинизация не влияет на содержание и распределение ЭПГ в ксенолитах из кимберлитов. Только концентрации Pd в некоторых наших деформированных образцах отличаются повышенными значениями. Предполагается, что ни одна Cu-Ni-обогащенная сульфидная фаза, которая концентрирует Pd, не выдержит экстремальных степеней плавления ( $> 50$  %), которое претерпели кратонные перидотиты, и содержание Pd в породах будет равняться нулю [Lorand et al., 2012]. Однако некоторые деформированные перидотиты обогащены палладием (Uv-268/02; Uv-257/02; Uv-30/04; Uv-27/01). В этих образцах сульфиды были обнаружены визуально, но только в

образце Uv-27/01 удалось отобрать нужное количество сульфидов для анализа методом изотопного разбавления. Форма спектров в ряду Rh-Re в сульфидах и в породе в целом деформированных перидотитов совпадает (Рис. 9б). Отрицательные пики по Pt в сульфидах и валовом составе пород (Рис. 9а) возможно свидетельствуют о том, что Pt могла удерживаться во время частичного плавления в интерметаллических соединениях. Таким образом, ИЭПГ и частично Pt в деформированных перидотитах могут находиться в Os-Ir-Pt сплавах, которые образовались при плавлении первичных мантийных сульфидов, а ПЭПГ во вторичных метасоматических сульфидах (пирротин, пентландит, халькопирит). На графике  $(La/Yb)_n - Pd$  в деформированных перидотитах наблюдается тренд понижения содержания Pd с увеличением  $(La/Yb)_n$  значения (Рис. 8). А с увеличением концентраций  $Al_2O_3 + CaO$  происходит повышение содержаний Pt + Pd в них (Рис. 7е). Следовательно, возрастание содержаний Pd в деформированных перидотитах происходило в рамках единого метасоматического процесса, вероятно во время модалного метасоматоза силикатными расплавами в результате формирования сульфидных фаз в интерстициях.

**Третье защищаемое положение. ЭПГ в равномернозернистых перидотитах кимберлитовой трубки Удачная содержатся во включениях интерметаллических соединений в оливинах. Вариации содержаний Os, Ir, Ru отражают различную исходную степень плавления перидотитов. Сульфиды метасоматического генезиса приурочены к обогащенным палладием образцам. Распределение ЭПГ в эклогитах кимберлитовой трубки Удачная находятся в пределах значений, характерных для MORB-базальтов.**

Равномернозернистые перидотиты показывают широкие диапазоны составов по ИЭПГ и Pt, и более узкий по Pd. Предполагается, что широкий диапазон по ИЭПГ в кратонных перидотитах является результатом неполной гомогенизации архейской мантии с хондритовым материалом, добавленным после образования ядра [Maier et al., 2009]. Однако среднее содержание Os, подсчитанное Майером с соавторами (2012) в кратонных перидотитах Южной Африки, мало отличается от такового в некротонных перидотитах, которые не могли обогатиться хондритовым материалом, так как образовались позже [Maier et al., 2012]. Другим объяснением широкого диапазона ИЭПГ в валовом составе перидотитов является «эффект самородка», который дают обогащенные Os, Ir, Ru, Pt реститовые минералы платиновой группы, [Logand et al., 2013], либо неравномерно распределенные зерна МТР. Перидотиты кратона Слэйв (Канада) показывают значимые корреляции между значениями Ru, Ir и Os ( $Ru/Ir = 2,04$   $Os/Ir = 1$ ), и линии корреляции пересекают оси X и Y практически в начале координат, что предполагает нахождение этих элементов в одной фазе [Irvine et al., 2003]. Pt также положительно коррелирует с Os и Ir, однако пересекает ось Y в значении 1–2 мг/т. Ирвин с соавторами предположили [Irvine et al., 2003], что среди возможных мантийных минералов только наличием МТР или Pt-Ir-Os

интерметаллических соединений возможно объяснить нахождение ЭПГ в перидотитах кратона Слэйв. Аналогично, низкие и высокие содержания осмия в перидотитах трубки Удачная объясняются неравномерным распределением в породе интерметаллических соединений [Pearson et al., 1995; Ionov et al., 2015].

В исследованных нами равномернозернистых перидотитах наблюдаются корреляции между Ir и Os ( $R^2=0,99$ ), где линия тренда аппроксимации пересекает ось в начале координат (**Рис. 11а**). Положительная корреляция также наблюдается между содержаниями Pt и Ir ( $R^2=0,84$ ), но линия тренда аппроксимации пересекает ось X в значении  $\sim 0,8$  мг/т (**Рис. 11б**). Положительная корреляция Ir с Pt показывает, что Pt фракционирует с Ir во время частичного плавления, однако часть пород с наибольшей степенью частичного плавления характеризуются повышенными содержаниями Pt, а перидотиты с меньшими степенями плавления – пониженными содержаниями Pt (**Рис. 7в**). Таким образом, по-видимому, во время частичного плавления Pt как несовместимый элемент уходила в расплав, но при повышении степени экстракции расплава, давления, и низкой активности серы удерживалась в Pt-Os-Ir интерметаллических соединениях, которые образовались при плавлении мантийных сульфидов. Поэтому, при таких условиях, одним из объяснений широкого диапазона концентраций ИЭПГ могут быть Os-Ir- и Pt-Os-Ir-интерметаллические фазы, неравномерно распределённые либо в интерстициях, либо в виде включений микронных размеров в силикатных минералах. В оливинах мегакристаллических дунитов трубки Удачная были найдены микронные включения ( $< 10$  мкм) Fe-Ni-Mn- соединений (**Рис. 4**). Следовательно, ксенолиты с низкими содержаниями ИЭПГ и Pt имели небольшое количество подобных фаз, а перидотиты с высокими значениями этих элементов – повышенные концентрации таких соединений (Табл. 1). Также низкие и высокие содержания Ir и Os в породах могут быть результатом потери ЭПГ при растворении сульфидов во время проникновения расплава в некоторых образцах [Rehkamper et al., 1999] или повторного осаждения ИЭПГ-обогащенных расплавов в виде метасоматических сульфидов. В исследованных нами зернистых перидотитах только в одном ксенолите были обнаружены сульфиды метасоматического генезиса. Этот образец обогащен Ir, Os и Pd. Равномернозернистые перидотиты формируют тренд уменьшения количеств Pt + Pd с увеличением содержаний  $Al_2O_3 + CaO$ , однако четкой корреляции не наблюдается (**Рис. 7з**). Положительная корреляция ( $R^2=0,63$ ) прослеживается между значениями ЭПГ и FeO (**Рис. 7е**). Зависимости содержания Pd от степени метасоматического обогащения  $(La/Yb)_n$  не наблюдается (**Рис. 8**). Поэтому, можно отметить, что содержание ЭПГ не зависит от модального метасоматоза в равномернозернистых перидотитах, тем более что три образца с минимальными значениями FeO и  $Al_2O_3+CaO$  показывают наличие только скрытого метасоматоза.

Таким образом, ЭПГ в равномернозернистых перидотитах возможно концентрируются в Os-Ir- и Pt-Os-Ir- интерметаллических фазах,

неравномерно распределённых либо в интерстициях, либо в виде включений микронных размеров в силикатных минералах.

Эклогиты кимберлитовой трубки Удачная по составу главных элементов сравнимы с базальтами срединных океанических хребтов (MORB) за исключением значительного обогащения крупноионными литофильными элементами (LILE: Rb, Ba, K, Sr) [Agashev et al., 2018]. По редкоэлементному составу эклогиты трубки Удачной в разной степени обогащены по сравнению с ПМ несовместимыми элементами, с наиболее выраженным обогащением Rb, Ba, K, Sr (LILE). Концентрации высоко-зарядных элементов (HFSE) и редкоземельных элементов в эклогитах сопоставимы с таковыми в MORB.

В эклогитах наблюдается положительная корреляция значений Sr/Lu с Eu\*, что указывает на различное количество плагиоклаза в эклогитовом протолите [Рис. 10 в работе Agashev et al., 2018]. В целом, такие геохимические характеристики указывают на фракционирование минералов в протолите океанической коры для эклогитов кимберлитовой трубки Удачная. Это подтверждается также данными по главным элементам. Эклогиты имеют отрицательную корреляцию между MgO и SiO<sub>2</sub>, что является признаком частичного плавления. Таким образом, эклогиты кимберлитовой трубки Удачная претерпели частичное плавление при субдукции океанической коры [Рис. 13 в работе Agachev et al., 2018].

В эклогитах наблюдается обогащение ПЭПГ и Ru по сравнению с ИЭПГ. Распределение ЭПГ в эклогитах трубки Удачная находятся в пределах таковых в MORB-базальтах [Bezos et al., 2004], за исключением Ru (**Рис. 13**). Эклогиты отличаются высокими содержаниями Ru по отношению к таковым в MORB. Таким образом, распределение ЭПГ в изученных эклогитах являются еще одним аргументом в пользу модели их происхождения в результате субдукции океанической коры в мантию.

### **Заключение.**

В ходе проведения комплексного исследования распределения ЭПГ в мантийных ксенолитах кимберлитовой трубки Удачная были сделаны следующие выводы:

1) Распределение ЭПГ в исследованных перидотитах схоже с таковым в кратонных перидотитах мира. Перидотиты в целом характеризуются повышенным содержанием ИЭПГ по отношению к ПЭПГ. Однако несколько образцов деформированных перидотитов кимберлитовой трубки Удачная обогащены Pd.

2) Эклогиты характеризуются повышенными содержаниями ПЭПГ по отношению к ИЭПГ. Форма спектров ЭПГ, нормированных на хондрит, схоже с таковым в эклогитах мира.

3) ЭПГ в исследованных мантийных ксенолитах содержатся в сульфидах и во включениях интерметаллических соединений в оливинах. В перидотитах оливины содержат ЭПГ всего на 2-3 порядка ниже, чем сульфиды, и на один порядок ниже, чем валовый состав пород. Содержание

ЭПГ в оливинах находится в пределах 0,001 х.е. В то время как содержания ЭПГ в чистом оливине находятся в пределах 0,00001 х.е.

В двух эклогитах сульфиды имеют содержание ЭПГ на 2-3 порядка выше такового в валовом составе пород. Формы спектров ЭПГ, нормированных на хондрит, в сульфидах и сопутствующих им породах схожи. Сульфиды только в одном образце эклогита показывают пониженное содержание ЭПГ по отношению к валовому составу пород. Это возможно объясняется тем, что сульфиды в этом образце являются немагматическими, а вторичными, которые образуются в приповерхностных условиях.

4) В деформированных перидотитах во время силикатного метасоматоза увеличение количеств граната и клинопироксена сопровождалось уменьшением содержаний тугоплавких ЭПГ. Концентрации легкоплавких ЭПГ увеличивались в результате формирования субмикронных фаз в межзерновом пространстве пород деформированных перидотитов. В равномернозернистых перидотитах и гарцбургит-дунитах ЭПГ содержатся в виде включений интерметаллических соединений в оливинах.

5) В эклогитах содержание ЭПГ соответствует составам ЭПГ в базальтах срединных океанических хребтов (MORB). Это является дополнительным аргументом в пользу образования эклогитов в результате субдукции океанической коры в мантию.

Таблица 1. Содержания ЭПГ в изученных породах (мг/т).

Породы	Os	Ir	Ru	Rh	Pt	Pd	Re
<b>Деформированные перидотиты</b>							
Uv-268/02	3,59	3,22	6,83	1,40	7,06	6,13	0,50
Uv-257/02	2,85	3,08	6,18	1,25	5,55	4,04	0,66
Uv-30/04	3,32	3,61	6,27	1,55	5,93	2,67	0,39
Uv-3/05	2,63	2,79	4,27	0,72	3,61	0,87	0,23
Uv-24/05	2,41	3,97			5,07	0,09	0,24
Uv-97/02	3,29	3,22	6,11	0,95	3,12	1,00	0,14
Uv-33/04	3,66	3,64	6,83	0,80	3,05	0,08	0,35
Uv-285/02	3,52	3,55	6,99	1,35	4,97	1,59	0,16
Uv-18/04	4,06	4,02	7,96	1,50	5,19	0,95	0,55
Uv-27/01	3,19	3,51	2,02	0,85	3,27	1,83	0,62
Luv-703/11	0,20	2,45	4,99	1,07	15,8	4,54	0,46
Среднее	3,25	3,46	5,94	1,15	4,68	1,93	0,38
Стандотклон	0,50	0,39	1,77	0,32	1,36	1,90	0,19
Среднее GP-13*	3,39	3,46	6,54	1,29	6,52	6,07	0,30
<b>Равномернозернистые перидотиты</b>							
Uv-36/11	0,19	0,14	1,61	0,07	0,26	0,87	0,04
Uv-38/11	4,12	2,36	5,68	0,75	0,93	2,34	0,26
Uv-122/11	8,56	5,13	14,78	1,49	11,05	3,35	0,06
Uv-155/11	3,79	2,72	3,63	0,16	5,97	1,62	0,24
Uv-538/10	1,83	1,27	4,50	0,31	0,75	2,67	0,01
Uv-58/11	3,86	2,64	4,46	0,28	5,84	1,27	0,01
Среднее	3,73	2,38	5,78	0,51	4,13	2,02	0,10
Стандотклон	2,81	1,67	4,61	0,53	4,26	0,93	0,11
Среднее GP-13*	3,71	3,64	6,94	1,73	6,80	5,22	0,31
<b>Эклогиты</b>							
Uv-11/99	2,75	2,47	10,74	1,33	9,75	9,76	0,58
Uv-60/09	0,06	0,10	9,64	0,32	6,02	8,76	0,82
Uv-70/09	0,03	0,03	2,30	0,04	0,99	2,09	0,37
Среднее	0,95	0,87	7,56	0,56	5,58	6,87	0,59
Стандотклон	1,56	1,39	4,58	0,68	4,40	4,17	0,22
Среднее GP-13*	3,39	3,46	6,54	1,29	6,52	6,07	0,30
UBN-1**	3,69	3,79	6,77	1,90	7,90	5,93	0,20
GP-13 (лит-ра)	3,87	3,56	6,97	1,25	7	5,64	0,33
Кимберлит							
UK-1		1,17	2,06	1,2	1,62	3,3	0,46
<b>Оливины гарцбургит-дунитов</b>							
Luv-833	0,11	0,11	1,23	0,19	0,88	0,67	0,01
Luv-834/09	1,49	1,68	3,27	0,27	0,74	0,22	0,07
Luv-43/01	5,60	5,21	11,74	0,92	1,37	0,16	0,03
Luv-703/13	2,09	2,04	5,26	0,57	1,53	0,68	0,06
Среднее	2,32	2,26	5,37	0,49	1,13	0,43	0,04
Стандотклон	2,34	2,14	4,55	0,33	0,38	0,28	0,03
Среднее GP-13*	3,79	3,22	7,08	1,23	6,59	5,72	0,32
<b>Оливины перидотитов</b>							
Luv 703/11 OI	0,44	0,42	1,92	0,13	2,16	1,75	0,14
Uv-122/11 OI	0,36	0,34	0,40	0,13	0,82	0,37	0,01
Uv-27/01 OI	2,35	0,16	0,26	0,09	0,63	0,24	0,32
<b>Оливин (стандарт)</b>		0,0019	0,014	0,0015	0,014	0,055	0,0099

<b>Сульфиды из деформированных перидотитов</b>							
<b>Uv-27/01</b>		249	476	65	423	213	156
<b>Luv 703/11</b>		1917	4813	795	1456	1273	1917
<b>Сульфиды из эклогитов</b>							
<b>Uv-11/99</b>	0,14	1,35		0,60	0,33	0,30	0,14
<b>Uv-60/09 (1)</b>	21,83	68,22	68,00	1803,90	883,39	599,68	21,83
<b>Uv-60/09</b>	15,15	48,81	160,00	2639,52	11346,22	773,81	15,15
<b>Uv-70/09</b>	8,15	27,53	5,60	41,80	122,23	118,23	8,15

Примечание. \*Стандартный образец лерцолита.

\*\*Стандартный образец серпентинита

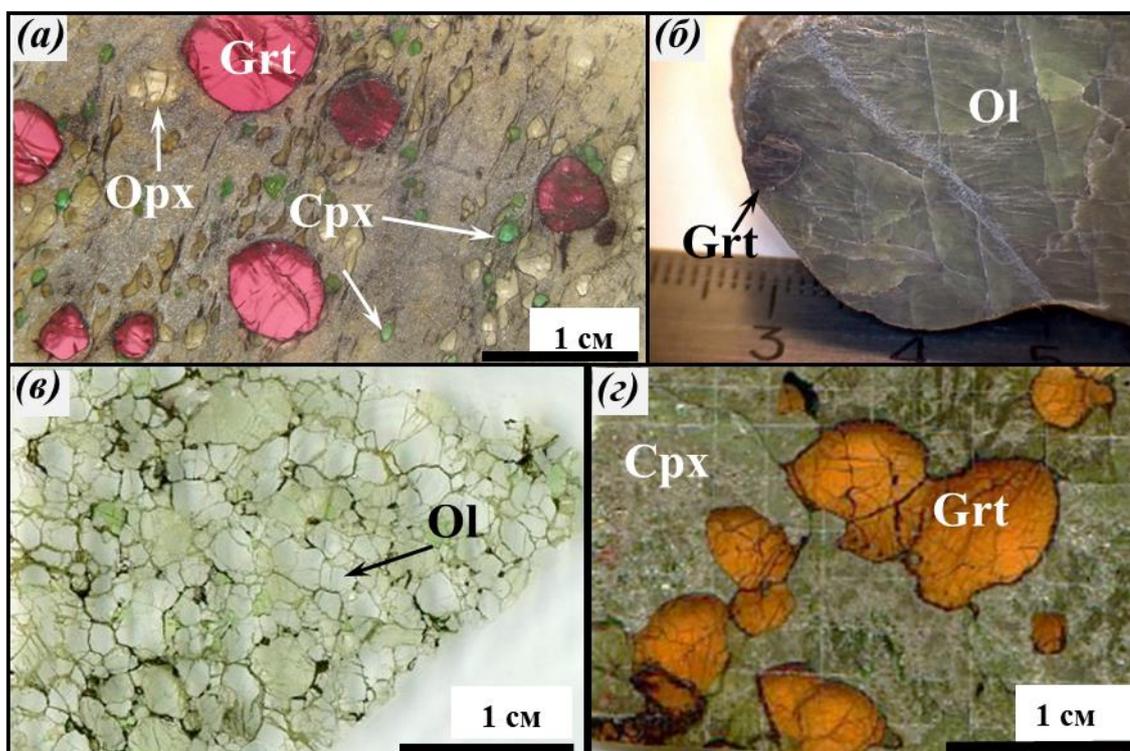


Рисунок 1. Мантийные ксенолиты кимберлитовой трубки Удачная. *а)* деформированные перидотиты; *б)* мегакристаллические гарцбургит-дуниты; *в)* равномернозернистые перидотиты; *г)* эклогиты.

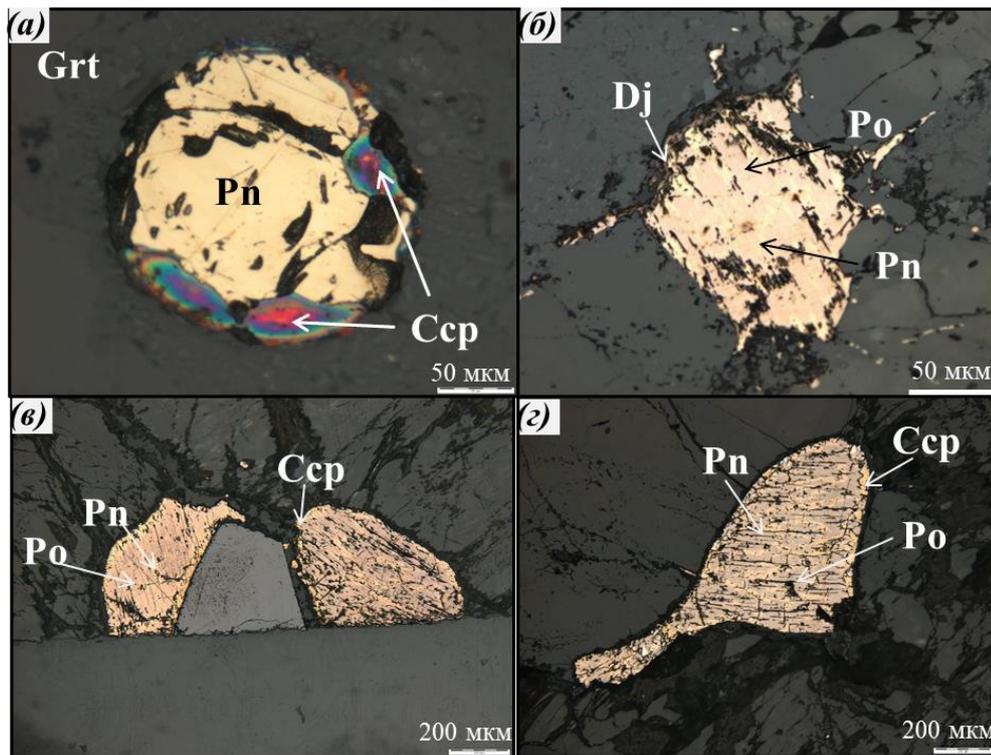


Рисунок 2. Полисульфидные агрегаты в мантийных ксенолитах кимберлитовой трубки Удачная. *а, б)* деформированные перидотиты; *в, з)* ЭКЛОГИТЫ.

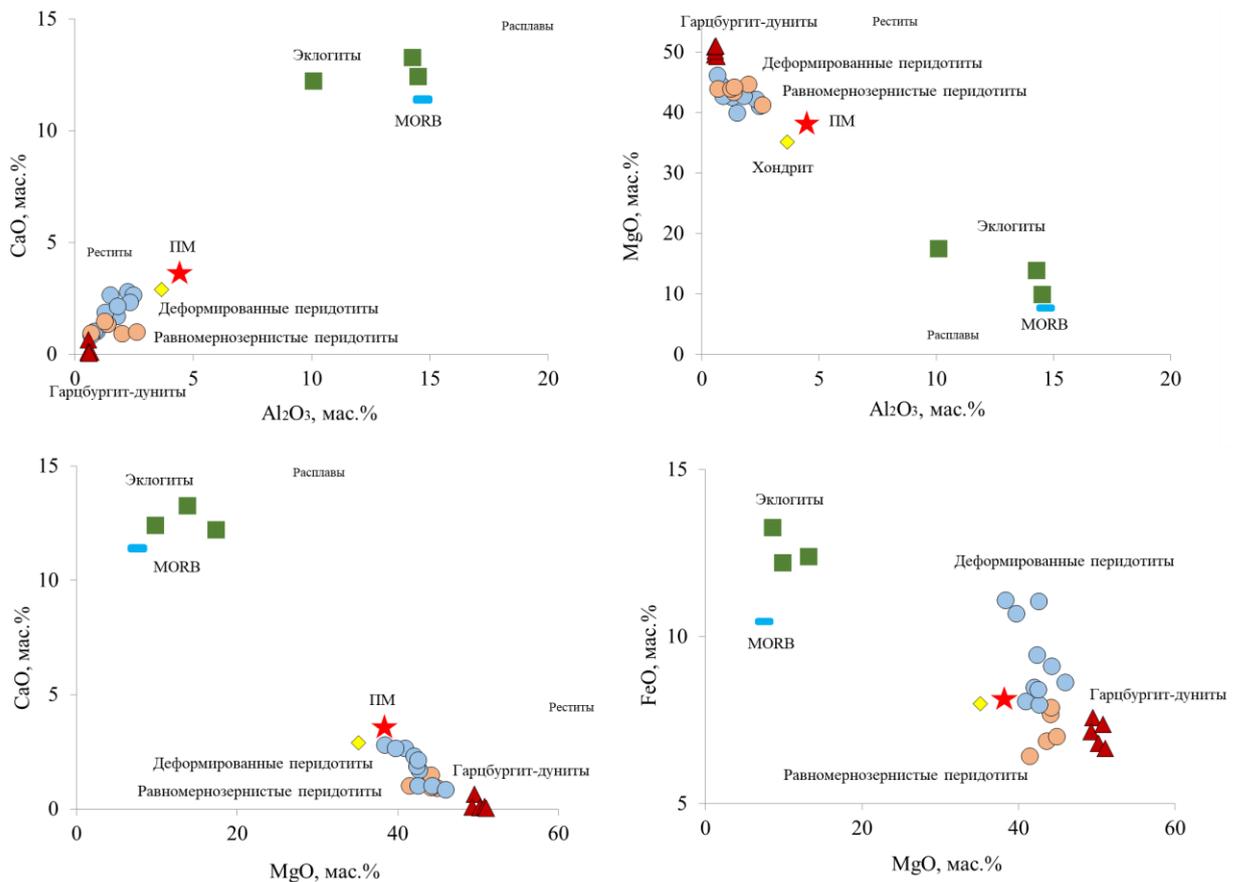


Рисунок 3. Составы исследованных пород по главным элементам. ПМ – примитивная мантия; хондрит [McDonough, Sun, 1995]; гарцбургит-дуниты тр. Удачная [Похиленко, 1990]; MORB [Gale et al., 2013].

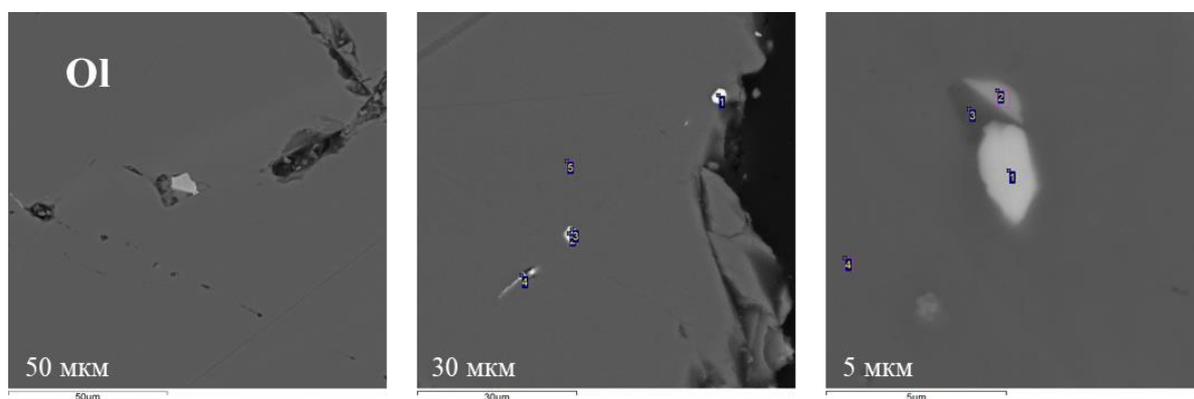


Рисунок 4. Включения Fe-Ni-Co-Mn соединений в оливинах мегакристаллических гарцбургит-дунитов [Похиленко Л.Н., личное сообщение].

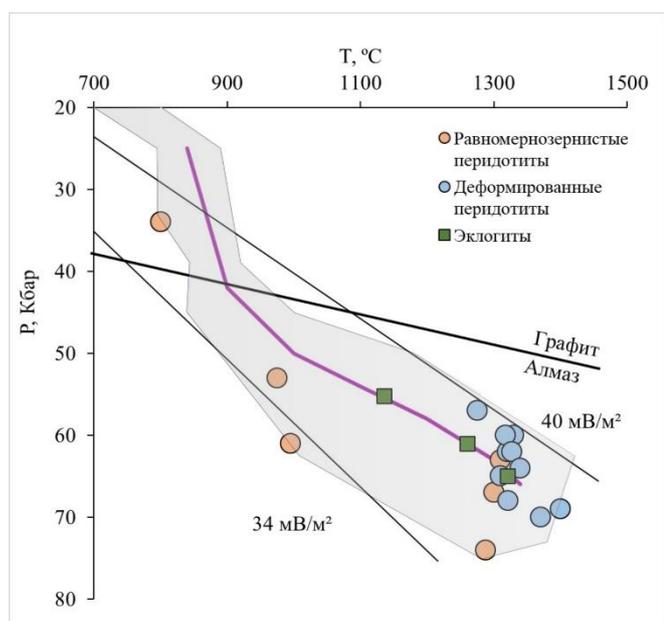


Рисунок 5. P-T параметры равновесия минеральных парагенезисов перидотитов и эклогитов из кимберлитовой трубки Удачная. Линиями обозначены геотермы согласно [Hasterok D., Chapman D.S., 2011], сплошная линия – фазовый переход графит/алмаз [Rudnick and Nyblade, 1999], серая область – геотерма для перидотитов кимберлитовой трубки Удачная [Тычков и др., 2014], фиолетовая линия – средняя геотерма для перидотитов кимберлитовой трубки Удачная.

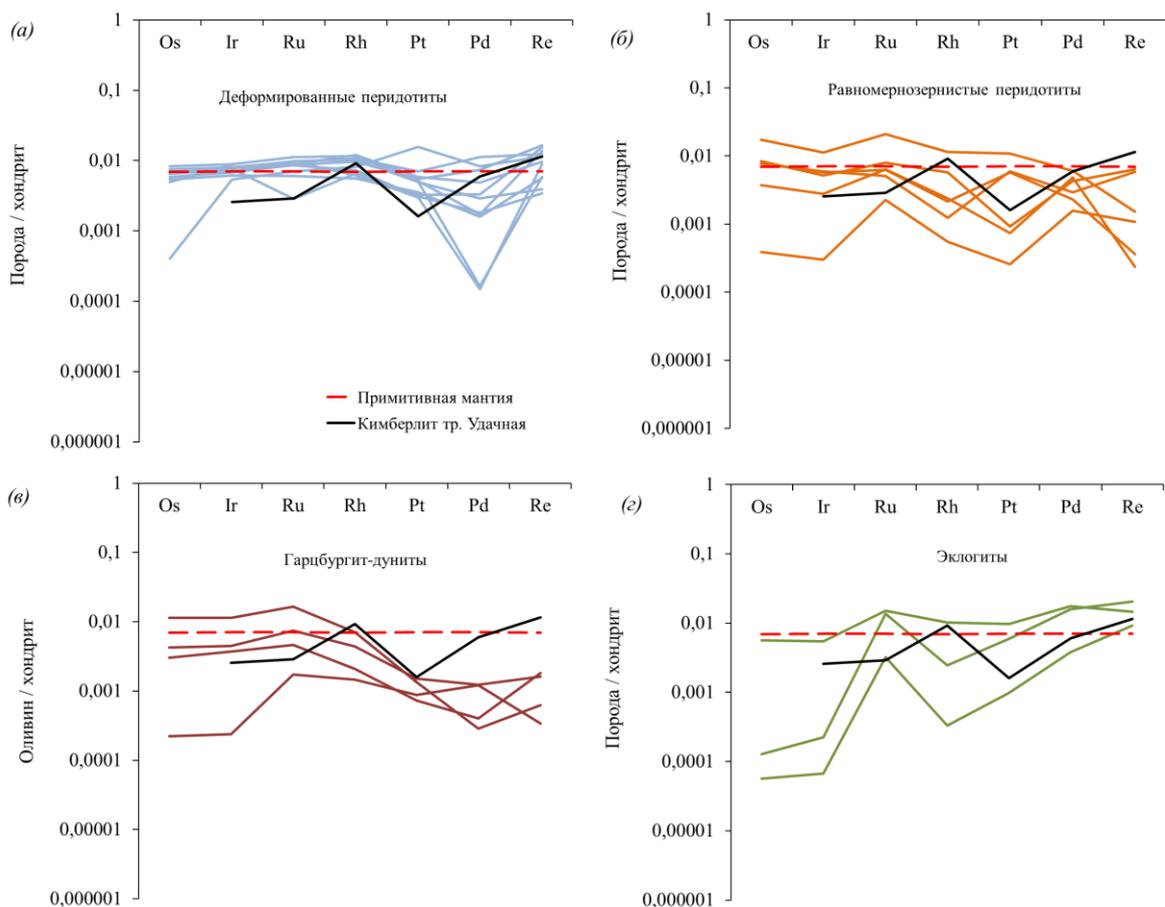


Рисунок 6. Распределение ЭПГ, нормированное на состав хондрита, в мантийных ксенолитах кимберлитовой трубки Удачная. Красная пунктирная линия – примитивная мантия [McDonough, Sun, 1995]; черная линия – кимберлит УК-1 тр. Удачная.

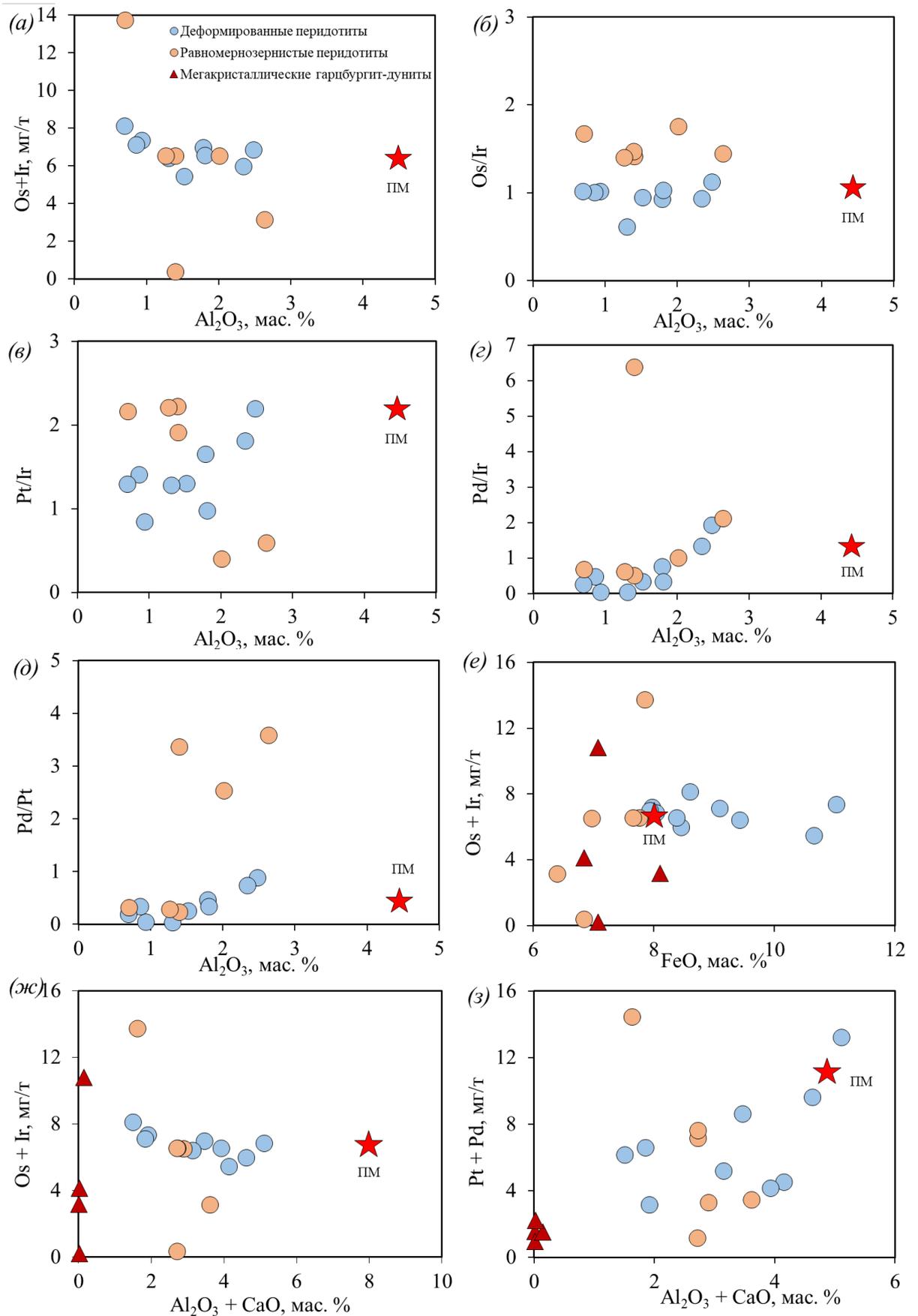


Рисунок 7. Ковариации ЭПГ (мг/г) с Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (а-д), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + CaO (е) и FeO (ж, з) (мас. %) в деформированных и зернистых перидотитах из кимберлитовой трубки Удачная: 1 – деформированные перидотиты; 2 –

равномернозернистые перидотиты; 3 – примитивная мантия [McDonough, Sun, 1995].

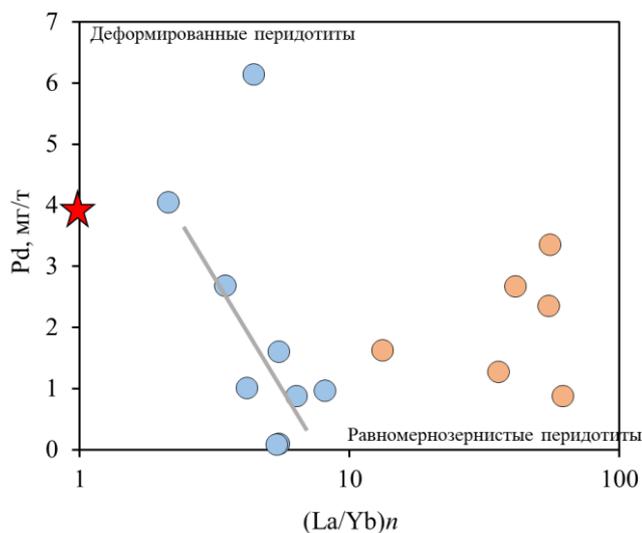


Рисунок 8. Зависимость Pd от  $(La/Yb)_n$  в деформированных и равномернозернистых перидотитах трубки Удачная.

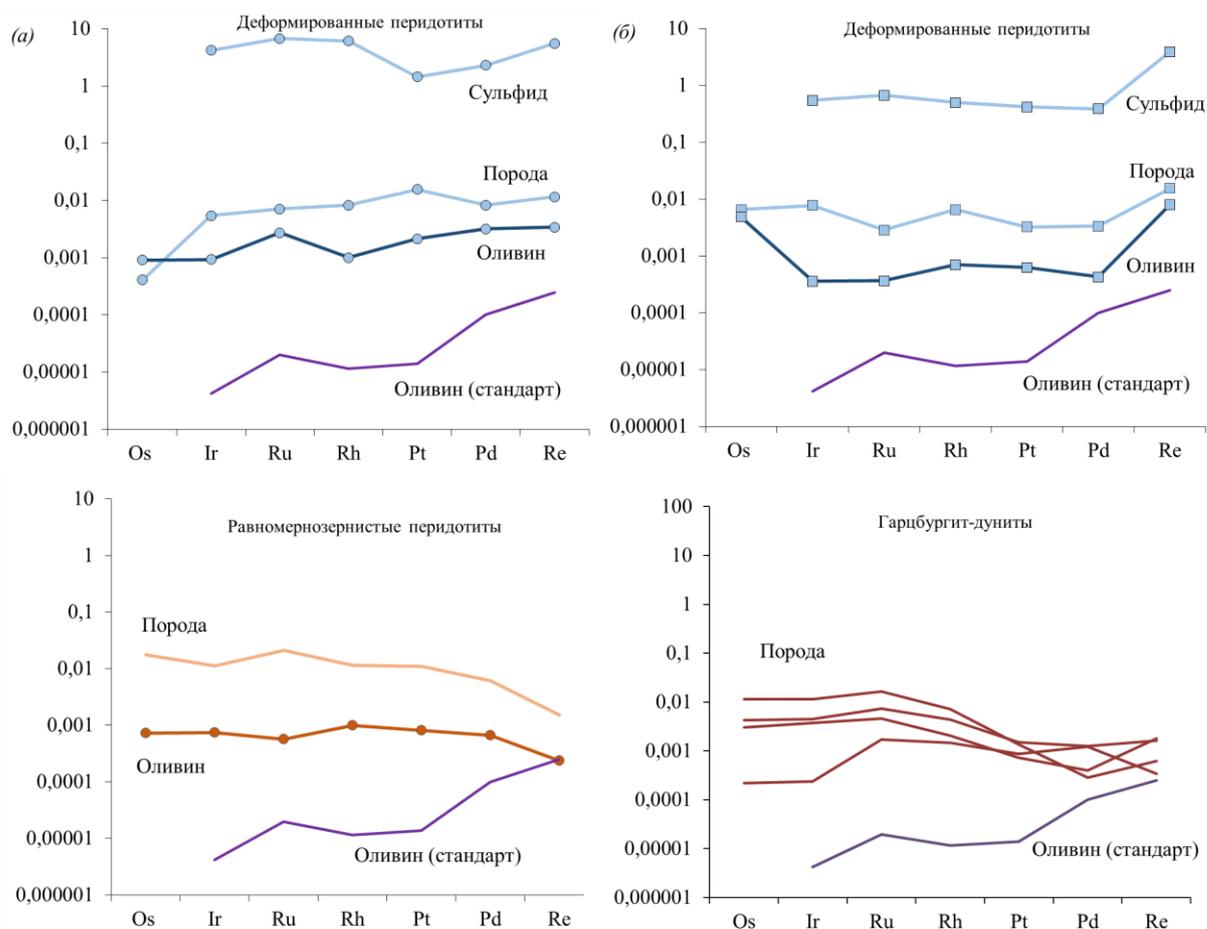


Рисунок 9. Распределение ЭПГ в оливинах, сульфидах и валовом составе пород мантийных перидотитов кимберлитовой трубки Удачная.

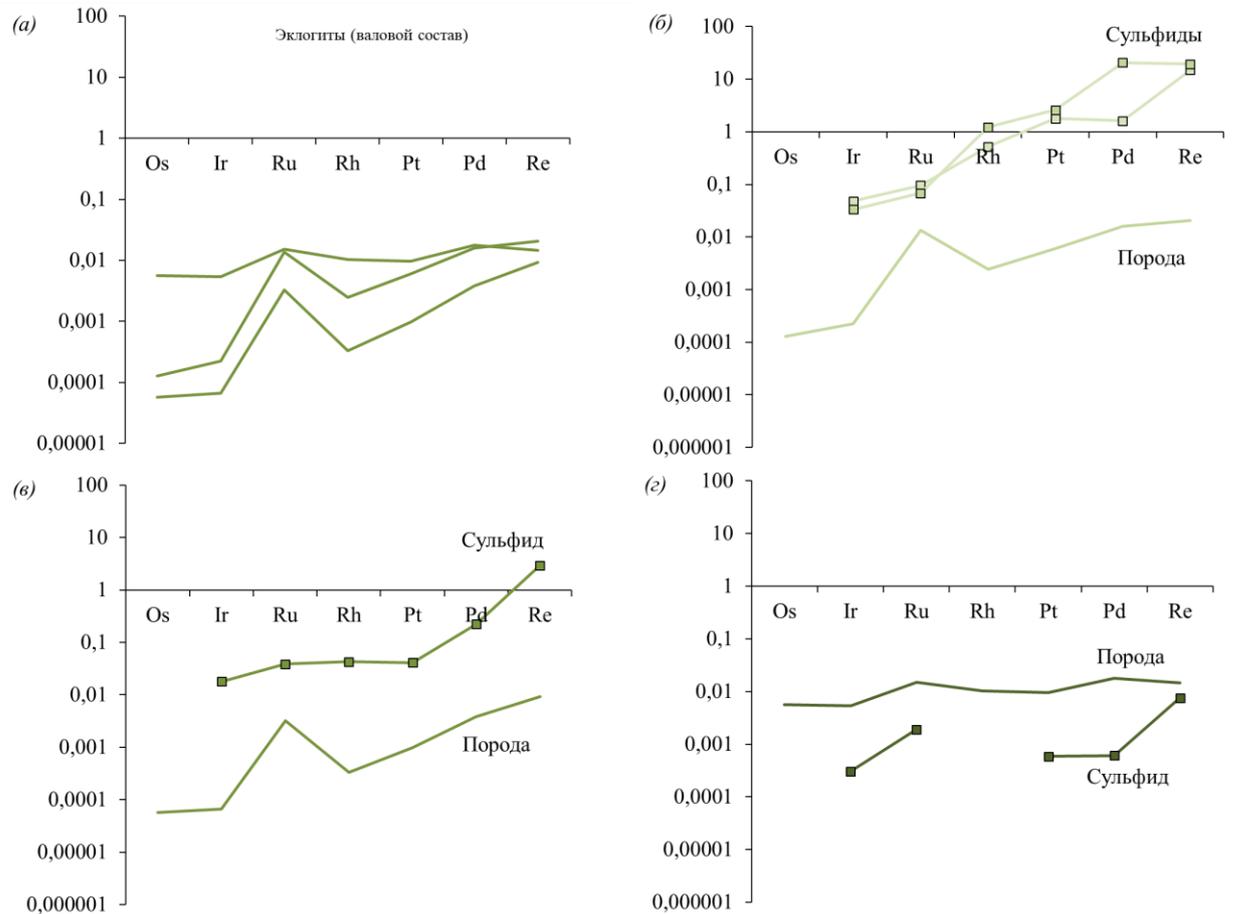


Рисунок 10. Распределение ЭПГ, нормированное на хондрит, в эклогитах кимберлитовой трубки Удачная и в их сульфидах.

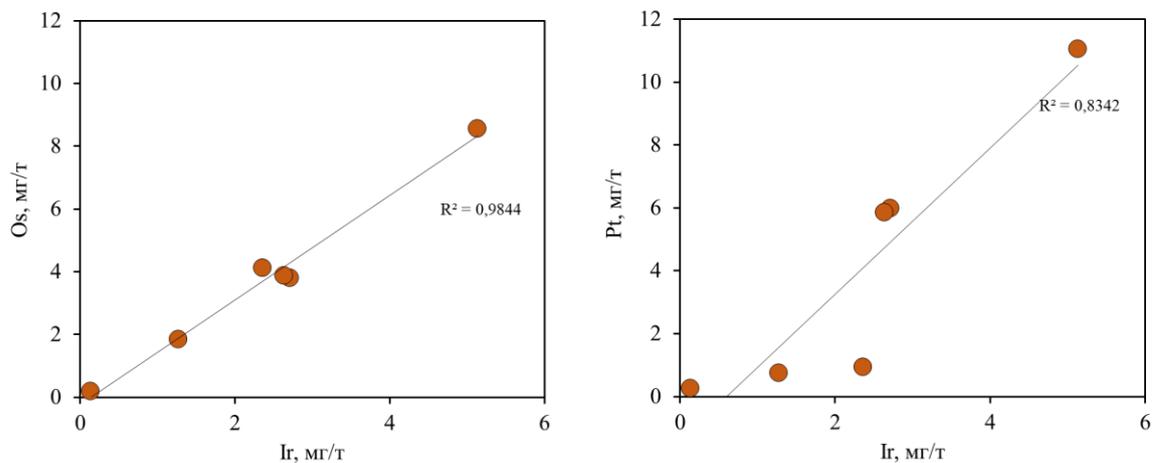


Рисунок 11. Ковариации Ir с Os и Pt в зернистых перидотитах из кимберлитовой трубки Удачная.

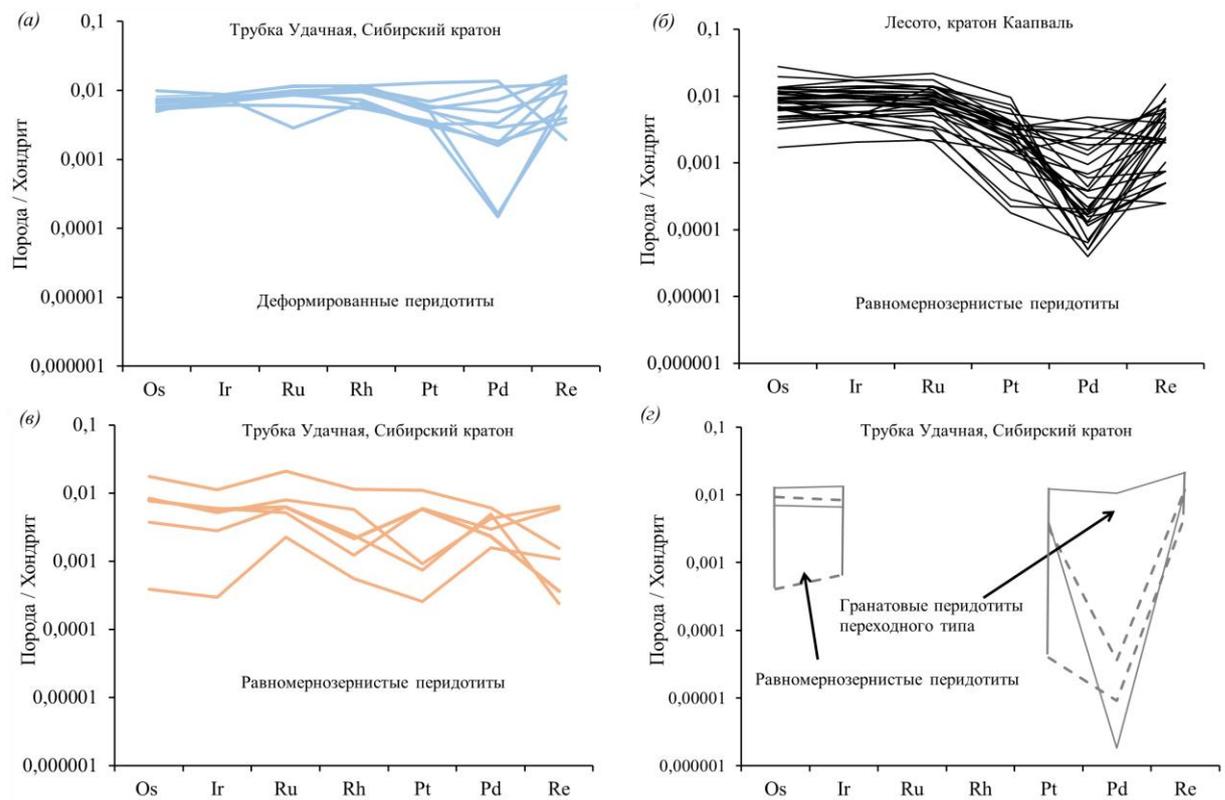


Рисунок 12. Распределение ЭПГ, нормированное на хондрит, по нашим данным и в кратонных перидотитах мира по данным [Ionov et al., 2010, 2015; Pearson et al., 2004].

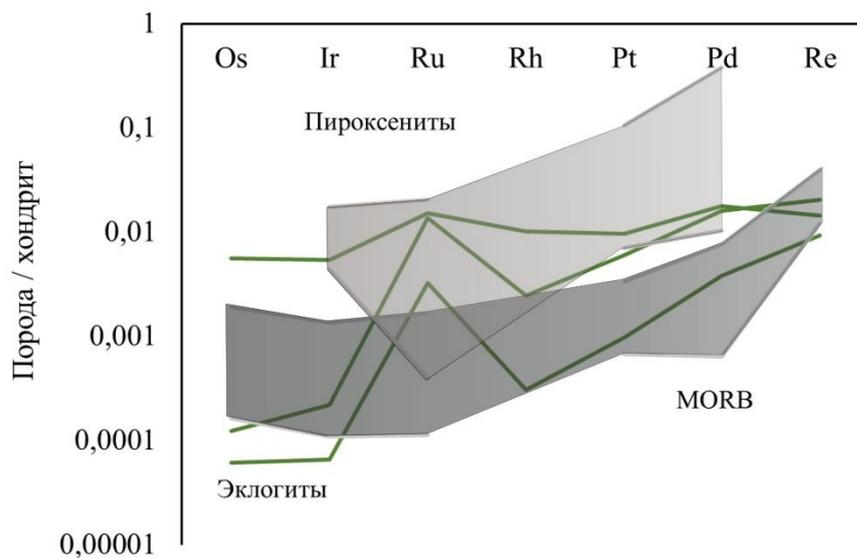


Рисунок 13. Распределение ЭПГ в ксенолитах эклогитов трубки Удачная, пироксенитов (Гавайи) [Sen, 2011] и в MORB-базальтах [Bezou et al., 2004].

Основные публикации по теме диссертации.

- Статьи в рецензируемых журналах.

1) О.В. Ильина, Н.С. Тычков, А.М. Агашев, А.В. Головин, А.Э. Изох, О.А. Козьменко, академик РАН Н.П. Похиленко. Распределение элементов группы платины в деформированных лерцолитах трубки Удачная (Якутия) // Доклады Академии Наук, 2016, т. 467, № 6, с. 694-697.

2) Ильина О.В., Агашев А.М., Кожемякина Е.А., Похиленко Л.Н., Похиленко Н.П. Сравнительная минералого-геохимическая характеристика и состав элементов группы платины деформированных и зернистых перидотитов трубки Удачная-Восточная (Якутия) // Геология и Геофизика, 2022, № 9, с. 61-80.

- Тезисы.

1) Ильина О.В., Тычков Н.С., Агашев А.М. Распределение элементов группы платины в породах литосферной мантии по данным исследования ксенолитов тр. Удачная (Якутия) // Материалы III Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов памяти ак. А.П. Карпинского // ФГУП «ВСЕГЕИ», СПб, 2013, с. 401-404.

2) Ильина О.В., Тычков Н.С., Агашев А.М. Распределение элементов группы платины в породах литосферной мантии по данным исследования ксенолитов тр. Удачная (Якутия) // Материалы II Всероссийской молодежной научно-практической школы-конференции «Науки О Земле. Современное состояние». Геол. полигон «Шира», Респ. Хакасия, 2014.

3) Ильина О.В., Тычков Н.С., Агашев А.М. Особенности распределения элементов группы платины в деформированных перидотитах тр. Удачная (Якутия) // Материалы докладов VII Сибирской научно-практической конференции молодых ученых по наукам о Земле // ИГМ СО РАН, Новосибирск, 2014, с. 132-133.

4) O.V. Ilyina, L.N. Pokhilenko, A.M. Agashev, N.S. Tychkov, E.A. Surgutanova. The comparative characteristic of PGE distribution in the mantle xenoliths of the Udachnaya pipe (Siberian craton) from the deformed and granular peridotites and eclogites. // European Geoscience Union of General Assembly 2016, Vienna, Austria, 17-22 April.

5) O.V. Ilyina, L.N. Pokhilenko, A.M. Agashev, N.S. Tychkov, J.A. Surgutanova. PGE distribution features in mantle xenoliths from kimberlite Udachnaya pipe (Yakutia) // Материалы докладов восьмой международной Сибирской конференции молодых ученых по наукам о Земле // ИГМ СО РАН, Новосибирск, 2016, с.

- 6) Olga Ilyina, Pokhilenko Lyudmila, Alexey Agashev, Nikolay Tychkov, Jane Surgutanova. PGE distribution features in mantle xenoliths from kimberlite Udachnaya pipe (Yakutia) // "The 8<sup>th</sup> International Siberian Early Career GeoScientists Conference", 2016, Novosibirsk, Russia, pp. 13-24.
- 7) O.V. Ilyina, L.N. Pokhilenko, A.M. Agashev. The platinum group elements (PGE) distribution in the minerals from the peridotites of the Udachnaya pipe (Yakutia) // Goldschmidt 2016, Yokohama, Japan, 26 June – 1 July.
- 8) Ильина О.В., Похиленко Л.Н., Агашев А.М. Исследование ЭПГ в перидотитовых ксенолитах кимберлитовой трубки Удачная. XI-ая Международная школа по наукам о Земле ISES-2017 // г. Миасс, Россия, 3-7 августа, 2017.
- 9) O.V. Ilyina, L.N. Pokhilenko, A.M. Agashev. Characteristics of platinum group elements (PGE) distribution in mantle xenoliths from kimberlite Udachnaya pipe (Yakutia) // Goldschmidt 2017, Paris, France, 13 – 18 August.
- 10) Ilyina O.V., Sharygin I.S., Agashev A.M., Pokhilenko L.N. Interpretation of the sulfide assemblages in garnet sheared peridotites from the Udachnaya kimberlite pipe. Magmatism of the Earth and related strategic metal deposits 2018 // Moscow, Russia, 3 – 9 September.
- 11) Ilyina O.V., Pokhilenko L.N., Agashev A.M. Interpretation of PGE distribution into the olivines and sulfides of sheared peridotites of the Udachnaya kimberlite pipe (Yakutia) // European Geoscience Union of General Assembly 2019, Vienna, Austria, 7-12 April.