

На правах рукописи

СТЕПАНОВ Сергей Юрьевич



**СТРУКТУРНО-ВЕЩЕСТВЕННЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ
ПРОЯВЛЕНИЯ ХРОМИТ-ПЛАТИНОВОГО ОРУДЕНЕНИЯ В
КЛИНОПИРОКСЕНИТ-ДУНИТОВЫХ МАССИВАХ СРЕДНЕГО
УРАЛА**

*Специальность 25.00.11 – Геология, поиски и разведка твердых по-
лезных ископаемых, минерагения*

**Автореферат
на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических
наук**

Санкт-Петербург – 2018

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский горный университет»

Научный руководитель:

доктор геолого-минералогических наук, доцент

Козлов Александр Владимирович

Официальные оппоненты:

Толстых Надежда Дмитриевна, доктор геолого-минералогических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт геологии и минералогии им В.С. Соболева» СО РАН, лаборатория петрологии и рудоносности магматических формаций, ведущий научный сотрудник

Петров Сергей Викторович, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», кафедра геологии месторождений полезных ископаемых, доцент

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии» РАН.

Защита диссертации состоится 26 сентября 2018 года в 18 часов на заседании диссертационного совета Д 212.224.01 при Санкт-Петербургском горном университете по адресу: 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, д. 2, ауд. 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета и на сайте www.spmi.ru

Автореферат разослан 17 июля 2018 г.

УЧЁНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета

КИРЬЯКОВА
Ирина Геннадьевна

Общая характеристика работы

Актуальность темы.

Актуальность исследований, направленных на создание методических основ поисковых и разведочных работ на рудную платину, подтверждается высоким россыпеобразующим потенциалом клинопироксенит-дунитовых массивов и открытием промышленно значимых рудных зон в дунитах Гальмознанского (Корякия) и Светлоборского (Средний Урал) массивов (Козлов и др., 2011). Важно отметить, что на сегодняшний день большинство россыпных месторождений платины на Урале отработано, а коренные рудные объекты изучены не в полной мере. Решение проблем, возникающих при проведении геологоразведочных работ, спектр которых обозначился ещё на ранних этапах изучения коренной платиноносности дунитовых тел (Высоцкий, 1913; Заварицкий, 1928), позволит в существенной мере расширить сырьевую базу по металлам платиновой группы в пределах Уральского региона. Учитывая широкое распространение зональных клинопироксенит-дунитовых массивов, выявленные структурно-вещественные закономерности проявления хромит-платинового оруденения могут быть использованы при прогнозировании россыпных месторождений и коренной минерализации и в менее изученных по сравнению с Уралом областях.

Состояние изученности проявлений хромит-платиновой минерализации в зональных клинопироксенит-дунитовых массивах. Проблема генезиса платиновой минерализации обозначилась уже на первых этапах изучения клинопироксенит-дунитовых массивов Урала. Ранние исследования (Высоцкий, 1913; Duparc, Tikhonowitch, 1920; Карпинский, 1926; Заварицкий, 1928; и др.), проводившиеся параллельно с разработкой коренных месторождений, базировались на представительном каменном материале, но не позволили прийти к единому мнению по рассматриваемой проблеме. Более поздние исследования (Малахов, Малахова, 1970; Лазаренков и др., 1992; Иванов, 1997; Пушкарев и др., 2007; Anikina et al., 2014; Tesalina et al., 2016; и др.), проводимые после завершения разработки месторождений, были в меньшей степени обеспечены представительными образцами платиноносных пород, но сформировали обширную аналитическую базу, что, однако, не привело к созданию обоснованной генетической концепции, признаваемой большинством исследователей. В течение последних 5 лет начался новый интенсивный виток исследования платиновых объектов, связанных с клинопироксенит-дунитовыми массивами на Урале.

Одним из нерешённых вопросов в отношении зональных массивов Урало-Аляскинского типа является генезис высокомагнезиального дунитового «ядра». О.К. Иванов (1997) предложил кристаллизацию дунитов из ультраосновной магмы, сформированной вследствие докристаллизационной дифференциации толеитовой магмы. Анализ результатов изотопного датирования, геохимических и петрохимических признаков пород (Ферштатер и др., 1999; Ферштатер, 2013) и структурное картирование дунитового тела Нижнетагильского массива (Шмелёв, Филипова 2010) позволили предположить кумулятивную природу дунитов с фракционированием оливина из верлитового расплава. Существует также представление о дунитах как о мантийном субстрате, тектонически вовлечённом в структуру Платиноносного пояса Урала (Ефимов, 2010).

Существование разных подходов к объяснению возникновения клинопироксенит-дунитовых массивов обуславливает дискуссионность генезиса платиноносных хромититов. В числе первых была обоснована позднемагматическая модель, в которой рудообразование по представлениям А.Н. Заварицкого (1928) и А.Г. Бетехтина (1935) не выходит за рамки магматического процесса. Затем была предложена постмагматическая модель формирования хромит-платинового оруденения с преобладающим вкладом в рудогенез процессов перекристаллизации дунитов (Иванов, 1997). Позже сформулирована гипотеза взаимосвязи платинового оруденения в хромититах с процессами гидротермальной переработки дунитов, вызвавших мощную серпентинизацию в раннепалеозойское время в условиях тектонического вовлечения дунитового «ядра» в зону субдукции (Иванов, 2011). Ряд исследователей (Johan 2002; Округин, 2004; Толстых и др., 2011; Tolstykh *et al.* 2015; Симонов и др., 2017) считают, что образование дунитов происходило в ходе дифференциации пикритовых расплавов с ликвационным отделением оксидно-рудной жидкости преимущественно хромитового состава.

Из анализа ранее полученных результатов становится ясным, что существуют достаточно убедительные свидетельства проявления минералообразующих процессов с участием металлов платиновой группы, начиная от магматического этапа формирования клинопироксенит-дунитовых массивов до завершения наложенных флюидных процессов. Важно понять, на каком этапе этого длительного пути развития минерагенеза произошло концентрирование металлов платиновой группы, определяющее промышленную ценность данных образований.

Цель работы. Выявление закономерностей формирования и размещения платиновой минерализации и обоснование геолого-генетической модели концентрирования платиноидов в хромит-платиновых рудных системах по результатам изучения клинопироксенит-дунитовых массивов (Нижнетагильский, Светлоборский, Вересовоборский, Каменушенский) качканарского комплекса на Среднем Урале.

Задачи исследований.

1. Выявление позиции хромит-платиновых рудных зон в структуре дунитовых «ядер» с применением методов геологического картирования.
2. Разносторонняя вещественная характеристика хромит-платиновых рудных зон и вмещающих их дунитов с применением методов минералогических, петрографических и геохимических исследований.
3. Выявление стадийности минералообразования в хромит-платиновых рудных системах на основе онтогенетических методов исследования индивидов и агрегатов минералов платиновой группы.
4. Оценка характера распределения платины в хромититах и дунитах и обоснование на основе предложенной геолого-генетической модели методических аспектов геологоразведочных работ, направленных на корректный подсчёт запасов платиноидов в контурах хромит-платиновых рудных тел.

Личный вклад, фактический материал и методы исследования.

Основой для проведения исследований послужили материалы, собранные в ходе полевых работ 2012–2017 гг. Дуниты, вмещающие рудные зоны, были опробованы по сети 10×5 м с изготовлением петрографических шлифов. Для Светлоборского и Вересовоборского массивов компания «Урал-МПГ» передала соискателю коллекцию образцов керна, не использованных при подсчёте запасов (глубина бурения до 200 метров). В целом общее число обработанных шлифов – 875, аншлифов – 1020, искусственных аншлифов из рудных концентратов – 69. Из массивных жильных и прожилково-вкрапленных хромититов всех исследуемых объектов было отобрано 27 крупнообъёмных проб весом 50–70 кг с последующим дроблением, гравитационным обогащением и извлечением минералов платиновой группы методом «отдувки». Таким образом, был получен фактический материал, охватывающий все ранее известные и вновь выявленные хромит-платиновые рудные зоны в пределах клинопироксенит-дунитовых массивов Среднего Урала.

Значительное место в диссертационной работе занимают геохимические исследования. Для каждого типа пород и руд были определены содержания петрогенных и примесных элементов. С этой целью использованы рентгеноспектральный флуоресцентный анализ (петрогенные элементы), масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой (элементы-примеси), масс-спектрометрия с ИСП с предварительной пробирной плавкой (для благородных металлов). Анализы проводились в Центральной аналитической лаборатории, ВСЕГЕИ; РАЦ МИА «Механобр-аналит», химической лаборатории института «Гипроникель». Полученные результаты с содержаниями благородных металлов в рудах и породах были сопоставлены с результатами гравитационного обогащения этих пород, направленного на выделение минералов платиновой группы.

Научная новизна.

1. Впервые выявлены и всесторонне охарактеризованы хромит-платиновые рудные зоны в дунитах Светлоборского и Вересовоборского массивов.

2. Охарактеризованы закономерности распределения элементов-примесей в хромититах и дунитах большинства зональных клинопироксенит-дунитовых массивов качканарского комплекса на Среднем Урале.

3. Установлена зависимость между структурными разновидностями дунитов и содержанием в них металлов платиновой группы.

4. Впервые в образцах хромититов, отобранных на основных клинопироксенит-дунитовых массивах качканарского комплекса, с использованием онтогенических методов детально охарактеризованы минералы платиновой группы (МПГ).

Защищаемые положения.

1. Хромит-платиновые минерализованные зоны в пределах Светлоборского и Вересовоборского клинопироксенит-дунитовых массивов приурочены к границам текстурно-структурных разновидностей дунитов. Преобладающий объём платиноносных хромититов сконцентрирован в порфировидных дунитах, расположенных в зоне фациальных переходов между полями дунитов, отличающихся по зернистости.

2. Геологическая специфика строения рудных зон, характер распределения петрогенных и примесных компонентов в дунитах и хромититах

предопределяют ведущую роль магматических процессов в концентрировании металлов платиновой группы.

3. Платиновая минерализация в хромититах клинопироксенит-дунитовых массивов сформировалась в два этапа. В первый этап – совместно с хромшпинелидом кристаллизовались Pt-Fe твёрдые растворы, по составу отвечающие изоферроплатине Pt_3Fe и железистой платине Pt_2Fe . Второй этап подразделён на две стадии. В первой стадии первичные Pt-Fe твёрдые растворы были замещены минералами группы тетраферроплатины. Во второй стадии минералы группы тетраферроплатины были частично замещены сульфидами, сульфоарсенидами, плюмбидами и меркуридами элементов платиновой группы.

Практическая значимость. Решение поставленных в рамках исследования задач будет способствовать повышению эффективности геологоразведочных работ, направленных на выявление коренных месторождений платины в дунитах дунит-клинопироксенит-габбровых комплексов, принимающих участие в строении большинства складчатых областей. Результаты анализа материалов о геологическом строении хромит-платиновых рудных зон, минеральных формах проявления платиноидов, характере их распределения и концентрации в пределах этих зон, морфологических и анатомических особенностях индивидов и агрегатов минералов платиновой группы платиноносных массивов Среднего Урала позволили выявить геолого-генетические закономерности их формирования. Выявленные закономерности формирования и размещения платиновой минерализации могут стать основой проектирования геологоразведочных работ на рудную платину и использованы с целью оптимизации методики геологоразведочных работ, а также для повышения достоверности результатов оценки ресурсного потенциала рудных объектов.

Достоверность защищаемых положений и выводов определяется, прежде всего, использованием в работе результатов детальных геологических наблюдений в пределах изучаемых объектов с отбором большого количества штучных, керновых, а также крупнообъёмных проб. Полученные в процессе исследований новые материалы согласуются с результатами предшествующих работ и дополняют их. Высокая надёжность результатов аналитических работ обусловлена использованием современных методов исследований по сертифицированным методикам в аккредитованных лабо-

расториях. Высокая достоверность результатов подтверждена также использованием многочисленных дубликатов проб и анализов одной пробы с использованием разных аналитических методов. Так, состав минералов предварительно был определён на рентгеноспектральном микроанализаторе с ЭДС-детектором, затем заверен на микроанализаторе с волновыми детекторами. Определение весовой доли благородных металлов в пробах проводилось с использованием масс-спектрометрии с ИСП с последующей её заверкой пробирным анализом, а также определением весового содержания платиноидов, полученных при гравитационном обогащении проб.

Апробация работы. Основные выводы, полученные в ходе исследований, были представлены и обсуждены на многочисленных всероссийских и международных конференциях: «Онтогенез, филогенез, система минералогии» (Миасс, ИМин УрО РАН, 2015); «Новое в познании процессов рудообразования» (Москва, ИГЕМ РАН, 2015); «Металлогенез древних и современных океанов – 2016» (Миасс, ИМин УрО РАН, 2016); «Magmatism of the Earth and related strategic metal deposits» (Миасс, ИМин, УрО РАН, 2017); «Международный молодежный научный форум «Ломоносов-2018» (Москва, МГУ, 2018) и других.

По теме диссертации опубликованы 34 работы из них 5 – в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, 6-ти глав и заключения, содержит 174 страницы машинописного текста, включая 80 рисунков, 26 таблиц и список литературы из 116 наименований. Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, приведены краткие сведения о методах работы, фактическом материале, послужившем основой для написания работы, приведена оценка научной новизны и практической значимости работы, краткие сведения о степени изученности рассматриваемых объектов. Первая глава содержит краткий исторический очерк освоения платиноносного пояса Урала и развёрнутое описание исследований, направленных на выявление или характеристику коренного хромит-платинового оруденения. Во второй главе детально рассмотрены методы работ – особенности пробоотбора и использования аналитических методов. В третьей главе охарактеризовано структурное положение клинопироксенит-дунитовых массивов в пределах Платиноносного пояса Урала, входящего в Тагило-Магнитогорскую мегазону уральской складчатой области, и основные закономерности их строения.

Четвертая глава – комплексная структурно-вещественная характеристика хромит-платинового оруденения в дунитовых «ядрах» зональных массивов с детальной характеристикой их геологического строения и структурных особенностей вмещающих дунитов. В этой главе рассмотрены вещественные признаки дунитов и хромититов: химический состав слагающих их минералов, характер распределения и содержания в породах петрогенных компонентов и элементов-примесей. В пятой главе детально рассмотрены минералы платиновой группы из хромититов клинопироксенит-дунитовых массивов Среднего Урала. Основное внимание, помимо стандартного описания химического состава индивидов, уделено их онтогенической характеристике и, прежде всего, морфологическим и анатомическим особенностям. Выявлена последовательность образования минералов платиновой группы в хромит-платиновых рудных системах. В шестой главе обсуждаются закономерности распределения платины в телах хромититов, в том числе и на основании результатов, полученных в предыдущих главах. В качестве обобщения материалов, отражающих структурно-вещественные закономерности проявления хромит-платинового оруденения в клинопироксенит-дунитовых массивах Среднего Урала, в шестой главе предложена геолого-генетическая модель их образования. В заключении подводятся итоги исследований и основные выводы о возможности практического применения полученных результатов.

Благодарности. Автор искренне признателен своему научному руководителю профессору, д. г.-м. н. А.В. Козлову за всестороннюю поддержку при проведении исследований, глубокое осмысление их результатов и критический подход к предложениям и выводам соискателя. Столь же глубокую признательность и искреннюю благодарность хочется высказать главному научному сотруднику отдела Петрологии ФБУ «ВСЕГЕИ», д. г.-м. н. Л.Н. Шарпёнок за многочисленные советы и рекомендации, позволившие в существенно улучшить диссертационную работу. За активное и отважное участие во всех полевых исследованиях автор от всей души благодарит коллегу и друга Р.С. Паламарчука.

За помощь в организации и проведении исследований автор признателен коллегам из Всероссийского геологического института: В.В. Шатову, Е.А. Кухаренко, А.Е. Костину. Работа не имела бы столь широкого охвата и обширной аналитической основы без помощи А.В. Антонова (ВСЕГЕИ, г. Санкт-Петербург), Д.А. Варламова (ИЭМ РАН, г. Черногловка),

Д.А. Ханина (МГУ, г. Москва), Л.А. Ушинской (РАЦ «МИА», г. Санкт-Петербург), В.А. Шишлова (ВСЕГЕИ, г. Санкт-Петербург) и Ю.Л. Крецера (Радиевый институт, г. Санкт-Петербург).

Автор глубоко признателен своим учителям д. г.-м. н. В.А. Попову и к. г.-м. н. В.И. Поповой, предложившим идею о проведении онтогенетических исследований минералов платиновой группы.

За обсуждение результатов исследований и плодотворную дискуссию соискатель благодарен Е.В. Пушкарёву (в.н.с. ИГГ УрО РАН.), Э.М. Спиридонову (профессор каф. минералогии МГУ им. Ломоносова), О.К. Иванову (с.н.с. ИГГ УрО РАН). Автор особо признателен К.Н. Маличу (в.н.с. ИГГ УрОРАН) за обсуждение результатов минералогических исследований и их конструктивную критику.

Отдельную благодарность за бесценный производственный опыт хотелось бы высказать руководителю геологоразведочных работ «Светлоборской площади» главному геологу «Урал-МПГ» А.В. Корнееву.

В процессе проведения полевых работ и лабораторных исследований пришлось столкнуться с широким кругом людей, которые всегда были готовы оказать помощь и поддержку, за что автор им искренне благодарен.

Защищаемые положения и их обоснование

1. Хромит-платиновые минерализованные зоны в пределах Светлоборского и Вересовоборского клинопироксенит-дунитовых массивов приурочены к границам текстурно-структурных разновидностей дунитов. Преобладающий объём платиноносных хромититов сконцентрирован в порфиридных разновидностях дунитов, расположенных в зоне фациальных контактов между полями дунитов, отличающихся по зернистости.

Пространственная связь отдельных хромититовых шпиров с зонами фациальных переходов между полями дунитов, отличающихся по зернистости, была отмечена при картировании зональных массивов Урала (Иванов, 1997). В дунитах Нижнетагильского массива в области фациального перехода между телами крупнозернистых и среднезернистых дунитов были установлены хромит-платиновые рудные зоны (Иванов, 1997; Столяров, 2002; Пушкарёв и др., 2007).

С целью проверки предположения о пространственной связи хромит-платинового оруденения с границами текстурно-структурных разновидностей дунитов в контурах дунитовых «ядер» Светлоборского и Вересово-

борского массива были проведены детальные геологические исследования. Их результатом стало обнаружение хромит-платиновых рудных зон в области фациального перехода от среднезернистых к мелкозернистым дунитам Светлоборского массива, а также от крупнозернистых к среднезернистым дунитам в Вересовоборском массиве.

Петрографическое изучение дунитов Светлоборского массива с отбором проб в магистральных канавах через каждые 20 метров и в скважинах колонкового бурения через каждые 4 метра подтвердило предположение о пространственной связи оруденения с областями фациальных переходов между телами дунитов, отличающихся по зернистости. Непосредственно в области контакта среднезернистых дунитов, нередко обладающих порфировидными структурами, с мелкозернистыми дунитами (рис. 2) выявлено повышенное содержание акцессорного хромшпинелида (5-10% от объема дунита). В дунитах с повышенной концентрацией хромшпинелида локализованы тела прожилково-вкрапленных и массивных хромититов с содержаниями платины до 97 г/т.

Исследованные дуниты Светлоборского массива характеризуются протогранулярными, преимущественно идиоморфнозернистыми структурами без явных следов перекристаллизации. В областях развития разрывных нарушений дуниты обладают порфиробластической мелко-тонкозернистой структурой (2 % от объема всех дунитов) с полиэдрическизернистыми агрегатами оливина.

Вересовоборский массив по особенностям геологического строения во многом аналогичен Нижнетагильскому. Их общая черта – широкое распространение крупнозернистых дунитов и дунитовых пегматитов в структуре «ядра». Такая особенность не характерна для других зональных-клинопироксенит-дунитовых массивов Урала, и, учитывая сходство этих массивов с Гальмознанским массивом в Корякии (Сидоров и др., 2012), является благоприятным критерием для выявления хромит-платинового оруденения.

Результатом геологического изучения массива стало обнаружение хромит-платиновой рудной зоны в области фациального перехода от крупнозернистых к среднезернистым дунитам. По сравнению с предшествующими результатами по картированию массива (Виноградская, 1954; Иванов, 1986; Иванов, 1997), контуры тела крупнозернистых дунитов, часто переходящих в пегматоидные разновидности, в ходе исследований автора

были значительно расширены. В области фациального перехода от крупнозернистых к среднезернистым дунитам было выявлено широкое распространение порфиридных дунитов, часто обладающих высоким содержанием (более 5 %) акцессорного хромшпинелида (рис. 3). В контурах этой области распространены многочисленные тела прожилково-вкрапленных и массивных жильных хромититов, содержание платины в которых может достигать 500 г/т.

Дуниты, вмещающие хромит-платиновые рудные зоны Вересовоборского массива, по сравнению с дунитами Светлоборского массива изменены в большей степени. Они практически повсеместно серпентинизированы. Однако слабо изменённым дунитам, вне зависимости от крупности зёрен слагающего их оливина, присущи протогранулярные идиоморфнозернистые структуры. Порфиробластические структурные разновидности дунитов в центральной части Вересовоборского массива практически отсутствуют.

Масштабное проявление хромититов известно и в пределах дунитового «ядра» Каменушенского массива (Иванов, 1997). В ходе исследования было подтверждено пространственное совпадение хромит-платиновой рудной зоны с фациальным переходом от средне-крупнозернистых порфиридных к среднезернистым дунитам. В верховьях Первоначального лога в восточной части массива была обнаружена зона с повышенной концентрацией хромшпинелида в дунитах и телами прожилково-вкрапленных и массивных жильных хромититов. Её положение также пространственно контролируется областью фациального перехода. Хромититы, залегающие в пределах рудных зон, вне зависимости от структурно-текстурного типа характеризуются относительно невысокими содержаниями платины 1,5–8,0 г/т (с максимальным содержанием Pt 18,5 г/т) по сравнению с хромититами из других зональных массивов Среднего Урала.

Таким образом, при анализе геологической позиции хромит-платинового оруденения в структуре дунитовых «ядер» Светлоборского, Вересовоборского и Каменушенского массивов установлено, что главным контролирующим элементом является зона фациального контакта между телами дунитов, отличающихся текстурно-структурными особенностями.

2. Геологическая специфика строения рудных зон, характер распределения петрогенных и примесных компонентов в дунитах и хромититах определяют ведущую роль магматических процессов в

концентрировании металлов платиновой группы в рудные обособления.

Одним из доказательств преобладающей роли магматических процессов в ходе формирования платиноносных рудных зон является, как уже было сказано в обосновании первого защищаемого положения, их пространственное совмещение с областями фациальных переходов между дунитами с протогранулярными структурами, отличающимися зернистостью.

Тесная генетическая связь прожилково-вкрапленных, массивных жильных хромитов и дунитов подтверждена исследованиями химического состава минералов. Для магнезиальности оливина и акцессорного хромшпинелида в дунитах (рис. 4а) установлена значимая прямая корреляционная зависимость ($r=0,76$). Существенно меньший коэффициент корреляции ($r=0,43$; $n = 234$) установлен для связи магнезиальности хромшпинелида из хромитов и оливина из дунитов, вмещающих рудные тела. Графическое сопоставление (рис. 4б) составов хромшпинелидов по двухвалентным катионам позволяют говорить о тесной генетической связи хромитов и вмещающих их дунитов.

При проведении анализа распределения транзитных элементов (Sc, Co, Ni, Cu, Zn) установлено, что дуниты по сравнению с хромититами обогащены никелем и кобальтом, а для хромититов, напротив, характерны повышенные концентрации меди и цинка (рис. 5а). Для объяснения этого факта целесообразно обратиться к результатам рентгеноспектрального микроанализа минералов. Для оливина, например, установлено постоянное присутствие в его составе Ni. Аналогом никеля в геохимических процессах является кобальт и, как правило, два этих элемента содержатся в виде изоморфной примеси в оливине. Цинк и медь могут в значительном количестве содержаться в качестве изоморфных примесей в хромшпинелиде. Их концентрации в редких случаях могут достигать первых процентов (Ханин, 2017). Выявленные особенности содержания транзитных элементов в дунитах и хромититах свидетельствуют в пользу их фракционирования из одного источника, с определяющим влиянием на их распределение в породах изоморфной ёмкости минералов-концентраторов.

В совокупности с анализом транзитных элементов для понимания процессов формирования хромит-платиновых рудных зон целесообразно рассмотреть характер распределения в породах высокозарядных элементов (Y, Pb, Zr, Hf). Эти элементы малоподвижны при гидротермальных и мета-

морфических процессах, и определяющую роль в их распределении играют процессы кристаллизационной дифференциации. В дунитах наименьшие содержания Y, Zr, Hf и REE установлены в пегматитовых разновидностях, тогда как их наибольшие концентрации присущи мелкозернистым и среднезернистым дунитам (см. рис. 5б). Хромититы обогащены высокозарядными элементами, при этом для Zr выявлена прямая корреляционная связь с ЭПГ (рис. 7а).

По аналогии с распределением высокозарядных элементов установлено, что крупнозернистые разновидности дунитов обеднены элементами платиновой группы (среднее содержание 12-15 мг/т) относительно среднезернистых и мелкозернистых разновидностей (среднее содержание 40-55 мг/т) (рис. 6), накопление элементов платиновой группы свойственно порфиroidным разновидностям дунитов, расположенным в области фациальных переходов. Причина такого обогащения объясняется присутствием в этом типе дунитов многочисленных хромшпинелидовых сегрегаций, обогащённых платиноидами.

В результате сопоставления содержаний ЭПГ в разных типах дунитов можно сделать вывод, что источником платины, накапливающейся в хромит-платиновых рудных зонах, служат крупнозернистые дуниты и дунитовые пегматиты. Металлы платиновой группы совместно с высокозарядными элементами концентрируются в хромититах. При этом для Zr устанавливается значимая положительная корреляция с платиной (рис. 7а). В пользу единого процесса формирования дунитов и хромититов свидетельствует характер распределения платиноидов. Все дуниты вне зависимости от структурной разновидности характеризуются «М-образным» распределением ЭПГ, обладая Ir-Pt геохимической спецификой (рис. 7б). ЭПГ в хромититах распределены аналогичным образом, с тем лишь отличием, что их содержания по сравнению с дунитами могут быть больше в 10 и более раз.

В пользу единого процесса становления дунитов и хромит-платиновых минерализованных зон свидетельствуют: геологический контроль оруденения зоной перехода структурных разновидностей дунитов, близость химического состава породообразующих минералов, характер распределения и однонаправленное фракционирование элементов-примесей, включая ЭПГ, в породах и рудах. Отсутствие явных признаков преобразования дунитов, инициированных наложенными метаморфическими или метасоматическими процессами, позволяют считать, что кон-

центрирование металлов платиновой группы и сопровождающих элементов-примесей в хромит-платиновые рудные зоны произошло на магматическом этапе формирования зональных клинопироксенит-дунитовых массивов. Учитывая дискуссионную природу высокомагнезиальных дунитовых «ядер», генетическая модель формирования хромит-платинового оруденения требует подтверждения и уточнения с привлечением дополнительных данных. Однако выявленные закономерности, свидетельствующие о преобладающей роли первичномагматических процессов в локализации минерализованных зон и формировании платиновых минералов, позволяют с высокой степенью надёжности прогнозировать положение рудных зон в структуре массивов на стадии поисковых работ.

3. Платиновая минерализация в хромититах клинопироксенит-дунитовых массивов сформировалась в два этапа. В первый этап – совместно с хромшпинелидом кристаллизовались Pt-Fe твёрдые растворы, по составу отвечающие изоферроплатине Pt_3Fe и железистой платине Pt_2Fe . Второй этап подразделён на две стадии. В первую стадию первичные Pt-Fe твёрдые растворы были замещены минералами группы тетраферроплатины. Во вторую стадию минералы группы тетраферроплатины были частично замещены сульфидами, сульфоарсенидами, плюмбидами и меркуридами элементов платиновой группы.

Использование объёмных наблюдений позволило диагностировать поверхности совместного роста между индивидами Pt-Fe интерметаллидов и кристаллами хромшпинелида (рис. 8). Этот факт позволяет рассматривать Pt-Fe минералы, по составу отвечающие Pt_3Fe и Pt_2Fe , и хромшпинелиды в рамках единого парагенезиса.

В хромшпинелидах и Pt-Fe минералах в качестве включений диагностирован ряд минералов платиновой группы. Характер огранения индивидов этих минералов с преобладающими идиоморфными поверхностями, свидетельствует о кристаллизации большинства из них после формирования хромшпинелида, но раньше Pt-Fe матрицы. По совокупности наблюдений установлена следующая последовательность минералообразования: самородный осмий (рис. 9а, б) → самородный иридий (рис. 9в) → лаурит-эрликманит (рис. 9г, д) → баунит-кашинит (рис. 9г) → Ir-Rh тиошпинели → Pt_2Fe → Pt_3Fe часто с иридием, выделившимся в результате распада твёрдого раствора (рис. 9е). Образование самородного осмия происходило раньше основного объёма хромшпинелида. Позже и отчасти совместно с хромшпи-

нелидом кристаллизовались лаурит-эрликманит, кашинит-бауит (рис. 9г, д).

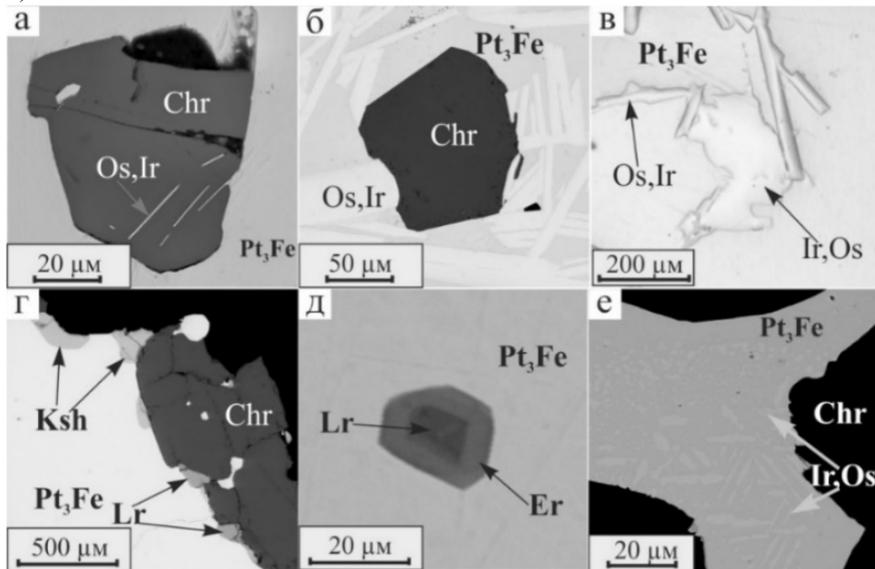


Рисунок 9. Генетические взаимоотношения минералов платиновой группы и хромшпинелидов. Chr – хромшпинелид, Pt₃Fe – изоферроплатина, Os, Ir – осмий, Ir, Os – иридий, Lr – лаурит, Er – эрликманит, Ksh – кашинит.

Частично совместная кристаллизация хромшпинелида, Pt-Fe минералов и включений в них является доказательством их одновременного образования. Возможность кристаллизации из расплавов самородного осмия, самородного иридия и лаурита подтверждена экспериментальными работами. В работе Д. Бренана и Д. Эндрюса (2001) показано, что сульфид иридия при кристаллизации ведёт себя аналогично эрликманиту, а в работе А. Перегедовой и М. Оненстедер (2002) кашинит, бауит, эрликманит и лаурит отнесены к одному парагенезису. С учётом экспериментальных данных, а также в связи с преобладающей ролью процессов концентрирования платиноидов на магматической стадии формирования клинопироксенит-дунитовых массивов кристаллизация хромшпинелидов, Pt-Fe минералов и включений в них может быть отнесена к магматическому этапу развития хромит-платиновых рудных зон.

Результаты оптической и электронной микроскопии позволили выявить серию преобразований минералов платиновой группы, сформированных в ходе магматического этапа. Широко распространённым явлением является замещение первичных Pt–Fe минералов агрегатом ферроникельплатины, туламинита и тетраферроплатины. В хромититах Вересовоборского массива было обнаружено крупное обособление минералов платиновой группы, пересечённое серпентиновым прожилком (рис. 10а). В этом обособлении степень замещения первичной изоферроплатины увеличивается по мере приближения к серпентиновому прожилку, а фрагменты самородка, находящиеся в серпентиновом агрегате, в значительной мере растворены и полностью замещены тетраферроплатиной в сростании с туламинитом (рис. 10б). Эти наблюдения доказывают, что формирование минералов группы тетраферроплатины сопряжено с активной серпентинизацией дунитов, что подтверждает представления многих исследователей платиновой минерализации (Бетехтин и др., 1935; Генкин, 1997; Толстых и др., 2011). Установлено, что по Pt–Fe минералу со стехиометрией Pt_2Fe преимущественно развивается туламинит, а по изоферроплатине образуются агрегаты ферроникельплатины. Наиболее поздним минералом является тетраферроплатина, замещающая туламинит в образцах из хромититов Вересовоборского массива (рис. 10в).

Не вызывает сомнений, что серпентинизация дунитов, при всём многообразии форм её проявления, является постмагматическим процессом, обусловленным активной проработкой дунитов гидротермальными растворами, порождёнными различными источниками. В связи с этим генетическая связь минералов группы тетраферроплатины с процессами серпентинизации позволяет выделить постмагматический этап формирования платиноидной минерализации в хромит-платиновых рудных системах.

Был установлен целый ряд минералов, замещающих интерметаллиды группы тетраферроплатины. Среди них преобладают сульфиды (куперит, феродсит), сульфоарсениды (ирарсит, холлингвортит, осарсит, руарсит), плюмбиды (звягинцевит, родплюмсит, плюмбопалладинит), амальгамы (потарит) ЭПГ, а также Pb– и Te– содержащие минералы.

Фактический материал не позволяет однозначно определить процесс, инициировавший образование этих минералов, однако, их отчётливо более позднее формирование по отношению к минералам группы тетраферроплатины обуславливает разделение постмагматического этапа на две стадии.

Таким образом, онтогенез платинометалльного оруденения в хромититах зональных клинопироксенит-дунитовых массивах Среднего Урала подразделяется на два этапа – магматический и постмагматический с более дробным делением последнего на две стадии (рис. 11).

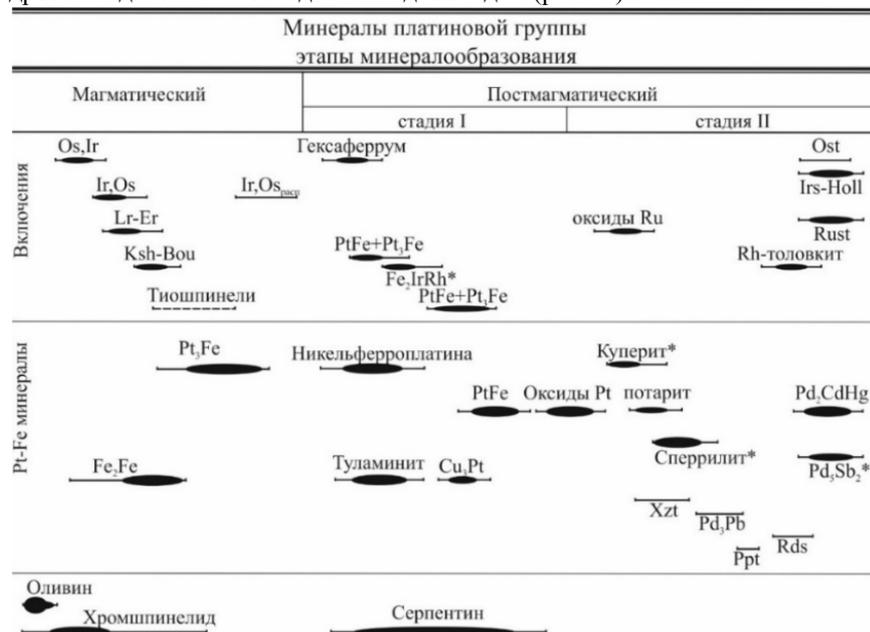


Рисунок 11. Схема образования минералов платиновой группы в хромититах клинопироксенит-дунитовых массивах Среднего Урала; * – по (Толстых и др., 2011). Условные обозначения: Bou – баунит, Ost – осарсит, Irs – ирарсит, Holl – холлингвортит, Rust – руарсит, Xzt – ксингцхонгит, Ppt – плюмбопалладинит, Rsd – родплюмсит, Pd₃Pb – звягинцевит. Ir, Os_{расп} – распад твёрдого раствора иридия в изоферроплатине.

Заключение

В результате изучения дунитов Светлоборского и Вересовоборского клинопироксенит-дунитовых массивов выявлены и всесторонне охарактеризованы ранее не известные хромит-платиновые рудные зоны. В ходе

сравнительного анализа полученных данных с результатами предыдущих исследований установлено, что основным структурным фактором контроля платиноидного оруденения в дунитах зональных массивов являются области перехода между разновидностями дунитов, отличающимися по зернистости.

На основании объёмного исследования минералов платиновой группы и изучения их внутреннего строения установлен порядок минералообразования в ходе непосредственного формирования хромшпинелидовых сегрегаций и хромититов, а также порядок вторичных изменений, вызванных поздними наложенными процессами. Значительный объём результатов рентгеноспектрального микроанализа МППГ позволил точно диагностировать минералы и статистически обосновано подтвердить выявленные парагенезисы и ассоциации. По совокупности полученных материалов выделены два этапа образования минералов платиновой группы в хромит-платиновых рудных зонах: магматический и постмагматический. В ассоциацию МППГ первого этапа входят Os-Ir-Ru интерметаллиды, сульфиды рядов эрликманит-лаурит и кашинит-бауит, а также ряд тиошпинелей и железо-платиновые минералы. На втором этапе в две стадии происходило формирование вторичных минералов. В первую стадию образование минералов группы тетраферроплатины, связанное с серпентинизацией дунитов. Во вторую стадию возникновение различных поздних сульфидов, сульфидоарсенидов, плюмбидов, меркуридов и др. соединений с ЭПГ.

На основе совокупности результатов петрографических, геохимических и минералогических исследований предложена генетическая модель концентрирования элементов платиновой группы в хромититах на магматической стадии формирования клинопироксенит-дунитовых массивов. Эта модель формирования рудных зон может быть положена в основу проектирования поисково-оценочных и геологоразведочных работ на рудную платину в дунитах массивов Урало-Аляскинского типа.

По теме диссертации опубликованы следующие основные работы:

1. *Степанов С.Ю.* Сравнительная характеристика платиновой минерализации Светлоборского, Вересовоборского и Нижнетагильского дунит-клинопироксенитовых интрузивов (Средний Урал, Россия) // Новые данные о минералах, 2015. № 50. С. 29–37.

2. *Степанов С.Ю.* Сравнительная характеристика составов минералов платиновой группы в хромититах и россыпях Нижнетагильского массива,

Средний Урал / С.Ю. Степанов, А.Г. Пилюгин, А.А. Золотарев // Записки Горного института, 2015. Т. 211. С. 22–28.

3. *Степанов С.Ю.* Платиноидная минерализация Светлоборского и Вересовоборского клинопироксенит-дунитовых массивов Среднего Урала (Россия) / С.Ю. Степанов, К.Н. Малич, А.В. Козлов, И.Ю. Баданина, А.В. Антонов // Геология рудных месторождений, 2017. Т. 59. № 3. С. 238–250.

4. *Паламарчук Р.С.* Платиновая минерализация массивных хромитов Иовского дунитового тела (Северный Урал) / Р.С. Паламарчук, С.Ю. Степанов, Д.А. Ханин, А.В. Антонов // Вестник Московского университета. Серия 4: геология, 2017. №5. С. 68–76.

5. *Малич К.Н.* Коренная платиноидная минерализация зональных клинопироксенит-дунитовых массивов Среднего Урала / К.Н. Малич, С.Ю. Степанов, И.Ю. Баданина, В.В. Хиллер // Доклады академии наук, 2017. Т. 476. № 4. С. 440–444.

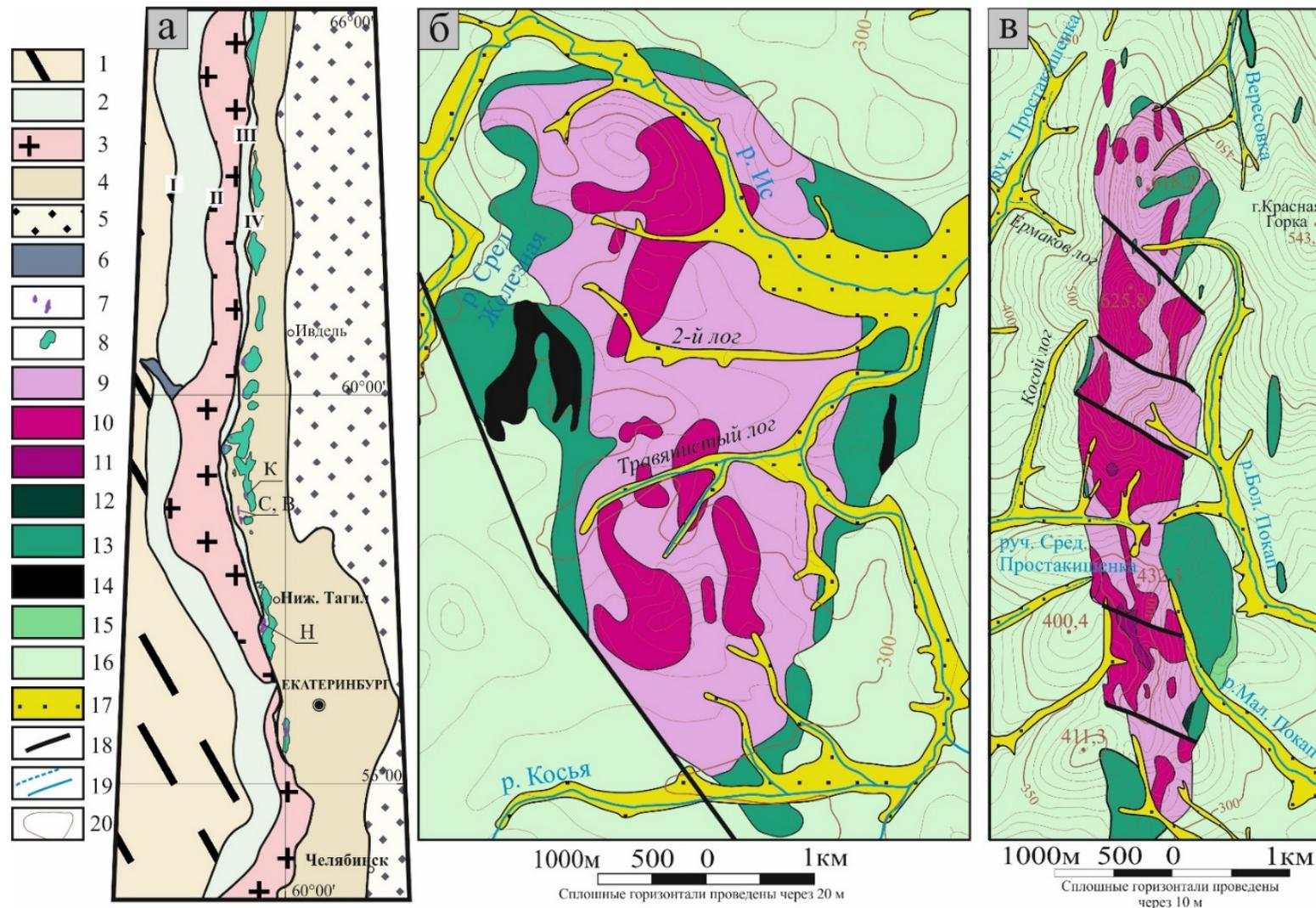


Рисунок 1 – Положение клинопироксенит-дунитовых массивов в структурах Урала (а) и схемы геологического строения Светлоборского (б) и Вересовоборского (в) массивов (Иванов, 1997) с обобщениями. 1 –палеозойские отложения осадочного чехла Восточно-Европейской платформы, 2 – Западно-Уральская складчато-надвиговая область; 3 – Центральное Уральское поднятие;4 – Тагило-Магнитогорская мегазона; 5 – мезозойско-кайнозойские отложения Западно-Сибирской платформы; 6 – Полудовское поднятие; 7 – клинопироксенит-дунитовые массивы (Н – Нижнетагильский, С – Светлоборский, В – Вересовоборский, К – Каменушенский); 8 – клинопироксенитовые и габбровые интрузивы Платиноносного пояса; дуниты (9–11): 9 – мелкозернистые, 10 – среднезернистые 11 – крупнозернистые и пегматоидные; 12 –верлиты; 13 – клинопироксениты; 14– горнблендиты; 15 – габбро; 16 – вулканиты вьейской свиты; 17 – аллювиальные отложения; 18 – разрывные нарушения; 19 – гидросеть; 20 – горизонтали высот. Структурные швы: I–Главный Западноуральский, II – Осевой, III– Присалатинский, IV– Главный Уральский.

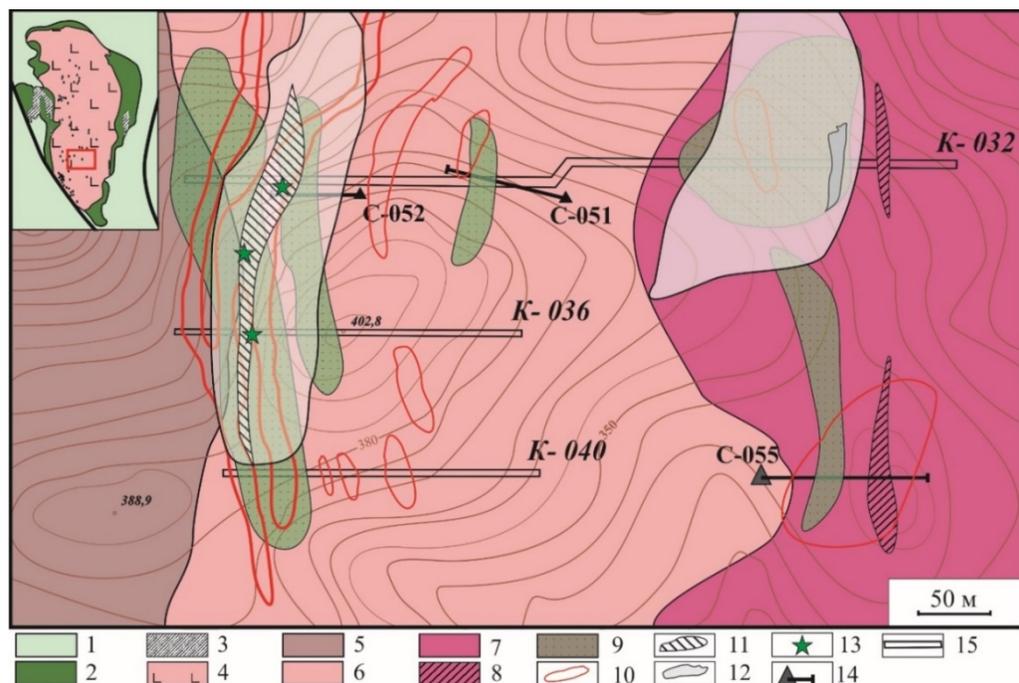


Рисунок 2. Схема геологического строения участка Вершинный Светлоторский массива, построенная по результатам петрографического описания дунитов. 1 – вулканы вейской свиты; 2 – клинопироксениты; 3 – габбро; дуниты (4–8): 5 – мелкозернистые, 6 – среднезернистые с участками порфиридных разностей, 7 – средне– крупнозернистые, 8 – порфиридные среднезернистые с вкраплениями размером 4–5 см, 9 – с содержанием хромшпинелида больше 5%; 10 – литохимические аномалии с содержанием Pt более 0,2 г/т; зоны развития хромитов (11,12): 11 – прожилково-вкрапленных, 12 – массивных жильных; 13 – тела хромитов с содержанием Pt более 30 г/т; 14 – скважины колонкового бурения, по которым были изготовлены петрографические шлифы с отбором проб через 3 м; 15 – магистральные каналы

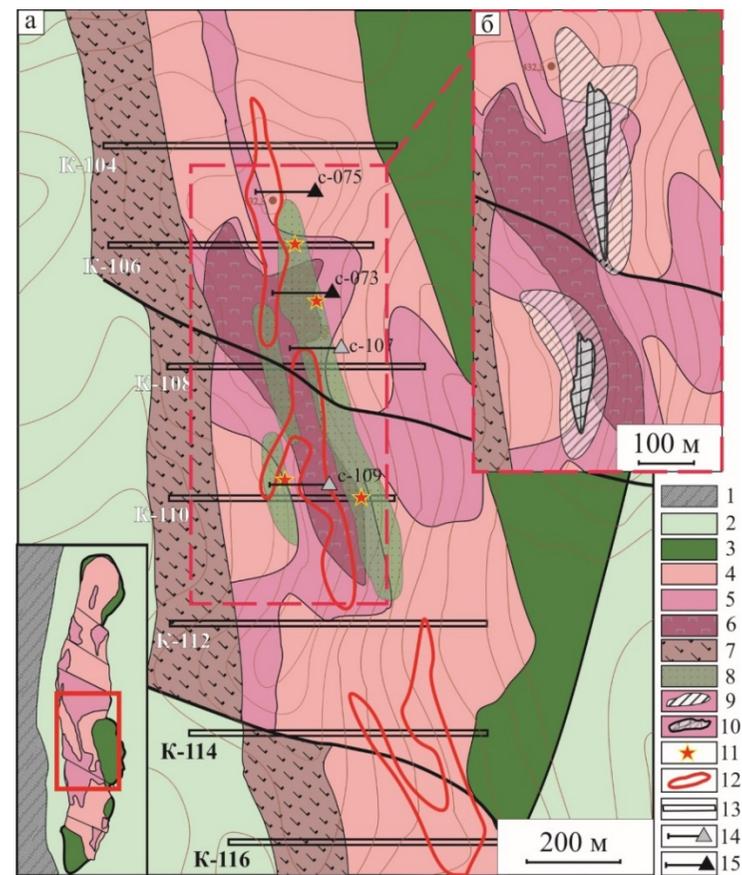


Рисунок 3. Геологическая схема участка Вересовоборский (а) с детальной врезкой – схемой размещения зон, содержащих прожилково-вкрапленные и массивные хромиты (б). 1 – апотуфовые зелёные сланцы, 2 – метаморфизованные вулканы вейской свиты; 3 – клинопироксениты; (4–8) дуниты: 4 – среднезернистые, 5 – среднекрупнозернистые порфиридные, 6 – крупнозернистые с телами пегматитов, 7 – замещённые антигоритовыми метасоматитами, 8 – с содержанием хромшпинелида больше 5%; (9–10) зоны развития хромитов: 9 – прожилково-вкрапленных, 10 – массивных; 11 – хромитовые шлифы с содержанием Pt более 15 г/т; 12 – литохимические аномалии с содержанием Pt более 0,2 г/т; 13 – разведочные каналы; 14 – скважины колонкового бурения, вскрывающие хромитовые шлифы; 15 – скважины колонкового бурения (отбор проб через 3 м с изготовлением петрографических шлифов)

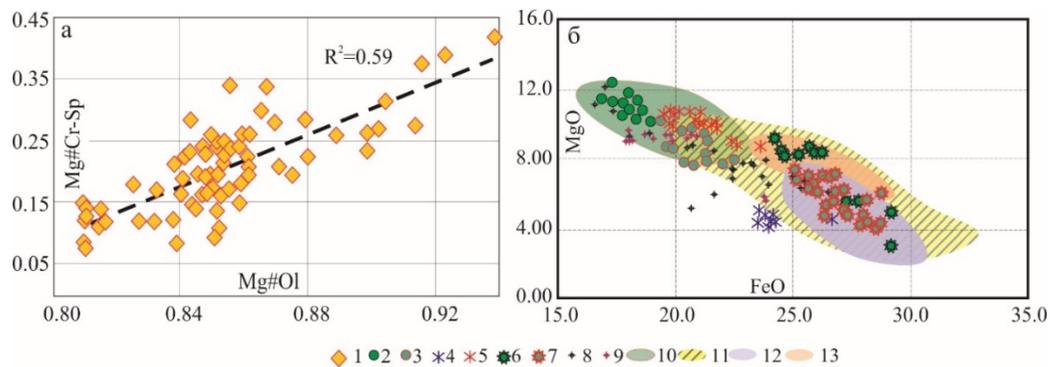


Рисунок 4. Особенности химического состава рудных и акцессорных хромшпинелидов: а – зависимость магнезиальности оливина (Mg#Ol) от магнезиальности хромшпинелида (Mg#Cr-Sp), R^2 – величина достоверности аппроксимации; б – диаграмма составов акцессорных и рудных хромшпинелидов в координатах MgO–FeO. 1 – точки, соответствующие магнезиальности хромшпинелида и оливина из одного образца; 2–9– рудные хромшпинелиды из хромититов массивов: Нижнетагильского (2 – платиноносных, 3 – не платиноносных), Светлоборского (4 – платиноносных, 5 – не платиноносных), Вересовоборского (6 – платиноносных, 7 – не платиноносных), Каменушенского (8 – платиноносных, 9 – не платиноносных); поля составов акцессорных хромшпинелидов из дунитов массивов: 10 – Нижнетагильского, 11 – Светлоборского, 12 – Вересовоборского, 13 – Каменушенского.

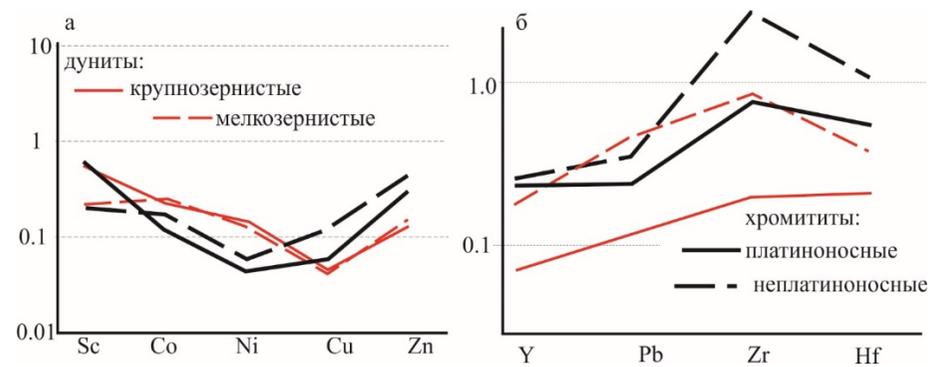


Рисунок 5. Характер распределения элементов-примесей в дунитах и хромититах (платиноносные содержат более 3 г/т платины) из клинопироксенит-дунитовых массивов Среднего Урала, общее число проб 34

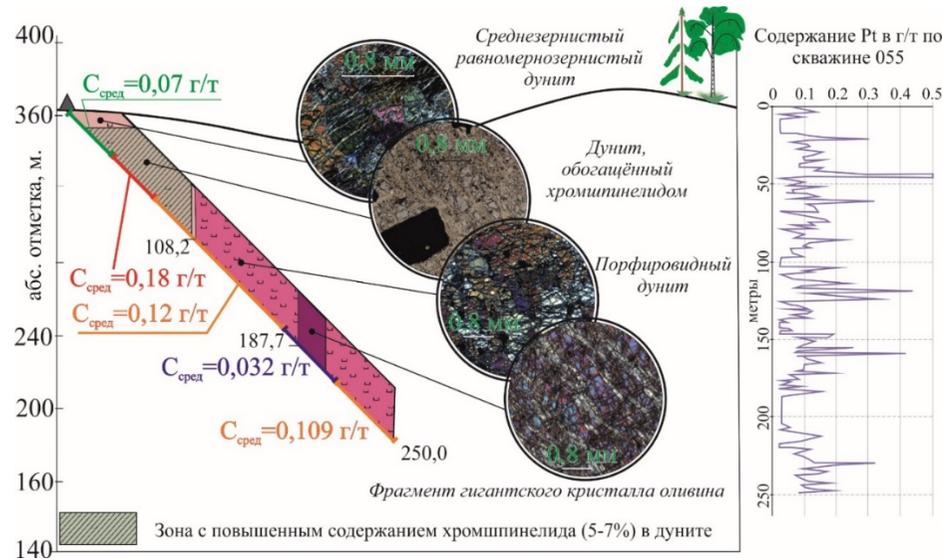


Рисунок 6. Характер распределения платины в дунитах, отличающихся по зернистости, скважина № 055, участок Вершинный, Светлорборский массив.

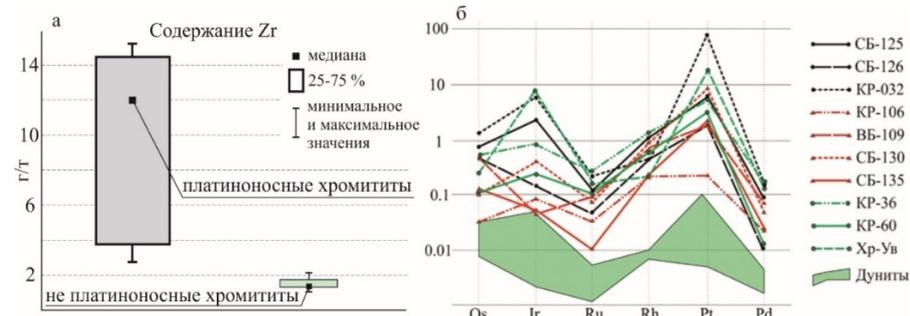


Рисунок 7. Распределение Zr в хромититах (а) и ЭПГ дунитах и хромититах (б) из массивов: Светлорборского (СБ-125, СБ-126, КР-032), Вересовоборского (КР-106, ВБ-109, СБ-130, СБ-135) и Каменушенского (КР-36, КР-60, Хр-Ув)

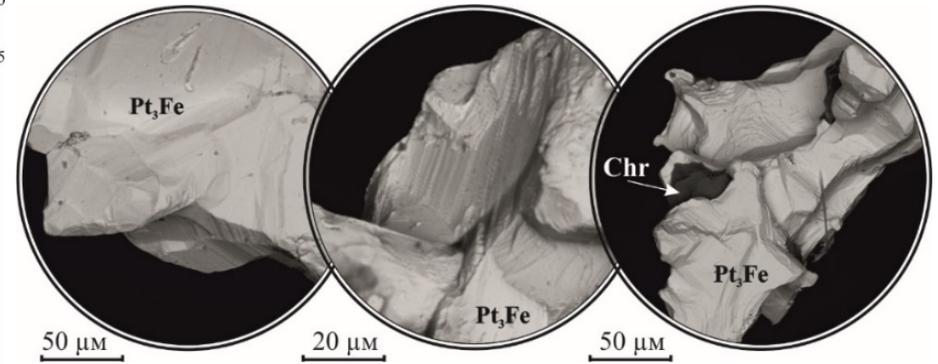


Рисунок 8. Поверхности совместного роста на зернах изоферроплатины.

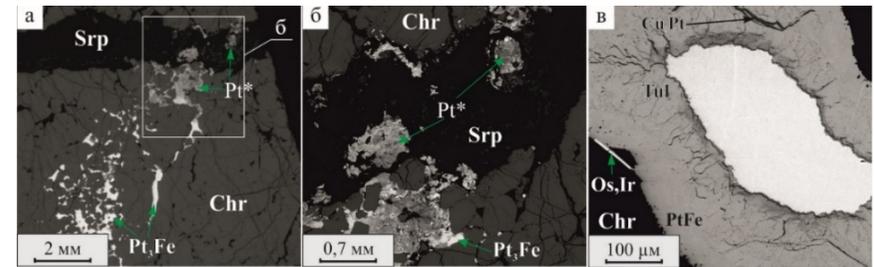


Рисунок 10. Характер распространения минералов группы тетраферроплатины в хромититах. Chr – хромшпинелид, Srp – серпентинит, Pt₃Fe – изоферроплатина, Pt* – смесь минералов группы тетраферроплатины и оксидов платины, Tul – туламинит, PtFe – тетраферроплатина, Cu₃Pt – платиново-медный неназванный минерал.