

*На правах рукописи*



**НИКИФОРОВ АНДРЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ**

**МИНЕРАЛЬНЫЕ АССОЦИАЦИИ И ЗОНЫ ЭПГ –  
ХРОМИТОВОГО ОРУДЕНЕНИЯ  
УЛЬТРАБАЗИТОВОГО МАССИВА  
ПАДОС-ТУНДРА (КОЛЬСКИЙ ПОЛУОСТРОВ)**

25.00.11 - геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых,  
минералогия.

25.00.04 - петрология, вулканология

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата геолого-минералогических наук

Новосибирск, 2021

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Череповецкий государственный университет»

**Научные руководители:**

**Барков Андрей Юрьевич**, доктор геолого-минералогических наук, заведующий научной лабораторией «Промышленная и рудная минералогия» Череповецкого государственного университета.

**Толстых Надежда Дмитриевна**, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник ИГМ СО РАН

**Официальные оппоненты:**

**Макеев Александр Борисович**, доктор геолого-минералогических наук, профессор, ведущий научный сотрудник ИГЕМ РАН,

**Орсов Дмитрий Анатольевич**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник ГИ БНЦ СО РАН

**Ведущая организация:** Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет»

Защита состоится 30 июня 2021 в 10:00 на заседании диссертационного совета Д 003.067.03 при Федеральном государственном учреждении науки Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИГМ СО РАН и на сайте: <https://www.igm.nsc.ru/index.php/obrazov/dissovet/d-003-067-03/zashchity>

Автореферат разослан 27 мая 2021

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Туркина О.М.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность исследования.**

Настоящая работа является актуальной и экономически значимой, поскольку она решает проблемы минерогенеза, петро- и рудогенеза хрома, ассоциирующих с ним Ni, Ti, V и элементов платиновой группы (ЭПГ), являющихся стратегическими металлами МСБ РФ. Выявление закономерностей размещения хромитовых руд, их составов и условий образования - является фундаментальной задачей, имеющей практическое значение. Объектом исследования является массив Падос-Тундра, наиболее крупный представитель Серпентинитового пояса Кольского полуострова. В разные годы он исследовался А.М. Шукевичем (1933), И.В. Галкиным (1936), С.А. Дюковым (1950), Д.Ф. Мурашовым (1958), Л.А. Виноградовым (1971), Б.А. Шлайфштейном (1987), С.А. Горбачёвой (2000), В.П. Мамонтовым и В.С. Докучаевой (2005) и другими геологами.

**Целью работы** является выявление закономерностей магматической дифференциации при формировании докембрийского ультрабазитового массива Падос-Тундра, а также эволюция его рудно-магматической системы и определение рудогенерирующих факторов. Для достижения цели решались следующие **задачи**: 1) выявление магматической расслоенности и положения зон хромитовой и Ru-Os-Ir минерализации; 2) изучение минеральных ассоциаций и парагенезисов; 3) установление геохимической зональности интрузива; 4) исследование трендов кристаллизации и вариаций составов главных породообразующих силикатов и генераций хромитов по представительным разрезам интрузива; 5) описание особенностей рудогенеза новых и уникальных соединений тугоплавких платиноидов.

### **Фактический материал и методы исследований**

Работа основана на оригинальной коллекции из более чем 300 представительных проб и результатах более тысячи анализов минералов и редких элементов в пробах, выполненных в Аналитическом центре многоэлементных и изотопных исследований, ИГМ СО РАН, г. Новосибирск. Составы хромитов (Chr), оливина (Ol), ортопироксена (Opx), амфиболов, сульфидов и др. минералов определены на электронно-зондовом

микроанализаторе JEOL JXA-8100 (WDS). Составы минералов платиновой группы (МПП) и ассоциирующие с ними фазы, а также изображения в обратно-рассеянных электронах (BSE) были получены с использованием сканирующего электронного микроскопа (SEM) MIRA (Tescan), оснащенного энергодисперсионным спектрометром (ЭДС) “INCA Energy 450+ XMax 80” instrument (Oxford Instruments Ltd).

#### **Научная новизна.**

Охарактеризованы минеральные кумулятивные и интеркумуляусные ассоциации, а также рудные минералы в массиве Падос-Тундра. Установлена закономерная скрытая расслоенность, доказывающая принадлежность массива к расслоенным интрузивам. Охарактеризованы геохимические тренды и вариации составов ультрабазитовых дифференциатов и выявлена высокая магниальность исходной магмы коматиитового состава. Уточнена лополитообразная структура массива Падос-Тундра с выделением Дунитовой и Ортопироксенитовой зон. Определены тренды кристаллизации и выделены генерации Chг в сопоставлении с Chг основных расслоенных интрузий Фенноскандинавского щита. Исследованы ассоциации породообразующих минералов и закономерности их распределения, а также составы Fe-Ni(Co) сульфидов и МПП. В массиве Падос-Тундра впервые обнаружены сульфоселениды рутения, рассмотрен их генезис и рудогенетическая значимость. Выявлена необычная устойчивая ассоциация лаурита и клинохлора, и обсуждены механизмы ее формирования. Фрамбоидальные микро (нано) частицы самородного рутения, образованного по лауриду, представляет собой первую находку в Карело-Кольском регионе.

**Практическая значимость.** На основе новых данных по геологическому строению массива Падос-Тундра определено положение зоны, потенциально продуктивной на хромитовые руды. Обнаружение МПП в массиве Падос-Тундра указывают на его потенциальную платиноносность, а также других аналогичных массивов Серпентинитового пояса.

#### **Апробация результатов исследования и публикации.**

По теме диссертации опубликовано 9 печатных работ, в том числе 7 статей в рецензируемых научных журналах, включенных в перечень ВАК и индексируемых в системе Web of Science. Результаты докладывались соискателем и были опубликованы в трудах научных конференций.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из 6 глав, введения и заключения, изложена на 232 страницах, содержит 39 таблиц и 58 рисунков. Список литературы включает 230 наименований.

**Благодарности.** Диссертант выражает признательность научным руководителям работы: д.г.-м.н. А.Ю. Баркову, заведующему научной лаборатории «Промышленная и рудная минералогия» Череповецкого государственного университета (ЧГУ), г. Череповец, и д.г.-м.н. Н.Д. Толстых, в.н.с. Института геологии и минералогии имени В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск. Автор благодарен коллегам ЧГУ и Р.Ф. Мартину (университет Макгилла, г. Монреаль) за сотрудничество при реализации целей и задач диссертации, а также сотрудникам Аналитического центра многоэлементных и изотопных исследований ИГМ СО РАН - к.г.-м.н. Н.С. Карманову и к.г.-м.н. В.Н. Королёву.

Существенная поддержка выполненным исследованиям оказана Российским Фондом Фундаментальных Исследований (РФФИ) в рамках проектов «Кумулятивные, интеркумулятивные и рудные минеральные ассоциации мафит-ультрамафитов массива Падос-Тундра, Кольский пов: индикаторы потенциала и режимов рудообразования» (№ 16-05-00884) и «Минеральные ассоциации, геохимия, рудоносность и происхождение ультрамафитов Серпентинитового пояса, Кольский пов» (№ 19-05-00181).

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ И ОБОСНОВАНИЕ ЗАЩИЩАЕМЫХ ПОЛОЖЕНИЙ**

Во введении дан обзор литературы, обоснована актуальность темы и ее практическая значимость. Приведены основные цели, задачи, методы исследования и фактический материал, положенный в основу работы. Отражена научная новизна, рассмотрена апробация результатов и структура работы.

Первая глава обобщает предыдущие исследования и содержит новые данные по геологической структуре и скрытой расслоенности массива Падос-Тундра. В ней обсуждены установленные в работе высокомагнезиальные составы кумулузного ОI и Орх в сопоставлении с другими крупными интрузивами ультрабазитового состава.

Охарактеризована степень обогащения хромом породообразующих и вторичных минералов, а также описываются проявления серпентина, аномально обогащённого Cr и Al. Во второй главе обсуждаются парагенетические ассоциации и эволюционные тренды кристаллизации Chr и ассоциирующего с ним магнезиального ильменита: проводится их сопоставление с рудопоявлениями из других крупных расслоенных массивов Фенноскандинавского щита. Третья глава посвящена обсуждению минеральных ассоциаций, закономерностям локализации МПГ и вариациям составов минералов. В ней описаны лаурит-клинохлоровые микрокрастания, микро-наноразмерные фазы самородного рутения и дисульфоселениды рутения, по которым обосновывается существование новой природной серии твёрдого раствора:  $\text{RuS}_2\text{-RuSe}_2$ . На основе полученных результатов обсуждается генезис платинометалльной минерализации. Четвёртая глава рассматривает взаимосвязь петрографических особенностей пород с развитием сфероидальных форм их выветривания. Пятая глава посвящена геологическим и минералого-геохимическим особенностям ультрамафитов района горы Карека-Тундра (Серпентинитовый пояс) и их сопоставлению с эталонным массивом Падос-Тундра. В шестой главе обобщаются и обсуждаются минералого-геохимические закономерности и условия формирования Ol-Chr парагенезисов и аспекты петро- и рудогенеза зон ЭПГ-хромитовой минерализации. Проводится анализ геотектонического положения интрузива Падос-Тундра, даётся его сопоставление с ультрабазитами Фенноскандинавского щита и других регионов; обосновывается коматиитовый (Al-недеплецированный) состав исходной магмы.

**Первое защищаемое положение. Массив Падос-Тундра характеризуется скрытой расслоенностью и закономерными трендами кристаллизации Ol, Орх и Chr, на основе которых выявлено, что Дунитовый блок с зонами стратиформных и подиформных хромитов и ассоциирующими проявлениями Ru-Os-Ir минерализации формировался прежде кумулатов Ортопироксенитовой зоны и занимает нижнюю стратиграфическую позицию в геологической структуре расслоенного интрузива.**

Массив Падос-Тундра является крупным интрузивным телом дунит-гарцбургит-ортопироксенитового состава ( $\sim 6 \times 2-3$  км: рис. 1-4) палеопротерозойского возраста:  $2485 \pm 77$  млн. лет [Sm-Nd метод; Серов и др., 2018]. Он располагается в зоне контакта пояса Лапландских гранулитов с архейским Беломорским составным террейном. Три стратиформных слоя хромититов Cr<sub>2</sub>, Cr<sub>3</sub> и Cr<sub>4</sub> по [Мамонтов, Докучаева, 2006] известны в пределах Дунитового блока (рис. 1а, 4). Ортопироксениты, ОI-содержащие ортопироксениты (до 95-97 об.% Орх) и дуниты (до 90-95% ОI) преобладают среди Орх-ОI кумулатов. Гарцбургиты ( $\sim 60-70\%$  ОI и до 40% Орх) менее распространены (рис. 1а).

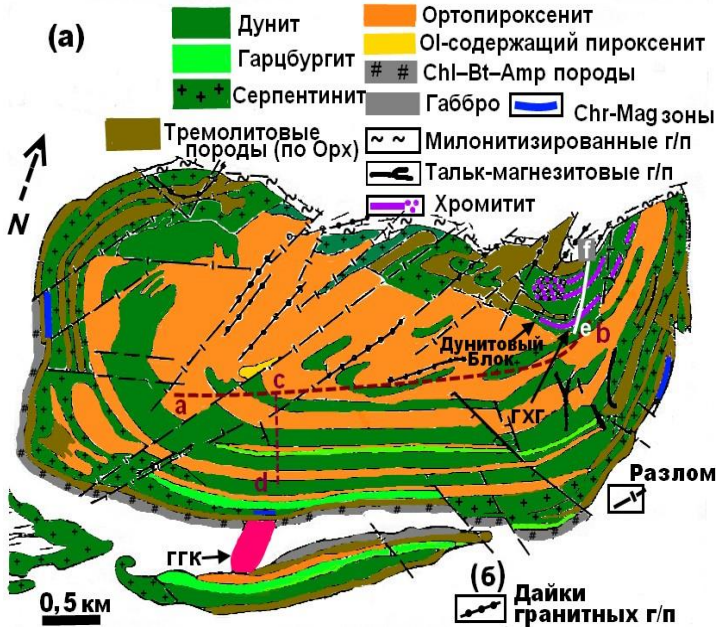


Рис. 1 (а, б). Геологическая карта массивов Падос-Тундра (а) и Малый Падос (б) [Мамонтов, Докучаева, 2006] с небольшими изменениями. Линии *a-b*, *c-d*, *e-f* показывают ориентацию профилей отбора образцов. Зоны хромититов показаны вне масштаба (фиолетовым цветом). ГХГ – Главный Хромитовый Горизонт (Cr<sub>2</sub>); ГГК – гранито-гнейсовый купол.



Рис. 1. (в, г). Расположение (на спутниковом изображении SAS.Planet) основных профилей (*a-b*, *c-d*, *e-f*) опробования при изучении интрузива Падос-Тундра. На врезке показаны типичные комбинации кумулятивных фаз вдоль профиля *a-b*. Расстояния (м) указаны от точки PDS-1 к точке PDS-93. Показано расположение дифференцированного тела у подножия г. Ханлаута (рис. 1в).

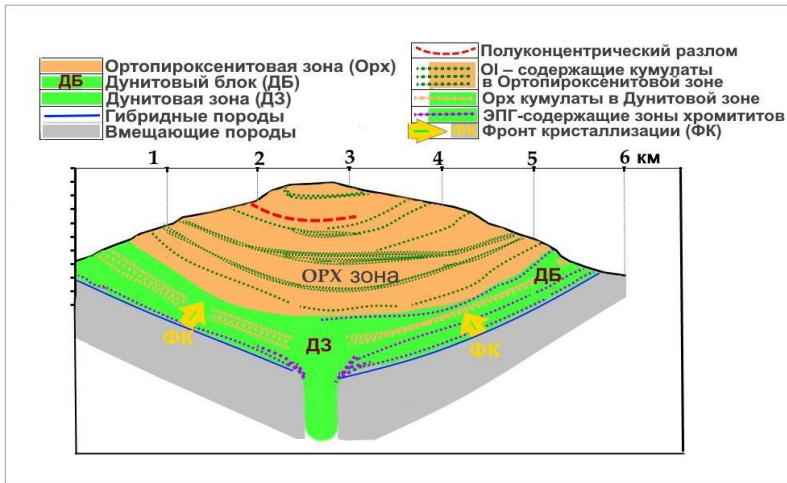


Рис. 2. Идеализированная схема предполагаемой геологической структуры интрузива Падос-Тундра.



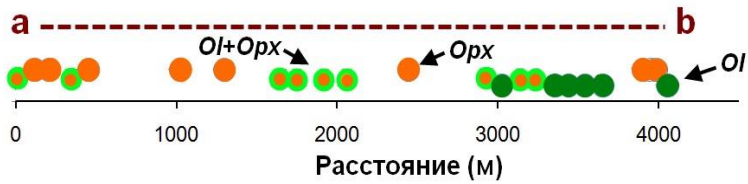


Рис. 3. Распределение парагенетических ассоциаций главных породообразующих минералов в кумулатах по профилю *a-b* Ортопироксенитовой зоны интрузива Падос-Тундра (данные автора). Положение профиля *a-b* показано на рис. 1а, в.

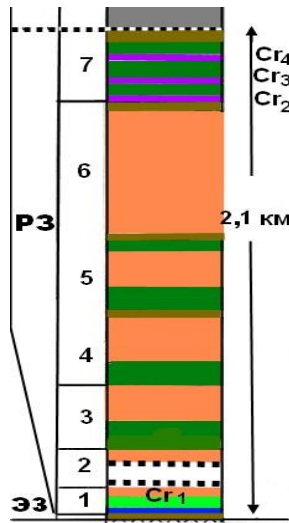


Рис. 4. Обобщённая стратиграфическая колонка по [Мамонтов, Докучаева, 2006], показывающая расслоенную зону (PЗ) и эндоконтактную зону (ЭЗ) массива Падос-Тундра в разрезе его восточной части. Цифры от 1 до 7 отражают ритмическую расслоенность. Легенда и условные обозначения те же, что на рис. 1а. Серым цветом обозначены габброидные породы, которые, по представлениям [Мамонтов, Докучаева, 2006] перекрывают кумулаты Дунитового блока. Хромититовые горизонты показаны схематически (Cr<sub>2</sub>, Cr<sub>3</sub>, Cr<sub>4</sub>).

Ультрамафитовые породы массива Падос-Тундра обладают высокой магнезиальностью. Среднее значение индекса магнезиальности  $100Mg\#$  пород, выраженного соотношениями молекулярных количеств  $100MgO/(MgO+FeO_{\text{общ}})$ , составляет 87,6, что близко средним значениям  $100Mg\#$  86,7 в дифференцированном силле Чапесвара-II [Barkov et al., 2019] и 86,1 в коматиитовом потоке массива горы Ханлаута, который тесно ассоциирует с массивом Падос-Тундра (рис. 1в). Высокомагнезиальные составы дифференциатов сопровождаются повышенными содержаниями в них Cr до 26,72 мас.%  $Cr_2O_3$  в хромитоносных зонах Дунитового блока. Высокохромистые составы значительно обогащены Al (рис. 5г) за счет широкого развития клинохлора и обогащения составов хромшпинелидов шпинелевым ( $MgAl_2O_4$ ) компонентом в хромититах и рудных сегрегациях Chr. Положительная корреляция в паре Ni–Mg (рис. 5в) является отражением преимущественного нахождения Ni в качестве примеси в оливине, обогащённом Fo (рис. 5а). Породы массива бедны Ca и Al (рис. 5б, г), что обусловлено отсутствием в них плагиоклаза и клинопироксена. В ходе кристаллизации раннемагматического парагенезиса (Ol и Орх), Ca и Al накапливались в водосодержащей среде, обуславливая широко проявленную кристаллизацию тремолита в ходе автотасоматического замещения Орх.

Редкоземельные и крупноионные литофильные элементы, являющиеся несовместимыми, характеризуются их совместным накоплением и положительно коррелируют друг с другом в разных сочетаниях, например, в парах Nb–Zr, Y–V (за исключением обогащённых Chr разновидностей, в которых V закономерно накапливается), а также Sm–Nd (рис. 6а-в). Высокомагнезиальные представители серии ультраосновных пород интрузива Падос-Тундра показывают заметно более примитивный характер, чем ультрабазиты родственных массивов Чапесвара и Ханлаута, относящиеся к единой субвулкано-плутонической ассоциации. Значения  $Mg\#_{\text{макс}}$  в породах массива Падос-Тундра несколько выше (рис. 5а), а величины индекса  $(Gd/Yb)_N$  сравнительно ниже (рис. 6г), показывая относительное деплетирование всеми несовместимыми элементами (рис. 6а-в). Спектры РЗЭ, нормированные на хондрит CI, также демонстрируют в целом несколько более примитивный характер пород интрузива Падос-Тундра. Вместе с тем, отмечается значительное подобие конфигурации спектров с другими геохимическими

характеристиками массивов Серпентинитового пояса, включая породы Верхней контактной фации силла Чапесвара (рис. 7), которые являются наиболее вероятным приближением состава исходной коматиитовой магмы Al-недеплеированного типа, из которой предположительно кристаллизовались малоглубинные интрузивы пояса [Barkov et al., 2019, 2021].

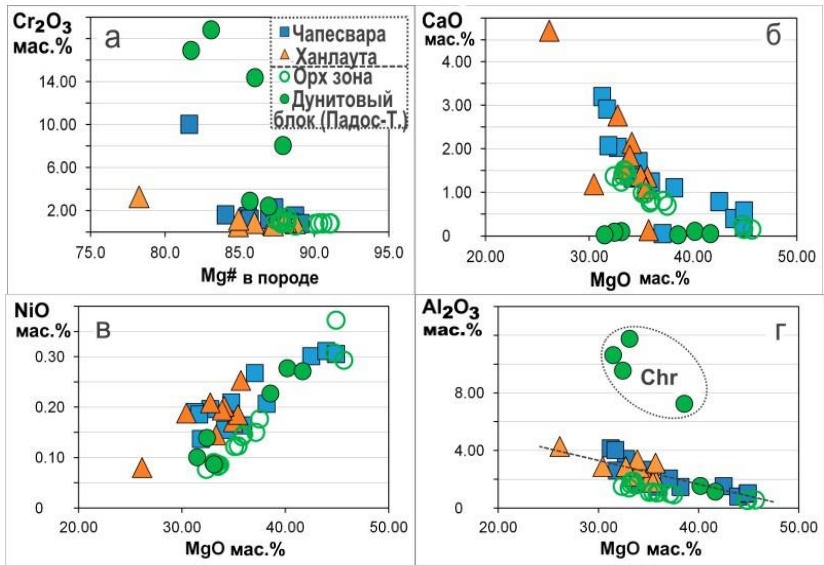


Рис. 5. (а-г). Сопоставление значений индекса  $100Mg\#$  [ $100MgO/(MgO+FeO_{общ})$ ] (мол. кол.) –  $Cr_2O_3$  в мас.% (а),  $MgO$  –  $CaO$  (б),  $NiO$  (в),  $Al_2O_3$  (г) в мас.% в составах ультрамафитовых пород массива Падос-Тундра, представленных символами зелёного цвета, в сопоставлении с составами пород силла Чапесвара [Barkov et al., 2019], отмеченных синими квадратами, и дифференцированного потока Ханлаута (оранжевые треугольники). Выделенное поле «Chr» (рис. 5г) обозначает представительные составы рудоносных хромититов Дунитового блока массива Падос-Тундра.

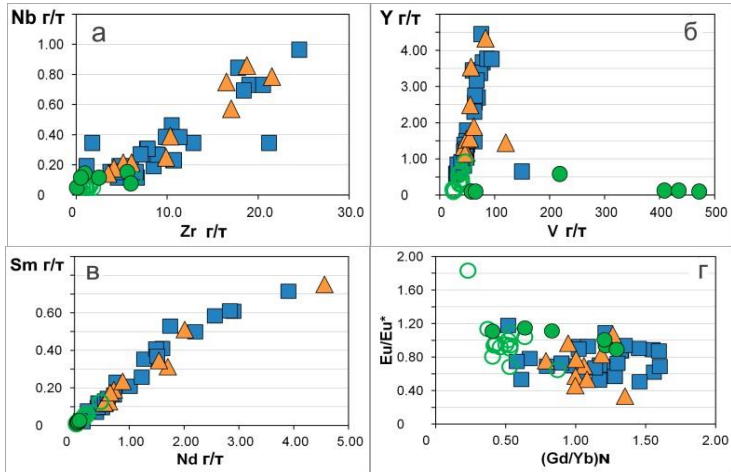


Рис. 6. (а-г). Вариационные диаграммы Zr – Nb (а), V – Y (б), Nd – Sm (в), и сопоставление значений индексов  $(Gd/Yb)_N$  –  $Eu/Eu^*$  (г) в составах пород массива Падос-Тундра с составами пород массивов Чапесвара и Ханлаута (символы и источники те же, что на рис. 5).

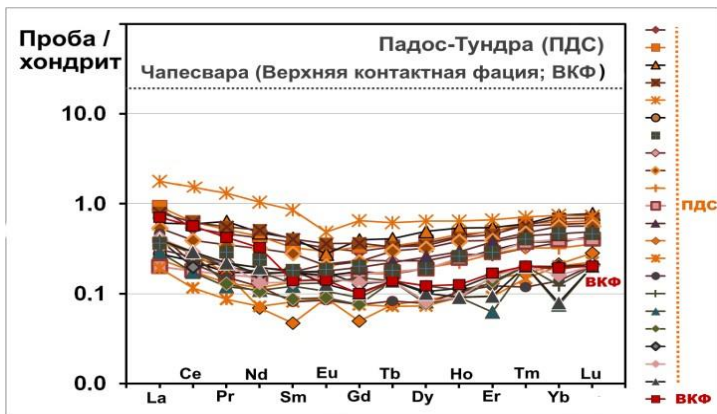


Рис. 7. Нормализованные по хондриту CI [McDonough, Sun, 1995] спектры редкоземельных элементов (метод масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой; ИСП-МС), в составах ультрамафитовых пород массива Падос-Тундра (ПДС) в сопоставлении со спектром породы Верхней контактной фации (ВКФ) силла Чапесвара-II [Barkov et al., 2019].

Ранее предполагалось [Мамонтов, Докучаева, 2006], что хромититовые горизонты залегают в пределах верхнего стратиграфического уровня расслоенной серии в прямом контакте с габброидными породами (рис. 4). Однако, такое строение маловероятно без развития промежуточных норит-габброноритовых слоёв. Результаты проведённых исследований свидетельствуют, что Дунитовый блок сложен наиболее примитивными высокомагнезиальными ассоциациями и занимает нижнюю структурную позицию, располагаясь вблизи прикраевой части комплекса в составе выделяемой Дунитовой зоны (рис. 2). Магнезиальность составов Ol-Chr парагенезиса закономерно возрастает по направлению к внешнему контакту Дунитового блока, что свидетельствует о продвижении фронта кристаллизации от контакта к центру блока.

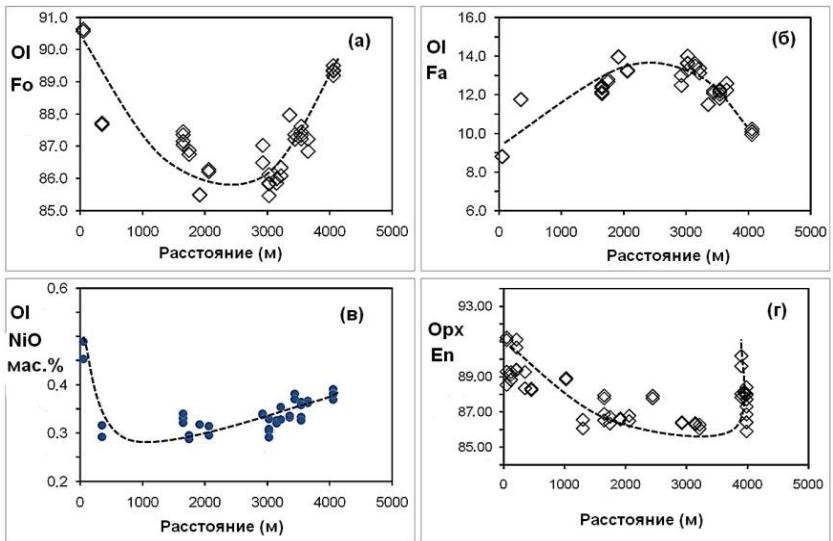


Рис. 8 (а-г). Тренды составов и скрытые вариации содержаний (мол.%) форстеритового и фаялитового компонентов, а также примеси NiO в Ol и вариации энстатитового компонента в Орх по профилю *a-b* в массиве Падос-Тундра (положение профиля показано на рис. 1а, в).

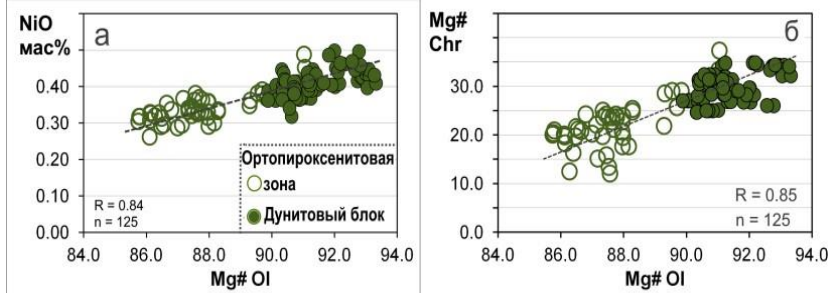


Рис. 9. Соотношения концентрации NiO (мас.%) в составах зёрен оливина со значениями индекса  $100Mg\#$  (Ol) из Ортопироксенитовой зоны и Дунитового блока интрузива Падос-Тундра. На рис. 9б демонстрируется положительная ковариация между значениями  $100Mg\#$  в сосуществующих зёрнах Ol и ядерных зонах зёрен хромшпинелидов в Ортопироксенитовой зоне и Дунитовом блоке. Значения коэффициента корреляции (R) вычислены на основе 125 микронзондовых анализов,  $n = 125$  (а) и на основе 125 составов сосуществующих зёрен Ol и Chr (б).

Новые представления подтверждаются весьма высокой и максимальной магнезиальностью Ol (до  $Fo_{93}$ ) и Chr (ряда магнезиохромит) со значениями индекса магнезиальности  $Mg\#$  до  $\sim 0,6$  [ $Mg\# = Mg / (Mg + Fe^{2+} + Mn)$ ], установленные в Дунитовом блоке. Тренды кристаллизации Ol и Орх (рис. 8а-г) показывают, что кумулятивные ультрамафиты приобретают всё более эволюционированный характер по направлению к внутренней части Ортопироксенитовой зоны интрузива Падос-Тундра. Составы парагенетических ассоциаций Ol (рис. 9а) ложатся на единый тренд, простирающийся линейно от значений максимально высокой магнезиальности, свойственной Ol из Дунитового блока, до минимальной в Ol из центральной части Ортопироксенитовой зоны. Составы сосуществующих зёрен Ol и Chr варьируют когерентно (рис. 9б), показывая систематическое понижение значений индекса магнезиальности в направлении от Дунитового блока к Ol–Орх кумулатам Ортопироксенитовой зоны. Таким образом, можно заключить, что сравнительно примитивные и ранее кристаллизовавшиеся кумулаты, представляющие собой стратиграфически нижние уровни

Дунитовой зоны, обнажаются вблизи внешней границы комплекса, тем самым согласуясь с лополитообразной формой массива (рис. 2).

**Второе защищаемое положение. Общий тренд составов от магнезиохромита к «феррихромиту» обусловлен эволюцией последовательно сменяющих друг друга парагенетических ассоциаций от стратиформного хромитового оруденения в Дунитовом блоке к хромитовым сегрегациям в нем же, и далее к аксессуарной хромитовой вкрапленности в Ортопироксенитовой зоне, что согласуется с эволюцией *Ol* и *Orx* при фракционировании исходного расплава во время формирования массива Падос-Тундра.**

В массиве Падос-Тундра установлены четыре уровня развития стратиформных хромитоносных зон [Мамонтов, Докучаева, 2006]. Зона *Cr<sub>1</sub>* располагается в эндоконтактной зоне (рис. 4). В Дунитовом блоке развиты три стратиформных слоя хромититов (*Cr<sub>2</sub>*, *Cr<sub>3</sub>* и *Cr<sub>4</sub>*), включая Главный Хромитовый Горизонт с линзовидными обособлениями Chr (рис. 1а). Исследованы все типы оруденения: 1) сегрегации и жилные обособления хромититов (до 0,5 м мощности; рис. 10-12) *in situ* по разрезам хромитоносных зон в дунитах Дунитового блока (рис. 1г); 2) образцы фрагментированных хромититов в зоне простирания ГХГ; 3) хромитоносные зоны неправильных очертаний в этом блоке (>10 об.% Chr); 4) зёрна аксессуарного хромита в Ортопироксенитовой зоне.

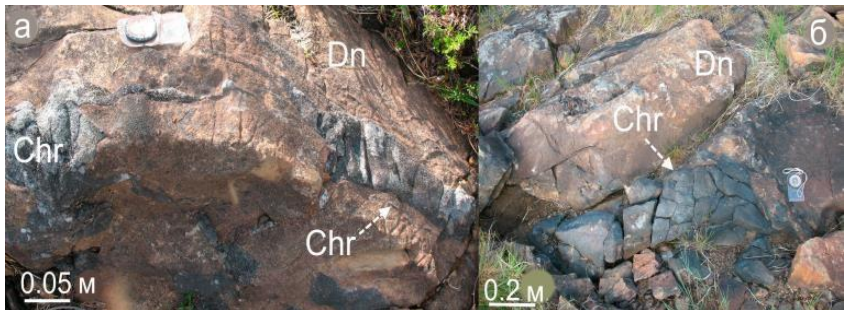


Рис. 10. Морфология сегрегаций и жил хромититов в дунитах (Dn) Дунитового блока массива Падос-Тундра.

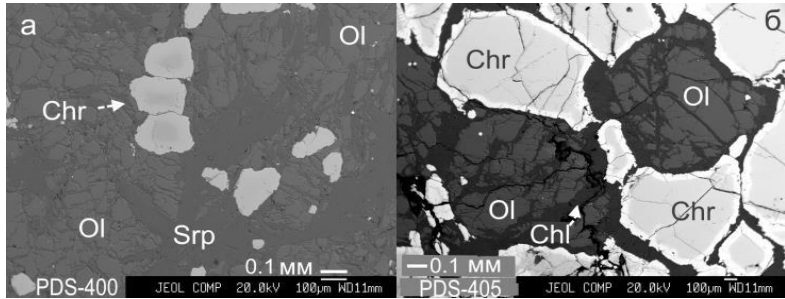


Рис. 11. Характерные текстуры и ассоциации пород и зональные зёрна Chr в Дунитовом блоке массива Падос-Тундра на изображениях в отражённых электронах. Srp: минерал группы серпентина; Chl: клинохлор (группа хлорита).

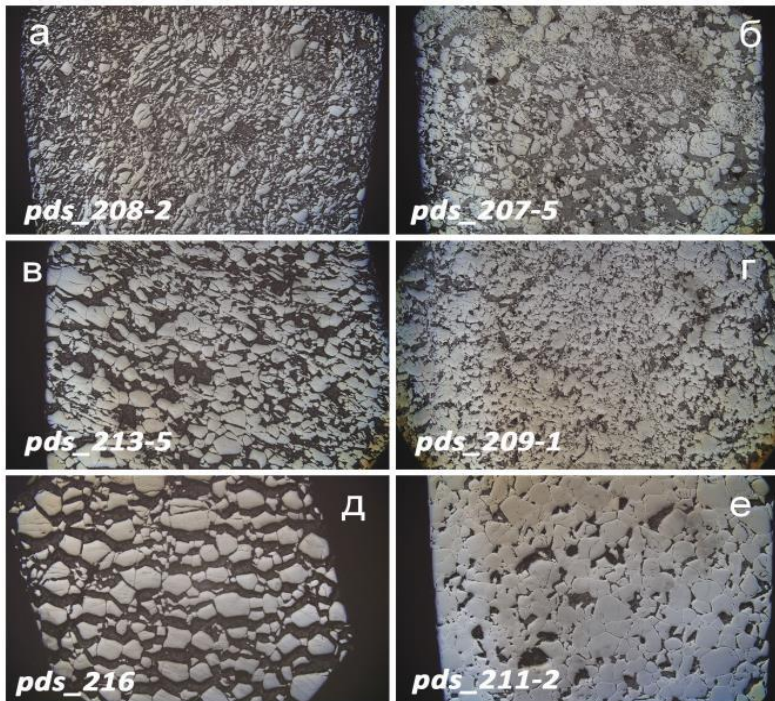


Рис. 12 (а-е). Фотографии в отражённом свете, показывающие характерные текстурные особенности хромитов в Дунитовом блоке массива Падос-Тундра.



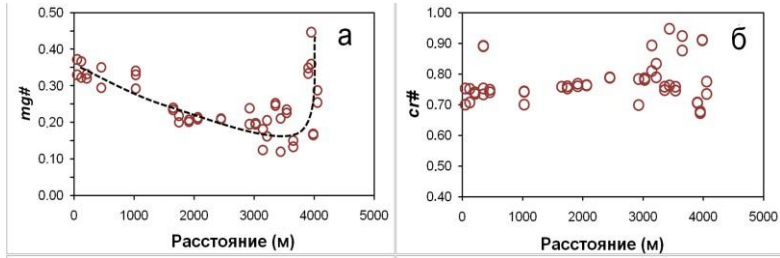
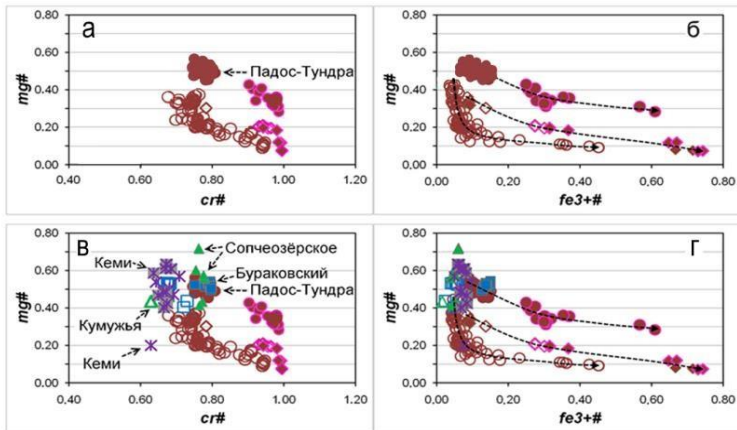


Рис. 13 (а-е). Вариации значений индексов  $Mg\#$  (а) и  $Cr\#$  (б) в составах зёрен акцессорного  $Chr$  в ультрамафитах Ортопироксенитовой зоны массива Падос-Тундра по профилю  $a-b$  (показано на рис 1а, г).



- |  |  |
|--|--|
| ○ Ассоциации акцессорного хромита в ультрамафитах Орх зоны         | ✕ Кемь, Финляндия, составы $Chr$ акцессорных зёрен                       |
| ● Составы зональных зёрен хромита из ГХГ                           | ✕ Кемь, Финляндия, составы $Chr$ стратиформных зон                       |
| ● Составы кайм зональных зёрен хромита из ГХГ                      | △ Составы хромититовой сегрегации в гарцбургите г. Кумужья, Мончеплутон  |
| ◇ Составы ядер зёрен хромита в богатой рассеянной минерализации ДБ | ▲ Мончеплутон, Кольский по-в, составы $Chr$ Сопчеозёрского месторождения |
| ◇ Составы кайм зёрен хромита в богатой рассеянной минерализации ДБ | ■ Бураковский, Карелия, составы $Chr$ стратиформных зон                  |
| ● Составы ядер зёрен хромита в хромититовых сегрегациях ДБ         | □ Бураковский, Карелия, составы $Chr$ акцессорных зёрен                  |
| ● Составы кайм зёрен хромита в хромититовых сегрегациях ДБ         |  |

Рис. 14 (а-г). Диаграммы  $Mg\# - Cr\#$  (а) и  $Mg\# - Fe3+\#$  (б), показывающие вариации составов зёрен хромита из различных ассоциаций и рудоносных зон массива Падос-Тундра.

Величина индекса  $Mg\#$  в Chr закономерно понижается по направлению к центральной части интрузива Падос-Тундра (рис. 13а) в согласии с трендами Ol и Орх (рис. 8а, г). Отмечается резкое увеличение  $Mg\#$  в зёрнах акцессорного хромита по направлению к Дунитовому блоку. Характерно систематически более высокое, по отношению к периферийным зонам (каймам), значение  $Mg\#$  в ядрах зёрен во всех типах хромитового оруденения. Максимальная степень магнезиальности ( $Mg\# \sim 0,6$ ) установлена в ядрах зональных зёрен хромита стратиформных хромититов Дунитового блока. Ядра зёрен хромита-магнезиохромита из последних существенно не отличаются от ранних фаз Chr из хромититовых месторождений и рудопроявлений расслоенных массивов (~2,5 млрд. лет): Мончеплутон (Сопчеозёрское месторождение), Кольский по-в, Бураковский массив (Карелия) и Кеми (Финляндия) (рис. 14в).

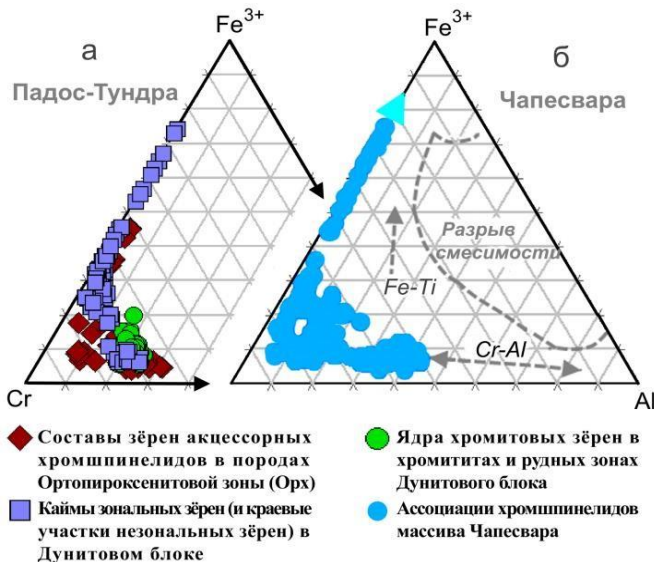


Рис. 15 (а, б). Тренды эволюции состава ассоциаций хромшпинелидов массива Падос-Тундра (а) на диаграмме Cr – Fe<sup>3+</sup> – Al в сопоставлении с вариациями в комплексе Чапесвара (б)

[Barkov et al., 2019, 2020].

Все три парагенетические ассоциации Chr в интрузиве Падос-Тундра показывают существенно сходные эволюционные тренды с последовательным возрастанием значений  $Fe^{3+\#}$  [ $Fe^{3+}/(Fe^{3+}+Cr+Al)$ ] (рис. 14б). Значения уровней фугитивности кислорода ( $fO_2$ ) в расплаве и, соответственно, содержание трёхвалентного железа в фазах Chr (рис. 14б, 15а) прогрессивно увеличиваются в ходе формирования интрузива, что наблюдается в эволюции других массивов Серпентинитового пояса [Barkov et al., 2019, 2020]. Высокие степени окисления Chr в интрузиве Падос-Тундра существенно превышают таковые значения при кристаллизации ультрабазитов других хромитоносных расслоенных интрузивов Фенноскандинавского щита: Бураковский, Мончеплутон и Кеми (Финляндия) [Лавров и др., 1987; Чашин и др., 1999; Alapieti, Huhtelin, 2005].

Значения  $Mg\#$  в каймах зональных зёрен из ГХГ Дунитового блока близки ядерным зонам хромита из сегрегаций. Во всех зональных зёрнах вариации от ядра к кайме выражены понижением  $Mg\#$ , возрастанием  $Cr\#$ , и систематическим понижением доли шпинелевого компонента. Зёрна акцессорного Chr в породах Ортопироксенитовой зоны, вероятно, кристаллизовались после ОI и почти одновременно с сосуществующими зёрнами Орх. Вариации, установленные по профилю  $a-b$  (рис. 13а), а также сопоставление составов ОI-Chr парагенезисов по данным всех исследованных профилей и точек площадного опробования (рис. 9а, б), подтверждают вывод: более примитивные кумулаты обнажаются вблизи внешнего контакта интрузивного тела, тогда как относительно эволюционированные породы серии локализуются в центральной части массива. Обнаружение самых высокомагнезиальных фаз ( $Mg\# \sim 0,6$ ) в ядерных зонах и зёрнах магнезиохромита в стратиформных хромититах у контактов Дунитового блока, которые значительно более магнезиальны чем фазы Chr всех других зон и рудопроявлений массива, убедительно подтверждает высказанные представления.

**Третье защищаемое положение.** *Платинометаллическая минерализация в хромититах Дунитового блока массива Падос-Тундра имеет Ru-Os-Ir специализацию с рядом контрастных и*

*«нетрадиционных» особенностей, включающих преобладание микрорастаний лаурита и клинохлора, развитие сульфоселенидов и фрамбоидальных нанофаз рутения. Она формировалась в изолированных микрообъёмах водосодержащего флюида мультикомпонентного состава (Si, Ru, Os, Ir, S, H<sub>2</sub>O) на поздней стадии кристаллизации рудовмещающих хромититов в условиях резкого дефицита серы при значениях  $fS_2$  ниже буфера Os–OsS<sub>2</sub>.*

В составе рудной минерализации хромититов Дунитового блока обнаружены уникальные формы и фазы МПГ, включая фрамбоидальные текстуры самородного рутения, неназванные фазы Ru(Se,S)<sub>2</sub> и RhTe, ранее не известные в природе. Фаза Ru<sup>2+</sup>(Se<sub>2</sub>)<sup>2-</sup> предполагает присутствие дианиона (диселенида) в кристаллической структуре. Широко развитые сростания лаурита (в центре) с микрокристаллами клинохлора, имеющими хорошо развитые кристаллические формы (рис. 16а-е), являются важной и необычной характеристикой. 21 зерно из 25 проанализированных зёрен лаурита формируют двухфазные сростания с кристаллами первичного клинохлора, который содержит до 4 мас.% Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Сульфиды Cu-Ni в этом парагенезисе не обнаружены, хотя пентландит и миллерит спорадически отмечались в Chr сегрегациях Дунитового блока. Термальная стабильность клинохлора не превышает 880°C [Chernosky, 1974]. Лаурит, как правило, рассматривается в качестве раннемагматической высокотемпературной фазы [Brenan, Andrews, 2001], однако не исключается его низкотемпературное формирование в гидротермальных системах, богатых летучими компонентами, как, например, в стратиформных хромититах Имандровского расслоенного массива на Кольском п-ове [Barkov, Fleet, 2004]. Сфероидальные нанофазы самородного рутения, локализованные в зерне магнезиального Chr, заполняют полость, имеющую морфологию скелетного кристалла клинохлора.

Фрамбоидальные текстуры, вполне обычные для пирита и оксидов железа, являются редкими для МПГ. В этой парагенетической ассоциации присутствует фаза лаурита (рис. 17). Наносферулы рутения, вероятно, осаждались из восстановленного флюида, в котором лаурит реагировал с

водородом, выделившимся в процессе серпентинизации ОI (или диссоциации  $\text{H}_2\text{O}$  в ходе везикуляции исходной магмы), в соответствии с предполагаемой реакцией:  $\text{RuS}_2 + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{Ru} + 2\text{H}_2\text{S}$ .

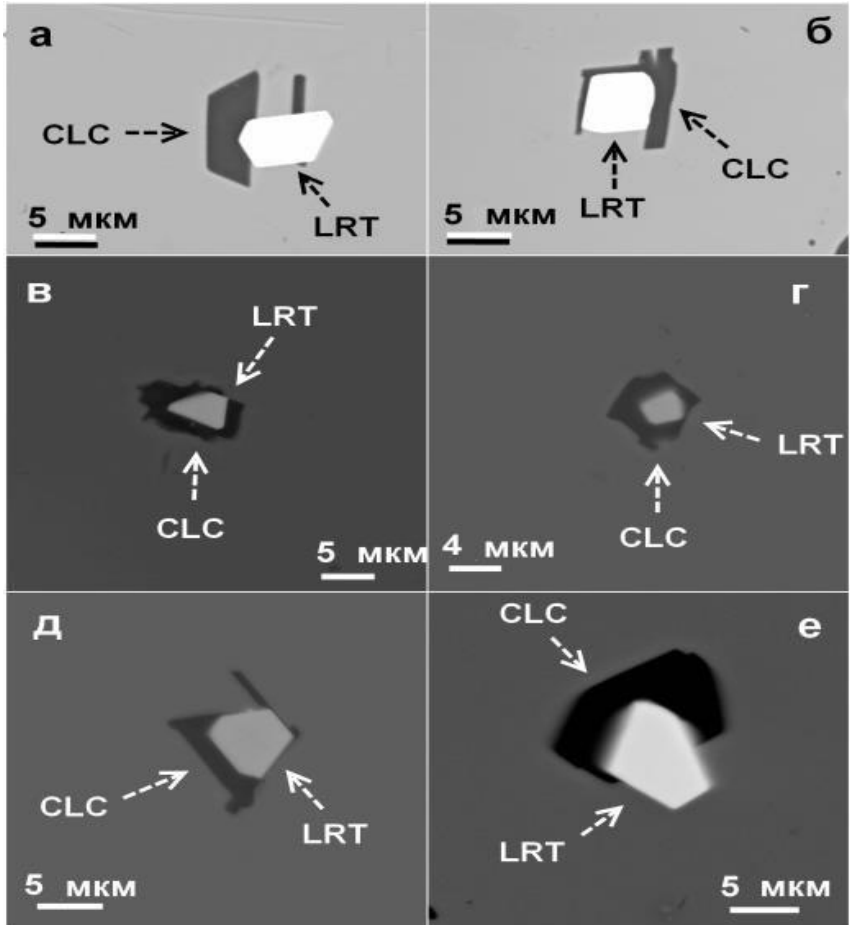


Рис. 16 (а-е). Микрорастания лаурита (Lrt) с клинохлором (Clc), включенные в зерна хромита-магнезиохромита. Изображения BSE.

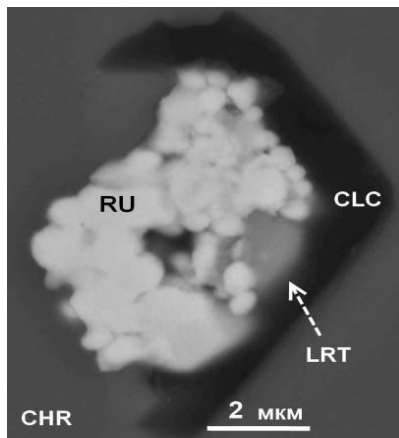


Рис. 17. Изображение BSE, показывающее развитие фрамбоидальных сферул самородного рутения (Ru), ассоциирующих с реликтами лаурита (Lrt). Clc: клинохлор, Chr: вмещающее зерно магнезиохромита (CHR).

Таким образом, лаурит-клинохлоровые микрокрастания вероятно кристаллизовались из микропорций  $\text{H}_2\text{O}$ -содержащего флюида на поздней стадии минералообразования вследствие локального накопления уровней несовместимых элементов: Si, Ru и других ЭПГ, S и  $\text{H}_2\text{O}$ , остающихся в процессе кристаллизации вмещающего Chr. Эти столь контрастные компоненты совместно аккумулировались в микрообъемах водосодержащего флюида. Рутений и другие тугоплавкие ЭПГ, совместно с S, избирательно распределялись во флюидную фазу. Присутствие  $\text{H}_2\text{O}$  в системе могло обусловить задержку в кристаллизации наблюдаемой двухфазной ассоциации, лаурит + клинохлор, которые формировались на поздних стадиях рудогенеза после вмещающего Chr. В хромититах Дунитового блока сложилась весьма дефицитная в отношении серы среда рудообразования, унаследованная от общего деплетирования серой материнского коматиитового расплава. Значения  $f\text{S}_2$  в системе были, по всей вероятности, ниже буфера Os–OsS<sub>2</sub> [Stockman, Hlava, 1984], чем обусловлено сосуществование низкоосмиевой разновидности лаурита с кристаллитами клинохлора. Обнаруженные соединения сульфоселенидных и селенидных фаз рутения ( $\text{S}/\text{Se} \leq 6$ ) предполагают аномальные, чрезвычайно низкие значения S/Se в среде минералообразования, что не реализуется в других массивах. Значения S/Se в мантии оцениваются в 2850-4350 со средним значением ~3250, которое сопоставимо с хондритовым:  $2500 \pm 270$ . Наиболее низкие уровни

S/Se (190–700), установлены в каплевидных сульфидных включениях в зоне Платрифа в Скергаардском расслоенном интрузиве (Гренландия) [Lorand et al., 2003; Holwell et al., 2015; Smith et al., 2016]. Эти данные показывают, что сульфоселениды Ru вряд ли могли формироваться в качестве первично магматических фаз, кристаллизующихся из расплава. Эти фазы не могли быть сформированы и в результате магматической контаминации, поскольку коровые породы обладают ещё более высокими значениями S/Se (от 3500 до 100 000). Таким образом, формирование фаз диселенид-дисульфоселенидных составов, по всей вероятности, обусловлено процессом масштабного удаления серы из системы на постмагматической стадии, что привело к критическому понижению отношения S/Se в позднем H<sub>2</sub>O-содержащем флюиде. Следует предполагать довольно окислительный характер этого флюида (близкий к значению англезит-галенитового буфера), что является важным фактором при формировании селенидных минералов [Simon et al., 1997]. Сера более мобильна, чем Se в гидротермальных флюидах и предпочтительно распределяется в водосодержащую флюидную фазу [Ewers, 1977; Howard, 1977]. Эти результаты и наблюдения подтверждают третье защищаемое положение.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Массив Падос-Тундра имеет лополитообразную форму, обладает скрытой и модальной расслоенностью, и располагается у контакта двух мегаструктурных элементов Фенноскандинавского щита: Лапландского гранулитового террейна (пояса) палеопротерозойского возраста и Беломорского составного террейна архейского возраста. Он относится к трансрегиональной мегаструктуре коматиитового магматизма Серпентинитового пояса, сформированного плюмом Al-недеплезированной коматиитовой магмы, которая сопоставима с наиболее высоко-Mg расплавами коматиитов Барбертонского пояса. Максимальные значения Mg# в зёрнах Ol и Chr понижаются от значений 93,3 и 57,0 в Дунитовом блоке массива Падос-Тундра к значениям Mg#<sub>макс.</sub> 91,7 и 42,5 в силлах Чапесвара, и 87,9, 31,9, соответственно, в дифференцированном потоке массива Ханлаута.

Дифференциаты интрузива Падос-Тундра бедны Са и Al, и обладают высокой магнезиальностью. Среднее значение  $100Mg\#$  пород, 87,6, сопоставимо со средним значением 86,7 в дифференцированном силле Чапесвара-II и 86,1 в коматиитовом потоке г. Ханлаута, которые ассоциируют с массивом ПадосТундра. Высокохромистые составы (до 26,72 мас.%  $Cr_2O_3$  в стратиформных хромитоносных зонах Дунитового блока) значительно обогащены Al вследствие развития клинохлора и обогащения Chr шпинелевым компонентом. Положительная корреляция Ni–Mg отражает повышение примесей Ni в составах Ol, обогащённых Fo компонентом. Интрузив Падос-Тундра в целом имеет несколько более примитивный характер, чем массивы Чапесвара и Ханлаута, относящиеся к единой субвулканоплутонической ассоциации. В составах пород массива Падос-Тундра значения  $Mg\#_{\text{макс.}}$  несколько выше, а величины  $(Gd/Yb)_N$  ниже по сравнению с этими массивами. Им характерно деплетирование всеми несовместимыми элементами и примитивный характер спектров РЗЭ, нормализованных по хондриту (CI).

Ковариации  $Mg\# - Ni$  в составах Ol и когерентный характер вариаций  $Mg\#$  в сосуществующих зёрнах Ol и Chr указывают на кристаллизацию интрузива Падос-Тундра из единой порции коматиитовой магмы в направлении от ранних кумулатов Ol + Chr в стратиформных хромититовых зонах Дунитового блока по направлению к поздним Ol–Орх и Орх кумулатам центральной части Ортопироксенитовой зоны. Таким образом, хромитоносный Дунитовый блок (в составе Дунитовой зоны) формировался ранее кумулатов Ортопироксенитовой зоны. Кристаллизация лополита в целом шла по направлению к центральной части интрузива, что выявляется по скрытой расслоенности и трендам составов Ol, Орх и Chr.

Основное хромитовое оруденение Дунитового блока имеет стратиформный характер, однако рудные слои не являются сплошными, представляя собой зоны, слагаемые линзами, жилами и сегрегациями хромититов. Гипотетический фронт кристаллизации двигался вдоль криволинейной линии субпараллельно внешней границе Дунитового блока. Текстурные особенности указывают, что зёрна Chr и их агрегаты отлагались после кристаллизации крупных объёмов зёрен вмещающего



оливина. Несмотря на совместимое поведение Cr в ходе кристаллизации коматитовых расплавов, хром вместе с другими компонентами (Al, Zn, ЭПГ, S, H<sub>2</sub>O, и др.) был несовместим по отношению к кристаллизующимся массам оливиновых зёрен Дунитового блока. Несколько циклов отложения стратиформных зон Chr связаны с эпизодическим накоплением хрома на фронте кристаллизации расплава при его продвижении от эндоконтакта к центру Дунитового блока.

Выявлены три парагенетические ассоциации Chr в массиве Падос-Гундра. Первая представлена Chr в стратиформных хромититах в Дунитовом блоке. Ядерные зоны этой генерации характеризуются весьма высокими и максимальными значениями  $Mg\#$ : ~0.5-0.6 (магнезиохромит). Вторая ассоциация проявляется в рудных обособлениях и сегрегациях хромититов Дунитового блока. Третья представлена зёрнами Chr в переслаивающихся кумулатах (Орх, Орх+Ol) Ортопироксенитовой зоны. Все три ассоциации следуют своим собственным (индивидуальным) эволюционным трендам кристаллизации в рамках диаграммы  $Mg\#-Fe^{3+\#}$ . Эти тренды взаимно субпараллельны, согласуются друг с другом и выказывают единый характер эволюционных изменений в системе. Каймы зональных зёрен Chr в хромититах обладают относительно повышенными содержаниями примесей Ni и Mn, тогда как Zn избирательно распределяется в область ядер. Подобная дифференциация Zn от Mn наблюдается в массиве Чапесвара. Предполагается накопление Zn в изолированных порциях H<sub>2</sub>O-содержащего расплава, обогащённого Cr и Al, из которого формировались сегрегации хромититов. Значения уровней  $fO_2$  в расплаве и, соответственно, содержание Fe<sup>3+</sup> в фазах Chr прогрессивно увеличивались в ходе формирования интрузива Падос-Гундра, что наблюдалось в эволюции других массивов Серпентинитового пояса: Чапесвара, Ляварака и Ханлаута. Повышенные уровни  $fO_2$  и относительный дефицит Fe<sup>2+</sup> в системе, вероятно, обусловили аномально высокую степень магнезиальности парагенезиса Fo<sub>96</sub> + авгит (Mg# 94) + магнезиохромит в Сопчеозёрском месторождении массива Мончеплутон. Установленная фаза Fo<sub>96</sub> является самой высокомагнезиальной в расслоенных интрузивах мира.

Условия значительного окисления, приводящего к дефициту  $\text{Fe}^{2+}$  в рудно-магматической системе, могли обусловить резкое обогащение Ni–(Co) составов сульфидных минералов, представленных Со-содержащим пентландитом с высоким Ni/Fe отношением, миллеритом и хизлевудитом (в массиве Ханлаута). Сульфидные сростания в теле ультрабазитовых субвулканитов массива Ханлаута часто включают фазы гематита, что свидетельствует о значениях  $f\text{O}_2$  выше М–Н (магнетит-гематитового) буфера. Данные сульфидные ассоциации формировались при субсолидусных температурах  $<650^\circ\text{C}$ , что согласуется с экспериментальными данными.

Минерализация ЭПГ в хромититах Дунитового блока обнаруживает ряд нетрадиционных характеристик с развитием сульфоселенид-селенидных фаз и фрамбоидальных наносферул рутения. Лаурит-клинохлоровые микросрастания кристаллизовались из микропорций  $\text{H}_2\text{O}$ -содержащего флюида мультикомпонентного состава на поздней стадии минералообразования вследствие локального накопления уровней избыточных и несовместимых элементов: Si, Ru и других ЭПГ, S,  $\text{H}_2\text{O}$  в процессе кристаллизации вмещающего хромита. Эти столь контрастные компоненты совместно аккумулировались в микрообъемах водосодержащего флюида. Рутений и другие ЭПГ, совместно с S, избирательно распределялись во флюидную фазу. Присутствие  $\text{H}_2\text{O}$  в системе могло обусловить задержку в кристаллизации наблюдаемой двухфазной ассоциации лаурит + клинохлор, которые формировались на поздних стадиях рудогенеза после вмещающего хромита.

Сфероидальная форма выделений ортопироксена в интрузиве Падос-Тундра могла закономерно способствовать уменьшению степени потери тепла в условиях предполагаемого переохлаждения расплава в малоглубинных условиях кристаллизации. В Дунитовом блоке массива установлены проявления Cr–Al-содержащего серпентина с аномально высокими содержаниями  $\text{Cr}^{3+}$  и  $\text{Al}^{3+}$ . Температура кристаллизации этой фазы, отнесенной к антигориту, могла достигать  $650^\circ\text{C}$ , превышая верхний предел ( $\sim 600^\circ\text{C}$ ), установленный для «нормального» серпентина. Предлагается следующая схема изоморфного замещения:  $[2 (\text{}^{6}\text{Al} + \text{Cr})^{3+}$

+ □ ↔ 3 Mg(Fe<sup>2+</sup>)], которая комбинируется с незначительным обменом в тетраэдрических позициях [<sup>4</sup>Al ↔ Si].

Выявлен и обоснован новый механизм формирования сфероидально выветрелых поверхностей в ультрамафитах на примере массивов Падос-Тундра и Мончеплутон. Ключевую роль здесь играют присутствие крупных ойкокрсталлов ортопироксена (элементов магматической структуры), а также различие в степени устойчивости к химическому выветриванию оливина и ортопироксена (с его псевдоморфным замещением тальком и тремолитом).

Ультрамафиты г. Карека-Тундра представляют собой тектонически дезинтегрированные и перемещённые блоки и фрагменты ранее существовавших интрузивных тел. Несмотря на интенсивно проявленные процессы деформации, реликты первичных магматических фаз (оливин, хромит, магнезиальный ильменит и сульфиды) сохраняются в этих породах, соответствующих по химическому составу гарцбургиту и оливиновому ортопироксениту. Ультраосновные дифференциаты г. Карека-Тундра менее магнезиальны, чем кумулаты массива Падос-Тундра и формировались из порций более фракционированного расплава на периферии от предполагаемого центра крупномасштабного коматитового плюма Серпентинитового пояса.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *Статьи в рецензируемых журналах:*

1) Барков А.Ю., Мартин Р.Ф., Изох А.Э., Никифоров А.А., Королюк В.Н. Гипермагнезиальный оливин в расслоенных массивах Мончеплутон (Fo<sub>96</sub>) и Падос-Тундра (Fo<sub>93</sub>), Кольский полуостров // Геология и геофизика, 2021, т.62, № 3, с. 403-421.

2) Barkov A.Y., Nikiforov A.A., Barkova L.P., Korolyuk V.N., Martin R.F. Zones of PGE–chromite mineralization in relation to crystallization of the Pados-Tundra ultramafic complex, Serpentinite Belt, Kola Peninsula, Russia // Minerals, 2021, Vol. 11(1). 68 (32 pp.).

- 3) Barkov A.Y., **Nikiforov A.A.**, Martin R.F. The structure and cryptic layering of the Pados-Tundra ultramafic complex, Serpentinite belt, Kola Peninsula, Russia // Bull. Geol. Soc. Fin., 2017, Vol. 89. P. 35-56.
- 4) Barkov A.Y., **Nikiforov A.A.**, Tolstykh N.D., Shvedov G.I., Korolyuk V.N. Compounds of Ru-Se-S, alloys of Os-Ir, framboidal Ru nanophases and laurite-clinocllore intergrowths in the Pados-Tundra complex, Kola Peninsula, Russia // Eur. J. Mineral, 2017. Vol. 29(4). P. 613-622.
- 5) Barkov A.Y., **Nikiforov A.A.**, Korolyuk V.N., Barkova L.P., Martin R.F. Anomalous chromite-ilmenite parageneses in the Chapesvara and Lyavaraka ultramafic complexes, Kola Peninsula, Russia // Period. di Mineral., 2020. Vol. 89. P. 299317.
- 6) Barkov A.Y., **Nikiforov A.A.**, Halkoaho, T.A.A., Konnunaho J.P. The origin of spheroidal patterns of weathering in the Pados-Tundra mafic-ultramafic complex, Kola Peninsula, Russia // Bull. Geol. Soc. Fin., 2016. Vol. 88. P. 105-113.
- 7) Barkov A.Y., **Nikiforov A.A.**, Martin R.F. A novel mechanism of spheroidal weathering: a case study from the Monchepluton layered complex, Kola Peninsula, Russia // Bull. Geol. Soc. Fin., 2015. Vol. 87. P. 79-85.

*Тезисы совещаний:*

- 8) **Никифоров А.А.** Ассоциации и тренды кристаллизации хромшпинелидов в комплексе Падос-Тундра, Кольский пов // Актуальные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии. Материалы XXIX молодежной научной школы-конференции памяти чл.-корр. АН СССР К.О. Кратца и ак. РАН Ф.П. Митрофанова, Петрозаводск, изд-во Карельского НЦ РАН, 2018. С. 76-79.
- 9) **Никифоров А.А.** Нетрадиционная ассоциация минералов ЭПГ в массиве Падос-Тундра, Кольский по-в // «Новое в познании процессов рудообразования». Сборник материалов Седьмой Российской молодёжной научно-практической школы, Москва, 2017. С. 230.