

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева
Сибирского отделения Российской академии наук

На правах рукописи

Чайка Иван Федорович

**ПЕТРОЛОГИЯ МАЛОСУЛЬФИДНОГО ХРОМИТ-
ПЛАТИНОНОСНОГО ГОРИЗОНТА ИНТРУЗИИ
НОРИЛЬСК-1**

Специальность 1.6.3. Петрология, вулканология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Новосибирск-2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук» и в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт экспериментальной минералогии им. Д. С. Коржинского Российской академии наук»

Научный руководитель: **Изох Андрей Эмильевич**, доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник ИГМ СО РАН

Официальные оппоненты: **Криволуцкая Надежда Александровна**, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник ГЕОХИ РАН
Юдовская Марина Александровна, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник ИГЕМ РАН

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской Академии Наук (г. Иркутск)

Защита состоится 19 мая 2023 года в 14.00 часов в конференц-зале на заседании диссертационного совета 24.1.050.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, Новосибирск, проспект Академика Коптюга, д. 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>

Автореферат разослан «10» апреля 2023 года.

Ученый секретарь диссертационного совета
24.1.050.01, д.г.-м.н.

О.М. Туркина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования

Месторождения элементов платиновой группы (ЭПГ) можно разделить на три главных типа: (1) сульфидные ЭПГ-Cu-Ni месторождения расслоенных интрузий (массивные и вкрапленные руды интрузий Норильского типа – крупнейший мировой источник Pd, месторождения Джинчуань, Садбери, Великая дайка); (2) месторождения ЭПГ с высоким отношением ЭПГ/сульфиды, встречающиеся в виде горизонтов в расслоенных интрузиях, часто обогащенных хромитом (хромититы и рифы Бушвельда, JM-риф интрузии Стиллуотер, хромититы Мончегорских интрузий); (3) россыпные месторождения платиноидов, связанные с хромититами ультрамафит-мафитовых комплексов (Mungall and Naldrett, 2008; Naldrett, 2010; Cabri et al., 2022). Второй тип, называемый «малосульфидным» (здесь и далее используются сокращения «МС-руды», «МС-горизонт» и др.), является важнейшим мировым источником платины, поскольку именно с ним связано большинство месторождений Бушвельдской интрузии – главного экспортера Pt (Mungall and Naldrett, 2008). Генезису этого типа месторождений ЭПГ посвящено огромное количество исследований, однако до сих пор большинство проблем, связанных с феноменом МС-минерализации в дифференцированных интрузиях, остаются дискуссионными.

В интрузиях норильского типа, наряду с массивными и вкрапленными Cu-Ni-ЭПГ сульфидными рудами, установлен и МС-тип, для которого обоснован существенный экономический потенциал (Ерыкалов и др., 2006). Поэтому требуется комплексное исследование и систематизация данных, в том числе - с целью формулировки прогнозно-поисковых критериев на данный тип руд в других интрузиях Норильского района. С фундаментальной точки зрения МС-руды в интрузиях Норильского типа также являются «белым пятном». Детальные исследования проводились Рябовым В.В., Служеникиным С.Ф. и Дистлером В.В. с соавторами, однако, в отличие от вкрапленных сульфидных руд интрузий норильского типа, для МС-горизонта до сих пор не предлагалась целостная генетическая схема.

Цель исследования

Реконструировать главные пороодо- и рудообразующие процессы, участвовавшие в формировании МС-горизонта интрузии Норильск-1.

Основные задачи исследования

1. Исследовать строение верхней эндоконтактной зоны (ВЭЗ) интрузии Норильск-1, положение в ней МС-горизонта. Систематизировать разновидности пород и МС-оруденения в интрузии Норильск-1.

2. На основе минералого-геохимических характеристик определить относительный вклад (а) магматической дифференциации, (б) взаимодействия магмы с вмещающими породами в генезисе МС-горизонта и (в) постмагматических флюидных процессов в генезисе МС-горизонта.
3. С помощью данных по минералогии хромшпинелидов и составу многофазных включений в, объяснить происхождение хромитовой минерализации в МС-горизонте.
4. На основе данных по геохимии халькофильных и благородных металлов, S и Cr а также минералогии сульфидов и МПГ, предложить схему образования МС-оруденения в интрузии Норильск-1.

Фактический материал и методы исследования

Основу исследования составляет материал по керну 6 скважин, вскрывающим МС-горизонт интрузии Норильск-1, и образцы, отобранные с техногенных обнажений в карьере Медвежий ручей (всего 100 образцов). Керна скважин предоставлены Шевко А.Я., Горой М.П., Служеникиным С.Ф., Шведовым Г.И. и Марфиным А.Е. Образцы из карьера были отобраны Житовой Л.М., Калугиным В.М., Шевко А.Я., Горой М.П. и автором. Также, использовались фондовые материалы Отчета о результатах оценочных работ на малосульфидные платиновые руды интрузии «Норильск-1» [Ерыкалов и др., 2006].

Для петрографических и минералогических исследований изготовлено 100 препаратов (шлифы и аншлифы). Методами рентгено-флуоресцентного анализа XRF и масс-спектрометрии с ионизацией вещества в индуктивно-связанной плазме ICP-MS получено 92 валовых анализа на петрогенные, литофильные и халькофильные примесные элементы, 42 валовых анализа на элементы платиновой группы. Методами ICP-MS и термоионизационной спектрометрии TIMS получено 4 анализа валового изотопного состава Rb, Sr, Sm и Nd. В ходе минералогических исследований, получено более 5000 анализов методом сканирующей электронной микроскопии с энергодисперсионным анализом SEM EDS и более 800 электронных микрофотографий, в том числе – изучено *in situ* более 300 индивидов и сростаний минералов платиновой группы (МПГ). Также получено около 2500 количественных микрозондовых (EPMA) анализов.

Большое количество первичных многофазных включений в хромшпинелиде позволило провести их детальное исследование. Методом SEM EDS было исследовано более 400 многофазных включений. С использованием трубчатой печи получено и исследовано методом EPMA 236 экспериментально-гомогенизированных включений. Методом

вторично-ионной масс-спектрометрии SIMS получен 51 анализ редких элементов в экспериментально-гомогенизированных включениях.

Личный вклад автора

Автор выполнял часть пробоотбора и пробоподготовки, петрографические и минералогические исследования методами SEM EDS и EPMA, участвовал в анализе методом SIMS. Также автор участвовал в создании экспериментальной установки и проводил эксперименты. Обработка и интерпретация результатов проводилась автором при консультативном участии научного руководителя и коллег.

Научная новизна

С использованием современных методик выполнено комплексное исследование МС-оруденения интрузии Норильск-1. В том числе, (1) впервые проведено комплексное минералого-геохимическое исследование пород МС-горизонта и прилегающих структур верхней контактовой зоны интрузии Норильск-1; (2) впервые установлены широчайшие диапазоны составов хромшпинелидов в пределах одного генетического образования в дифференцированной интрузии и показано, что эти вариации (в первую очередь, по Fe^{3+}/Fe^{2+} и TiO_2) обусловлены контрастными редокс-параметрами кристаллизации хромитов и интенсивным постмагматическим наложением; (3) впервые исследованы многофазные включения в хромшпинелидах интрузии норильского типа.

По полученным данным сформулирована гипотеза об образовании хромитовой минерализации в МС-горизонте интрузии Норильск-1 при контаминации мафитовой магмы вмещающими породами, в результате сдвига фазового равновесия и интенсивной кристаллизации хромита в контаминированной среде.

Впервые предложено и обосновано качественное объяснение высокого тенора ЭПГ в МС-горизонте как результата двухстадийного (раннемагматического и флюидного) концентрирования ЭПГ.

Впервые предложена целостная концепция образования МС-горизонта интрузии Норильск-1, объясняющая его локализацию, специфику и потенциально применимая к другим интрузиям норильского типа.

Защищаемые положения

- 1. Ведущим процессом в образовании пород МС-горизонта интрузии Норильск-1 была кристаллизационная дифференциация базитовой магмы (с MgO 8-9 мас. % и SiO₂ 48-49 мас. %) при ограниченном вкладе ассимиляции вмещающих пород, характерной для богатых хромитом ассоциаций МС-горизонта. На поздне- и постмагматическом этапе породы подвергались интенсивной флюидной проработке, существенно повлиявшей на окончательный состав и облик пород.*

2. *Хромитовая минерализация верхнего эндоконтакта сформировалась в результате ассимиляции богатой хромом базитовой магмой аргиллитов и углистых пород вмещающей осадочной толщи. Ключевыми факторами массовой кристаллизации хромита являлись: сдвиг фазовых равновесий в область насыщенности расплава хромитом и интенсивное выделение пузырьков флюида, обеспечившее адгезию хромита и его флотацию в верхние части интрузии.*
3. *Образование малосульфидной ЭПГ-минерализации в верхней эндоконтактной зоне интрузии Норильск-1 связано с концентрацией ЭПГ в сульфидной фазе, а не с массовой кристаллизацией хромита. Резко повышенные соотношения ЭПГ/сульфид в МС-горизонте, по сравнению с другими Cu-Ni-ЭПГ сульфидными рудами интрузий норильского типа, обусловлены дополнительным концентрированием ЭПГ за счет их флюидного переноса на поздне- и постмагматическом этапе.*

Теоретическая и практическая значимость

Полученные результаты дают комплексное представление о возможном механизме формирования экономически-значимого МС-оруденения в интрузиях норильского типа, что дает возможность прогнозирования схожих рудных зон в других трапповых интрузиях с сульфидной и ЭПГ минерализацией.

Исследование хромитовой минерализации, сопутствующей МС-оруденению, позволило углубить представление об одном из механизмов образования хромититов в дифференцированных интрузиях.

Хромшпинелиды ВЭЗ интрузии Норильск-1, благодаря уникально-широкому диапазону их состава по Fe^{3+}/Fe^{2+} , имеют потенциал использования в качестве калибровочных для «фланк-метода» прямого определения Fe^{3+} и Fe^{2+} в шпинелидах методом EPMA (Kucha et al., 1989).

В ходе работы собрана экспериментальная установка, позволяющая с целью частичной или полной гомогенизации прогревать включения в различных минералах в диапазоне температур от комнатной до 1400 °C с последующей быстрой закалкой.

Апробация работы и публикации

По результатам работы было опубликовано 4 статьи в рецензируемых журналах, индексируемых б.д. Web of Science и Scopus, в том числе – 4 в изданиях, рекомендованных ВАК. Одна статья в журнале Lithos предварительно одобрена к публикации и находится на доработке автором. Результаты работы были опубликованы в 9 тезисах докладов и представлены в виде устных и стендовых докладов на всероссийских и

международных конференциях: «Новое в познании процессов рудообразования» (Москва, 2018 г.), «Magmatism of the Earth and related strategic mineral deposits – 2019» (Санкт-Петербург), Международная научная студенческая конференция «Студент и научно-технический прогресс» (Новосибирск, 2019 г.), “SEG 2019, South American Metallogeny: Sierra to Craton” (г. Сантьяго, Чили), «Уральская минералогическая школа – 2021» (Екатеринбург), «Металлогения древних и современных океанов – 2022» (Миасс), «Early Career Researcher International Platinum Symposium – 2022» (онлайн формат).

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и включает в себя 78 рисунков и 24 таблицы, в том числе 4 – с большим объемом данных в Приложении. Список литературы состоит из 252 наименований.

Благодарности

Автор искренне благодарит научного руководителя, д.г.-м.н. профессора *Изоха Андрея Эмильевича* за всестороннюю поддержку, помощь и консультацию в планировании и проведении исследования и подготовке диссертации; к.г.-м.н. Каменецкого В. С. (ИЭМ РАН) за помощь в подготовке публикаций по теме диссертации, дискуссии и организацию работы в Университете Тасмании (Хобарт, Австралия) в 2020 году; к.г.-м.н. Зеленского М. Е. (ИЭМ РАН) за обучение и помощь в создании экспериментальной установки. Автор признателен Житовой Л.М., Шевко А.Я., Горе М.П., Служеникину С.Ф., Калугину В.М., Шведову Г.И. и Марфину А.Е. за предоставленный материал, Лобастову Б.М. за проведение части аналитических работ на СЭМ, Сокол Э.В. за консультацию по вопросу взаимодействия магм и осадочных пород, Житовой Л.М., Гарсия Дж и Толстых Н.Д. за предоставленные аналитические данные, Кутыреву А.В. за помощь в классификации минералов платиновой группы, Аберштайнеру А. и Контоникас-Харос А. за правку англоязычных публикаций, сотрудников ООО «Норильскгеология» и лично Кетрову А.А. и Радько В.А. за предоставление фондовых материалов и содействие в посещении месторождения, Гусеву В.А. и Цаплину В.Г. за помощь в пробоподготовке. Изготовление полированных препаратов осуществляли Салмина О.Н., Бондаренко В.П. и Белкина Н.Б. Лабораторные исследования были проведены с помощью специалистов: Даниловской В.А., Нигматуллиной Е.Н., Симакина С.Г., Потапова Е.В., Хлестова М.В., Карманова Н.С., Якич Т.Ю., Чубарова В.М. (ИВиС ДВО РАН), Каменецкой М.Б., Карстена Г., Кармановой Н.Г., Карандашева В.К., Петренко Д.Б., Пантеевой С.В., Брянской Н.В., Пашковой Г.В., Чубарова В.М. (ИЗК СО РАН), Уховой Н.Н. и Солошенко Н.Г. Кроме этого, были получены данные, не вошедшие в диссертацию, но

повлиявшие на ход исследования, за которые автор благодарен Томиленко А.А., Розенталь А., Чумакову А. и Кричтону У. На работу повлияли дискуссии со Служеникиным С.Ф., Латыповым Р., Калугиным В.М., Рябовым В.В., Степановым С.Ю., Барнсом С., Радько В.А., Арискиным А.А., Кетровым А.А., Кисеевой К. и анонимные рецензии на статьи в журналах. Наконец, я благодарен супруге и коллеге, Искриной А.В., за постоянную поддержку и обсуждение работы, нашим родителям за поддержку в учебе и работе, всем преподавателям ГГФ НГУ и сотрудникам Лаборатории 211 ИГМ СО РАН. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 20-35-90082), Российского научного фонда (проект 16-17-10145) гранта Society of Economic Geologists (SRG 20-96) а также по государственному заданию ИГМ СО РАН и в рамках Исследовательской программы ИЭМ РАН (проект FMUF-2022-0004).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность работ, сформулированы цель и задачи, указаны научная новизна, практическая значимость полученных результатов, кратко описан фактический материал и основные методики.

Первая глава посвящена обзору работ предшественников и современному состоянию изученности (1) малосульфидного типа руд в целом, (2) интрузий норильского типа и (3) МС-горизонта в интрузиях норильского типа. Отмечено, что о генезисе МС-типа руд в целом существует целый спектр гипотез: от раннемагматических до постмагматических и гидротермальных, но большинство исследователей связывают их образование с концентрацией ЭПГ в сульфидном компоненте.

Обзор изучения интрузий норильского типа показывает, что на современном этапе большинством принимается, что Cu-Ni-Pt-Pd сульфидные руды в этих интрузиях сформировались благодаря длительному фракционированию этих элементов между силикатным и сульфидным расплавом в глубинной камере (Котульский, 1946; Naldrett et al., 1994).

Исследование МС-горизонта интрузий норильского типа показало, что наличие этого горизонта характерно для многих рудоносных интрузий Норильского района (Служеникин, 2000), тенор ЭПГ (содержание, пересчитанное на 100% сульфид) в них в 10-100 раз выше, чем во вкрапленных рудах тех же интрузий (Рябов, 1992; Дистлер, 1994), типичной, однако не обязательной, является ассоциация оруденения с породами, богатыми хромитом (Рябов, 1982; Sluzhenikin et al., 2020). Генезис МС-горизонта является дискуссионным, и пока не предложено целостной генетической модели, однако все ранние работы подчеркивают важную

роль флюидов и, возможно, ассимиляции вмещающих пород в его формировании (Рябов и др., 2001; Дистлер и др., 1994; Sluzhenikin et al., 2020).

Во второй главе приводится краткое описание геологического положения и строения интрузий норильского типа (Рис. 1) и интрузии Норильск-1 (Рис. 2), в частности. Интрузии норильского типа (включая Норильск-1) состоят из нижней и верхней эндоконтактовых зон (НЭЗ и ВЭЗ) и главной дифференцированной зоны (ГЗ) между ними. МС-горизонт вмещается ВЭЗ (Рис. 1). Важно то, что вмещающими породами являются терригенная угленосная осадочная толща тунгусской серии (C₂-P₂) и субщелочные базальты ивакинской свиты (P_{2iv}) (Рис. 2).

Зона	Колонка	Породы	Руды	Cu/Ni				ΣЭПГΣСульф					
				1	2.5	5	10	1	10	100	1000		
Верхний экзо-контакт		Вулканические (базальты), осадочные (песчаники, аргиллиты, угли) и метасоматические (скарны, роговики) породы	Прожилково-вкрапленные и жильные										
Верхняя эндоконтактовая зона (ВЭЗ)		Лейкогаббро	Гибридные г-д, контактные г-д, магматические брекчи	Малосульфидные (МС-горизонт)									
		Такситовые г-д, нередко с хромитовой минерализацией и пикритовыми обособлениями	Такситовидные безрудные г-д										
Главная дифференцированная зона (ГЗ)		Безоливиновые г-д, габбродиориты	Вкрапленные										
		Оливиносодержащие и оливиновые габбродиориты											
Нижняя эндоконтактовая зона (НЭЗ)		Пикритовые г-д с такситовыми обособлениями, троктолиты.	Вкрапленные										
		Такситовые габбродиориты											
Нижний экзо-контакт		Оливиновые габбродиориты	Массивные										
		Контактовые габбродиориты		Прожилково-вкрапленные									
		Осадочные (песчаники, аргиллиты) породы, силлы ергалахского комплекса											



Рисунок 1. Схема строения интрузий норильского типа и расположения рудных ассоциаций (по Дистлеру, 1994)

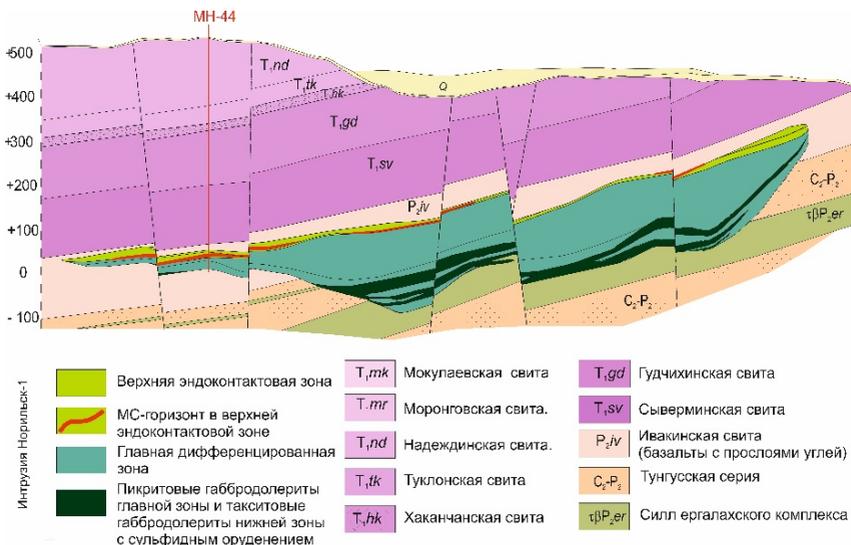


Рисунок 2. Широтный (З-В) разрез северной части интрузии Норильск-1 (по фондовым данным).

В третьей главе описывается коллекция исходного материала, аналитические методы и экспериментальная методика прогрева с частичной гомогенизацией и закалки включений в хромите. Коллекция насчитывала 100 образцов из следующих категорий: (1) хромитовые МС-руды ($Pt+Pd > 1$ ppm), (2) бесхромитовые МС-руды, (3) хромитовые МС-руды из контактовых брекчий, (4) безрудные ($Pt + Pd < 1$ ppm) породы ВЭЗ, (5) контактовые породы (включая экзоконтакт), (6) пикритовые габбродолериты ГЗ с вкрапленными сульфидными рудами, (7) пикритовые габбродолериты ГЗ с густовкрапленным хромитом и сульфидными рудами и (8) такситовые габбродолериты НЭЗ с вкрапленными сульфидными рудами. Экспериментальная работа проводилась с помощью трубчатой печи, собранной автором и Зеленским М.Е. в ИЭМ РАН, позволяющей резко закалывать монофракции зерен с включениями путем сброса их в воду. Эксперименты проводились с монофракциями хромита из образцов при T 1250 °С согласно данным термобарохимической (Булгакова и Рябов, 1972) и минеральной (Чайка и др., 2022) оценкам температуры кристаллизации оливина и хромита МС-горизонта.

Четвертая глава содержит развернутое описание полученных результатов. Глава разделена на блоки, характеризующие: (1) строение ВЭЗ и макроскопическую характеристику пород, (2) петрографию пород, (3) состав породообразующих силикатов, (4) состав вторичных и аксессуарных

минералов, (5) хромитовую минерализацию, (6) рудную сульфидную и платиноидную минерализацию, (7) валовые геохимические характеристики пород и (8) включения в хромшпинелидах.

По результатам изучения строения ВЭЗ построен схематичный разрез ВЭЗ (Рис. 3А), выявлены породы, вмещающие МС-горизонт. Для ВЭЗ характерно наличие мощного, но прерывистого горизонта безрудного лейкогаббро (Рис. 3Б) и контактовых брекчий. МС-горизонт вмещается, в большинстве, слоем такситовых габбродолеритов (Рис. 3В) нижней части ВЭЗ, однако может вмещаться и контактными брекчиями (Рис. 3Г). Слой такситовых габбродолеритов подстилается безрудными дифференциатами ГЗ.

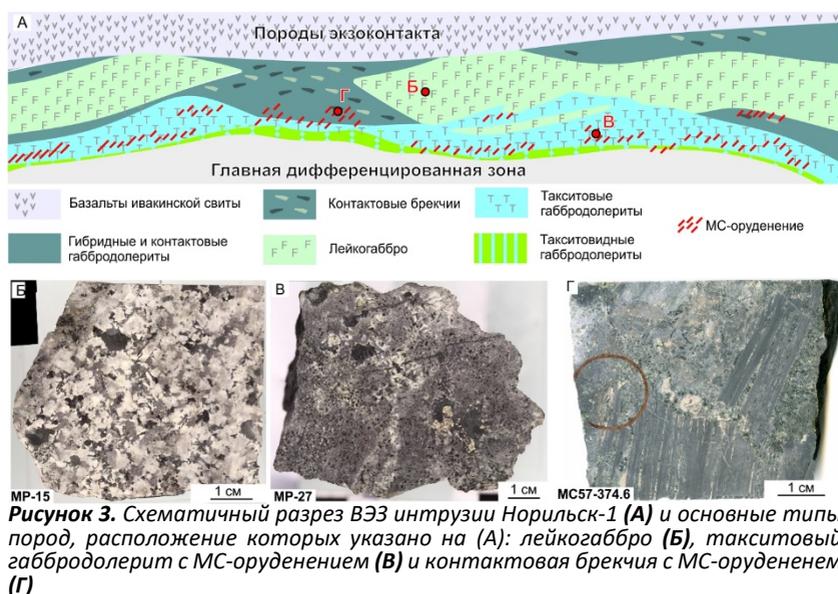


Рисунок 3. Схематичный разрез ВЭЗ интрузии Норильск-1 (А) и основные типы пород, расположение которых указано на (А): лейкогаббро (Б), такситовый габбродолерит с МС-оруденением (В) и контактовая брекчия с МС-оруденением (Г)

Породы МС-горизонта, несмотря на их неоднородную текстуру и большое содержание водосодержащих и вторичных минералов, сохраняют первичную офитовую или пойкилоофитовую структуры. Все породы характеризуются идиоморфизмом плагиоклаза и оливина относительно клинопироксена. Хромит в хромитовом типе МС-горизонта образует густую, но тонкозернистую вкрапленность, сульфиды проявлены в виде каплевидных обособлений и шлиров (Рис. 4).

Составы породообразующих силикатов (оливин Fe_{64-82} , клинопироксен $En_{42-30}Fs_{8-28}Wo_{36-49}$ плагиоклаз An_{40-77}) варьируют в широких диапазонах,

отвечающих изменениям состава при магматической дифференциации и во многом идентичных вариациям состава минералов в рудоносных такситовых габбродолеритах НЭЗ.

Вторичные минералы представлены хлоритом и актинолитом (по клинопироксену), сапонитом (по оливину) и соссюритом (по плагиоклазу). Важным аксессуарным минералом является апатит, который ассоциирует с вторичными силикатами и сульфидной минерализацией и для рудоносных пород характеризуется повышенным содержанием Cl (до 5%).

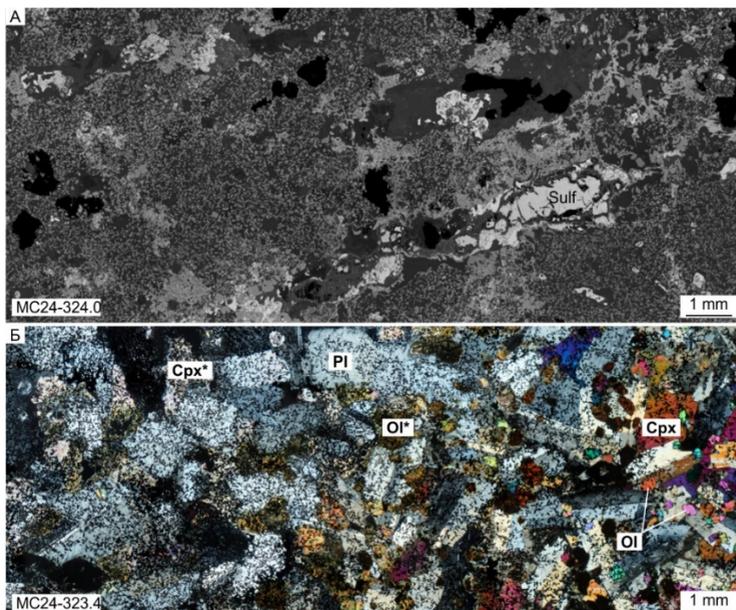


Рисунок 4. (А) BSE-микрофотография такситового г-д с МС-оруденением: темно-серое – силикаты, светло-серое – вкрапленность хромита, ярко-серое – сульфиды (подписаны). (Б) – микрофотография в скрещенных николях фрагмента такситового габбродолерита с переходом от ассоциации лейкогаббро к ассоциации оливинового габбро, темная мелкая вкрапленность – хромит

Хромитовая минерализация, важная особенность большинства пород МС-горизонта, представлена тонкой, но густой вкрапленностью кристалликов хромита размером 20-200 μm , которые вмещаются почти всеми силикатными фазами (в меньшем количестве – оливином), однако отсутствуют в миндалинах и каплевидных сегрегациях сульфида (Рис. 4А). Для хромитовой вкрапленности характерны кольцевые текстуры, которые как огибают миндалины и стяжения водосодержащих силикатов (Рис. 5А),

так и встречаются в матрице из плагиоклаза, оливина и клинопироксена, где эти кольца проходят через границы силикатных минералов (Рис. 5Б).

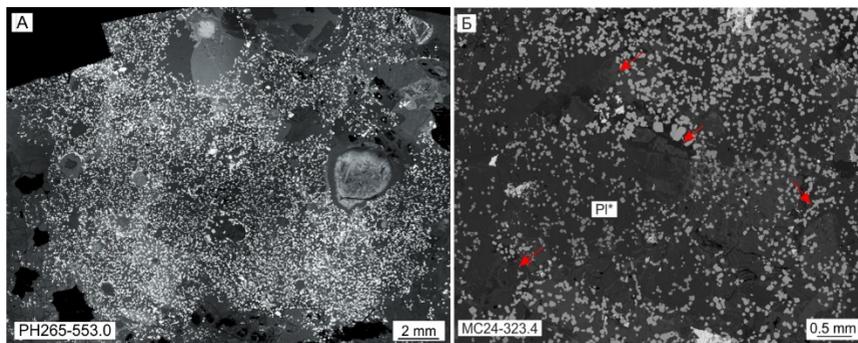


Рисунок 5. Примеры кольцевых текстур хромита. (А) – в основном, окаймляющие мандалины, (Б) – расположенные «поверх» силикатной матрицы

В хромитоносных брекчиях хромит буквально облепляет обломки углистых аргиллитов (Рис. 6А). На некотором удалении от обломков он имеет морфологию, аналогичную морфологии зерен хромита из такситовых габбродолеритов (Рис. 6Б). Однако непосредственно на контакте с обломками типичны скелетные кристаллы хромита «кружевной» морфологии (Рис. 6А, В), а на расстоянии <5 мм от контакта – переходные разновидности с признаками скелетного роста и, нередко, округлыми включениями в центре зерна (Рис. 6Г). Также отмечены микроскопические (<50 микрон) зернышки хромита в трещинках в обломках углистых аргиллитов (Рис. 6Д).

Несмотря на то что большинство хромшпинелидов МС-горизонта классифицируются как хромит с переходом в хроммагнетит (Рис. 7А), их составы крайне широко варьируют, в особенности, по Ti и соотношению Fe^{3+}/Fe^{2+} (Рис. 7Б, В, Г). Содержания TiO_2 достигают 20%, в отдельных случаях в брекчиях – до 25%, а хромит из нескольких образцов, в том числе из брекчий, имеет крайне низкие Fe^{3+}/Fe^{2+} соотношения. Установлено, что наивысшие содержания TiO_2 наблюдаются именно в низко- Fe^{3+} разновидностях, и такие хромиты не имеют аналогов в других вулканитах или расслоенных интрузиях мира (Barnes and Roeder, 2001; Kamenetsky et al., 2001). Эти аномальные составы мы связываем с сильным восстановительным эффектом от углистых пород, обломки которых типичны для брекчий ВЭЗ.

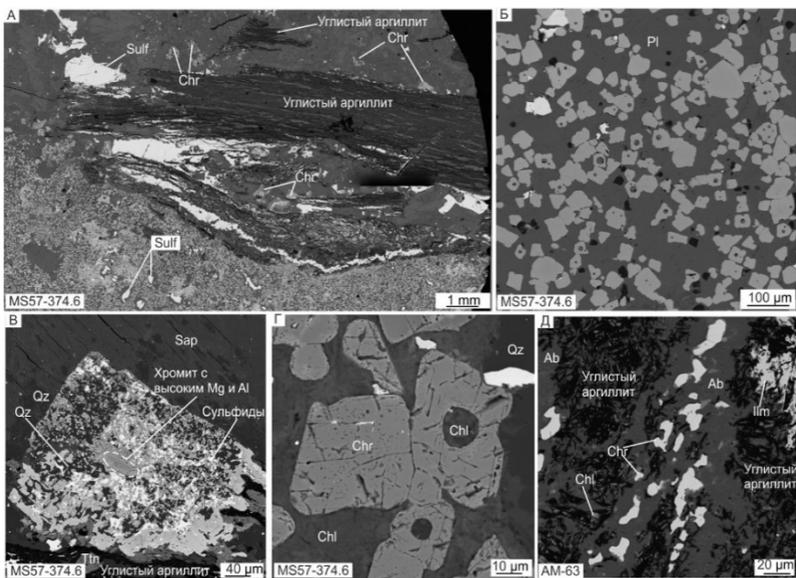


Рисунок 6. Хромитовая минерализация в контактовой брекчии (BSE-микрофотографии). (А) – общий вид, (Б) – хромит в матрице на удалении от ксенолита, (В) – кружевной скелетный кристалл хромита на контакте обломка и матрицы, (Г) – скелетные кристаллы хромита с округлым включением в центре, (Д) – кристаллики хромита в трещине в аргиллите

Состав хромита зависит от вмещающего силиката. Среди свежих силикатов, плагиоклаз вмещает наиболее магнезиальные хромиты. Клинопироксен и оливин – сравнительно низкомагнезиальные. Состав хромита в сильно измененных силикатах имеет единственный выраженный максимум по Mg# около 13-15 мол. % и почти не зависит от того, какой именно это был силикат. Также, выявлено, что хромит, ассоциирующий с МПГ и сульфидной минерализацией, как правило, низкомагнезиальный.

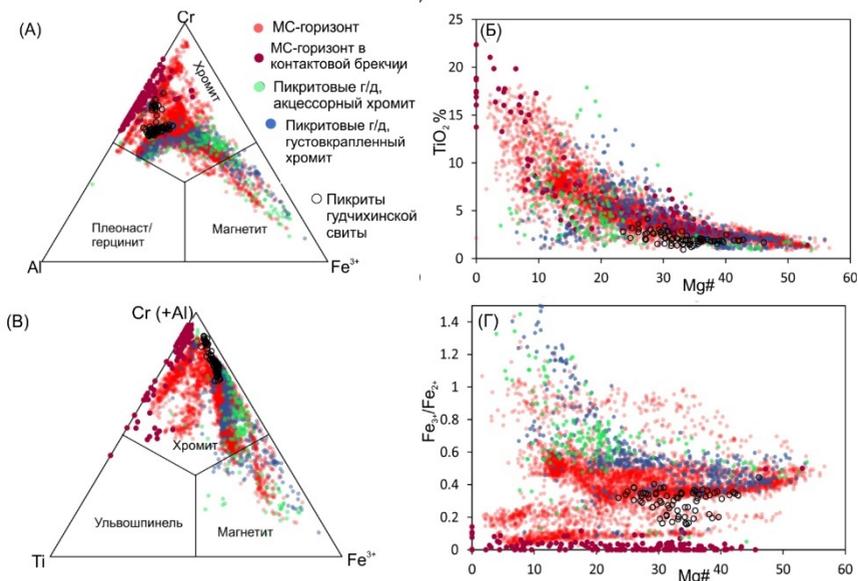


Рисунок 7. Диаграммы с составами хромшпинелидов МС-горизонта, хромшпинелидов из пикритовых габбродолеритов (акцессорные и густовкрапленные) и хромшпинелидов из траппов Норильского района.

Оруденение представлено капле- и шлировидной вкрапленностью Cu-Ni-Fe сульфидов и собственно минералами платиноидов. Сульфидные агрегаты дифференцированы, выделяются пирротиновая, пентландитовая и халькопиритовая зоны (Рис. 8А). Пирротин часто интенсивно замещается хлоритом и сапонитом так, что остаются лишь ламели пентландита, ранее находившиеся в пирротине. Состав сульфидов отвечает высокосернистой ассоциации (Fe/S 0.77-0.82 ат. в пирротине) и высокой примесью Ni в пирротине (до 1.5%), и по этим параметрам близок вкрапленным рудам в такситовых габбродолеритах НЭЗ, отличаясь от низкосернистой ассоциации пикритовых габбродолеритов ГЗ (Tolstykh et al., 2020).

МПГ минерализация в МС-горизонте представлена более чем 25 минералами. Главными (по 5% и более суммарной площади МПГ на минерал in situ) являются: сперрилит $PtAs_2$ (около 60%), а также палладоарсенид Pd_2As , изоферроплатина Pt_3Fe , холлингвортит $(Rh,Pt)AsS$ с примесью Ir и паларстанид $Pd_5(Sn,As)_2$ – по 5-6 % каждый. Остальные минералы – главным образом, арсениды, станниды, теллуриды, стибиды и сульфоарсениды Pd. Важной особенностью с точки зрения генезиса руд является то, что в 98-99% МПГ-минерализация связана с сульфидами: МПГ

располагаются либо непосредственно в сульфидах, либо в ореоле окружающих их вторичных силикатов (Рис. 8).

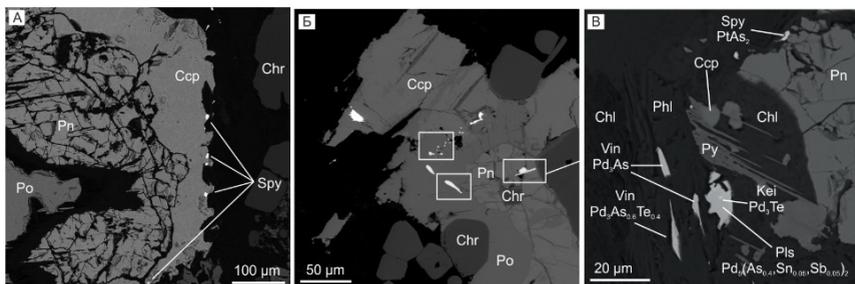


Рисунок 8. Представительные примеры (BSE-фотографии) сульфидной и МПГ-минерализации в МС-горизонте: (А) – сперрилит в краевой части сульфидного шлора, (Б) – включения МПГ (яркие) в сульфидном агрегате, (В) – МПГ во вторичных силикатах, окружающих сульфидный агрегат. Spy – сперрилит, Vin – винсентит, Kei – кейтконнит, Pls – паларстанид.

Валовый состав большинства пород ВЭЗ отвечает ряду дифференциатов пород интрузий норильского типа, характеризуется умеренно-дифференцированным составом (MgO 5-12), близок к такситовым габбродолеритам НЭЗ, однако в целом содержит меньше MgO, чем последние. Редкоэлементные спайдер-диаграммы (Рис. 9) для всех бесхромитовых пород, не находящихся непосредственно на контакте с вмещающими породами и не содержащих их обломков, идентичны остальным породами интрузии, хотя и несколько более обогащенные. Тем не менее, некоторые породы с хромитовым типом МС-оруденения выражено более обогащены и имеют спектры, средние между породами интрузии и вмещающими породами (Рис. 9А). Валовый состав пород МС-горизонта по изотопам Rb, Sr, Sm и Nd в большинстве также попадает в области слабоконтаминированных пород интрузии Норильск-1. Лишь один анализ заметно смещен по составу Sr в более радиогенную область, характерную для пород, контаминированных породами осадочными чехла.

Содержания рудообразующих халькофильных (Cu+Ni) элементов в МС-горизонте близки таковым во вкрапленных рудах ГЗ и НЭЗ, однако по ЭПГ МС-горизонт более богат, чем вкрапленные руды ГЗ и НЭЗ. Суммарные содержания ЭПГ в МС-рудах в среднем варьируют от 1 до 10 ppm, в некоторых образцах достигая 50 ppm (Рис. 10А). Содержания халькофильных и благородных металлов коррелируют, однако наклон этой корреляции в координатах ЭПГ-(Cu+Ni) более крутой, чем для вкрапленных руд (Рис. 10А). Также, важно то, что несмотря на присутствие некоторой положительной корреляции содержаний ЭПГ с Cr₂O₃ (которой не

наблюдается для других вкрапленных руд интрузии), существует значительная группа низкохромистых МС-руд (бесхромитовый тип), для которого эта зависимость не выполняется (Рис. 10Б).

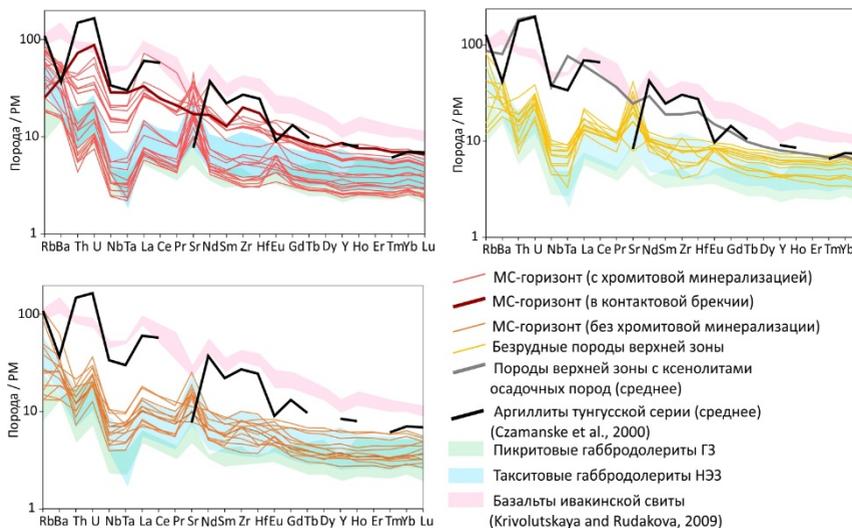


Рисунок 9. РМ-нормированные (Lyubetskaya and Korenaga, 2007) спайдер-диаграммы изученных пород в сравнении с другими породами интрузии Норильск-1 и вмещающими породами.

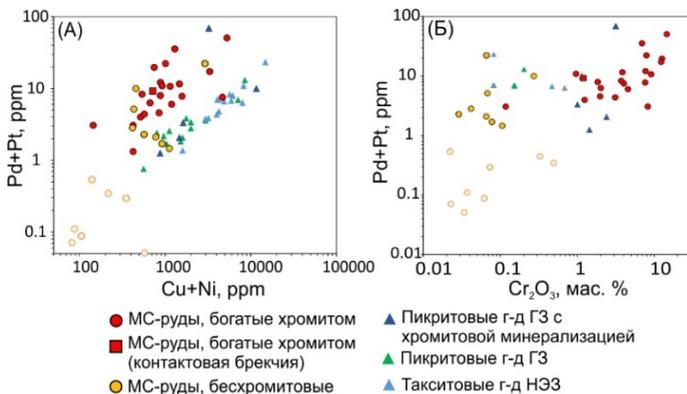


Рисунок 10. Вариационные диаграммы содержания Pt+Pd в зависимости от (Cu+Ni) (А) и Cr₂O₃ (Б) для пород ВЭЗ и рудоносных пород ГЗ и НЭЗ.

Включения в хромите чаще одиночные (Рис. 11А), но иногда образуют группы в крупных кристаллах (Рис. 11Б). По составу выделяются силикатные включения без низкотемпературных минералов (хлорита и альбита), силикатные включения с хлоритом и/или альбитом (Рис. 11В), и сульфидные включения. Далее мы рассматриваем включения только 1-й группы, поскольку именно они несут важную информацию о среде кристаллизации хромита. Их состав отличается от состава пород: преобладают ортопироксен, кислое стекло, Са- и Са-На амфиболы и богатый Na флогопит.

Составы экспериментально полученных стекол после прогрева с гомогенизацией, приблизительно отражающие валовый состав включений, также отличаются от пород ВЭЗ, интрузий норильского типа в целом, а также траппов норильского района. Для них характерен крайне широкий диапазон по MgO (2-13%), CaO (1-8%), выраженная положительная корреляция Na₂O и MgO (Рис. 12). Распределение рассеянных элементов в изученных включениях также контрастирует с породами норильских интрузий. Спайдер-диаграммы включений практически не перекрываются с диапазонами пород интрузии Норильск-1 и имеют характеристики, типичные для аргиллитов норильского района и/или базальтов ивакинской свиты (Рис. 13).

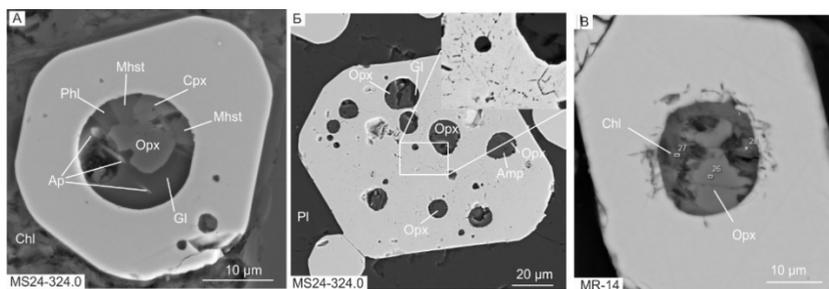


Рисунок 11. Представительные примеры включений в хромшпинелидах МС-горизонта. (А, Б) – включения с силикатным стеклом (Gl) и без хлорита, (В) – включение с хлоритом, замещающим ортопироксен. На врезке на (Б) – увеличенный фрагмент с реликтами скелетной морфологии хромита

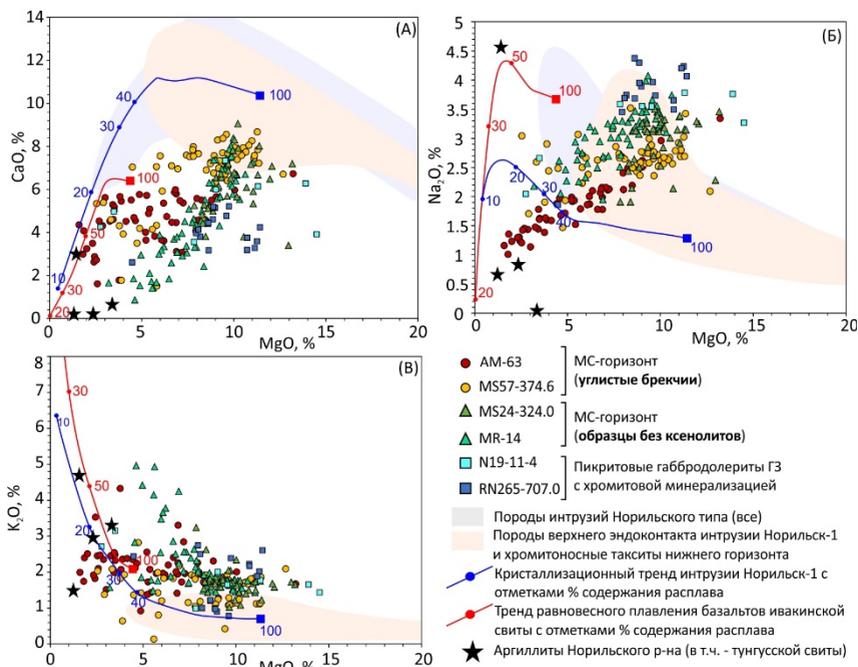


Рисунок 12. Вариационные диаграммы с составами стекол экспериментально-прогретых и закаленных включений в сравнении с породами ВЭЗ и другими породами интрузии Норильск-1, с модельными кривыми дифференциации «родоначального» для интрузии Норильск-1 расплава и фракционного плавления базальтов ивакинской свиты и с составами аргиллитов норильского района. Симуляция кристаллизации и плавления проводилась в программе COMAGMAT 5.0 (Арискин и Бармина, 2000; Ariskin et al., 2018). Данные автора а также из (Yao and Mungall, 2021; Krivolutskaya, 2011; Czamanske et al., 2000; Krivolutskaya and Rudakova, 2009).

Пятая глава диссертации посвящена обсуждению результатов и формулировке защищаемых положений. Данные минерального состава, петрографии и валового состава пород показывают, что большинство пород ВЭЗ и MC-горизонта, в частности, являются, в первую очередь, продуктами кристаллизационной дифференциации, и для большинства из них привнос материала вмещающих пород незначителен. Родоначальный расплав, согласно моделированию равновесия расплав–оливин (Fo₃₂) при симуляции плавления и «обратной кристаллизации» до равновесия с оливином наиболее слабоизмененного и петрографически гомогенного образца MC-горизонта в программе COMAGMAT 5.0 (Арискин и Бармина, 2000), является базитовым с MgO 8-9 мас. % и SiO₂ 48-49. Эта оценка хорошо согласуется с оценкой состава родоначального расплава для интрузии

Норильск-1 в целом (Krivolutskaya, 2011). Далее, интерпретация данных по вторичным, аксессуарным минералам и, в особенности, хромшпинелидам и различии их составов в зависимости от фазы-хозяина, позволила утверждать, что породы на поздне- и постмагматическом этапе подверглись интенсивному флюидной проработке. При этом сульфидные сегрегации, ассоциирующие с водосодержащими поздне- и постмагматическими силикатами и низко-Mg хромитом, находились в наиболее проницаемых для флюида зонах. Таким образом, сделан вывод о том, что наряду с магматическим этапом, важным в становлении МС-горизонта был и поздне-/постмагматический флюидный этап.

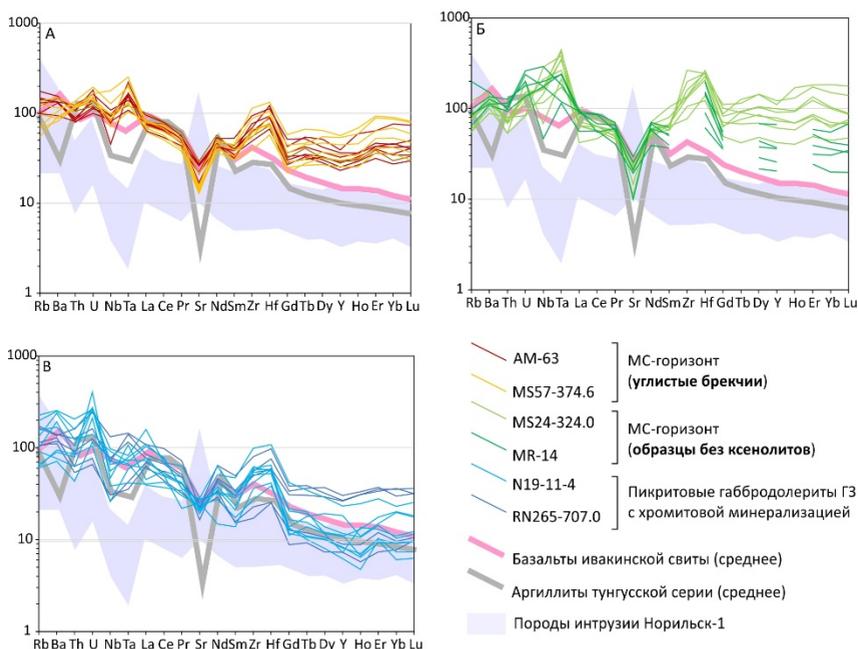


Рисунок 13. РМ-нормированные спайдер-диаграммы с составами прогретых и закаленных включений в сравнении с составами пород интрузии Норильск-1 (данные автора и Krivolutskaya, 2016), базальтов ивакинской свиты (Krivolutskaya and Rudakova, 2009) и аргиллитов норильского района (тунгусской серии) (Czamanske et al., 2000)

Проблема генезиса хромитовой минерализации решалась, в основном, используя первичные силикатные включения как захваченную среду минералообразования, а также опираясь на структурно-текстурные характеристики хромитовой вкрапленности. Составы включений не могут

быть следствием нормальной магматической дифференциации, а скорее представляют результат смешения между базитовым расплавом и низко-Na кислым компонентом. Рассмотрев в качестве такого компонента три возможных варианта (1) поздние дифференциаты магмы, первичной для интрузии Норильск-1; (2) продукты частичного плавления базальтов ивакинской свиты и (3) низко-Na аргиллиты норильского района (тунгусской серии и разведочнинской свиты D₂), мы сделали вывод, что наблюдаемым трендам смешения наиболее соответствуют именно аргиллиты (Рис. 12, 13).

Таким образом, наиболее вероятным механизмом кристаллизации большого количества хромита является смещение равновесия в область кристаллизации только хромита при резком раскислении мафического расплава (Irvine, 1975). Это подтверждается особенностями хромитовой минерализации в брекчиях, которые указывают на крайне быструю кристаллизацию хромита непосредственно на контакте магмы и фрагментов вмещающих аргиллитов и на то, что рассмотренные силикатные включения как раз и формируются на фронте реакции обломков вмещающих пород и мафического расплава.

Исследование фазовых взаимоотношений в упрощенных системах, отвечающих исходному расплаву для интрузий норильского типа, аргиллиту тунгусской серии и продуктам их гибридизации также подтверждает эту гипотезу. Состав исходного расплава приближается системой An-Fo-Di и эволюционирует согласно тренду ADE (Рис. 14А). Смешение его с аргиллитом (система Al₂O₃-SiO₂-En) приводит к образованию гибридной среды, состав которой приближается системой An-Fo-SiO₂. Затем, поскольку содержание An компонента практически не меняется, так как Al₂O₃ приблизительно одинаково и в расплаве, и в контаминанте (Czamanske et al., 2000), вектор контаминации AC в системе An-Fo-SiO₂-Mg₂CrO₄ проецируется на плоскость Fo-SiO₂-MgCr₂O₄ как вектор A*C*, проходящий, согласно (Irvine, 1975), через область насыщения расплава только хромитом. Существенный эффект вносит также присутствие K₂O в гибридной среде, который, как показано (Roedder, 1959) расширяет область стабильности энстатита и, соответственно смещает эвтектику SiO₂-Chr-En в сторону SiO₂. Это приводит к расширению области гибридных составов, насыщенных только хромитом, как показано на Рис. 14Б, и благоприятствует образованию хромитовой минерализации.

Сопоставляя полученные данные с минералогическими и текстурными особенностями, мы предлагаем механизм образования хромитовой минерализации, проиллюстрированный на Рис. 15, 16. Ключевыми факторами образования горизонта, несущего пород, богатые хромитом, в ВЭЗ интрузии Норильск-1, являются (1) взаимодействие базитовой магмы с

аргиллитами осадочного чехла в подводящем канале и на уровне становления интрузии и (2) вспенивание гибридной среды при дегазации аргиллитов и за счет этого – всплывание богатых хромитом «сгустков» в верхнюю часть интрузивного тела (Рис. 15, 16А-В).

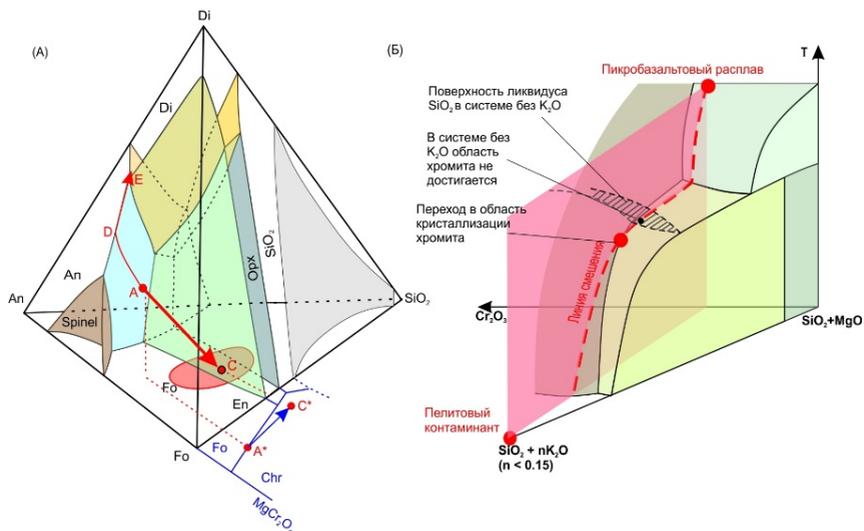


Рисунок 14. Фазовые диаграммы, иллюстрирующие смещение равновесия в область насыщения только хромитом при контаминации «исходного расплава» (Krivolutskaya, 2011) аргиллитовым компонентом. (А) – диаграмма An-Di-Fo-SiO₂ (Irvine and Sharpe, 1986) с фигуративной точкой «исходного расплава» (А), областью составов включений в хромите, трендом нормальной дифференциации (А-D-E), контаминации (А-С) и проекцией вектора контаминации на примыкающий к ребру Fo-SiO₂ фрагмент диаграммы Fo-SiO₂-MgCr₂O₄ (Keith, 1954) (А*-С*). (Б) – эффект K₂O на фрагменте диаграммы (SiO₂+nK₂O)-(SiO₂+MgO)-Cr₂O₃-T°C (по Keith, 1954; Roedder, 1959; Irvine, 1975) с нанесенной совокупностью трендов контаминации (розовая плоскость) и линией смещения, проходящей через область насыщения только хромитом (коричневая поверхность); заштрихованная поверхность – фрагмент поверхности SiO₂ в системе без K₂O (Roedder, 1959).

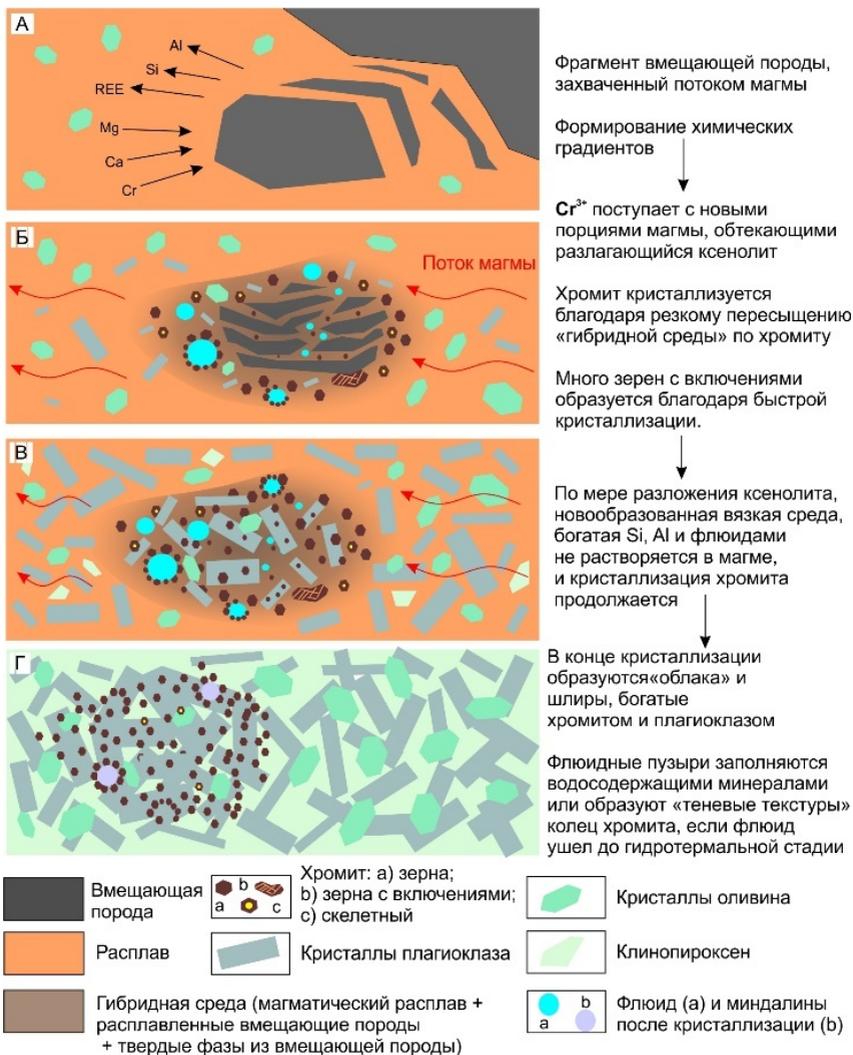


Рисунок 15. Схема образования формирования хромитовой минерализации МС-горизонта при реакции пелитового ксенолита с потоком пикробазальтовой магмы.

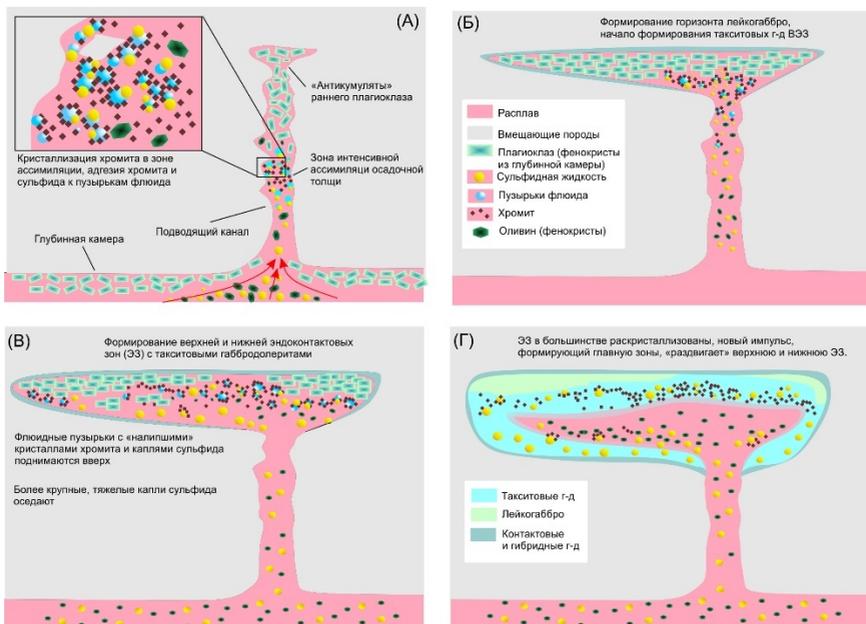


Рисунок 16. Схема образования МС-горизонта на стадии внедрения интрузии. (А) – формирование магматической колонны, (Б) – внедрение лейкогаббро, (В) – внедрение такситов ВЭЗ и НЭЗ, (Г) – внедрение ГЗ, разделяющее частично закристаллизованные ВЭЗ и НЭЗ.

Наконец, рассмотрена **проблема образования сульфидных ЭПГ-руд с высоким тенором** в ВЭЗ интрузии Норильск-1, учитывая также их распространение в интрузиях норильского типа. Основываясь на схожести сульфидной минерализации в МС-горизонте и в такситовых габбродолеритах НЭЗ а также на том, что валовое содержание S в МС-горизонте в несколько раз превышает уровень растворимости S в расплаве такого состава (по расчету в COMAGMAT 5.1), сделан вывод, что первой стадией формирования МС-горизонта был вынос капель сульфидной жидкости, несмешиваемой с силикатным расплавом и обогащенной ЭПГ, из глубинной камеры на раннемагматическом этапе (Рис. 16А-В). В эту стадию формировались руды с тенором, аналогичным таковому для вкрапленных руд НЭЗ. Однако, судя по соотношениям теноров Cu и Pd, для образования МС-оруденения при магматическом фракционировании ЭПГ требуется R-фактор (отношение масс уравновесившихся силикатной и сульфидной фракций) в ~20 раз выше (250000), чем для других руд интрузии (12500), с последующим «разбавлением» за счет пирротина или пирита (ассимиляция или пиритизация) (Рис. 17). Процесс роста тенора Pd при

десульфуризации (дегазация или разложение пирротина), также маловероятен. В первую очередь, потому что, даже предполагая, что весь Pd в этих процессах остается в сульфиде, диапазон его тенора при десульфуризации сульфидно-силикатной системы, соответствующей вкрапленным рудам, до концентраций S, характерных для МС-горизонта, будет существенно ниже, чем для большинства МС-руд (Рис. 17). Кроме этого, частный случай десульфуризации с замещением пирротина (наблюдаемый в изученных породах) ведет к росту теноров и Pd, и Cu, что не характерно для МС-горизонта.

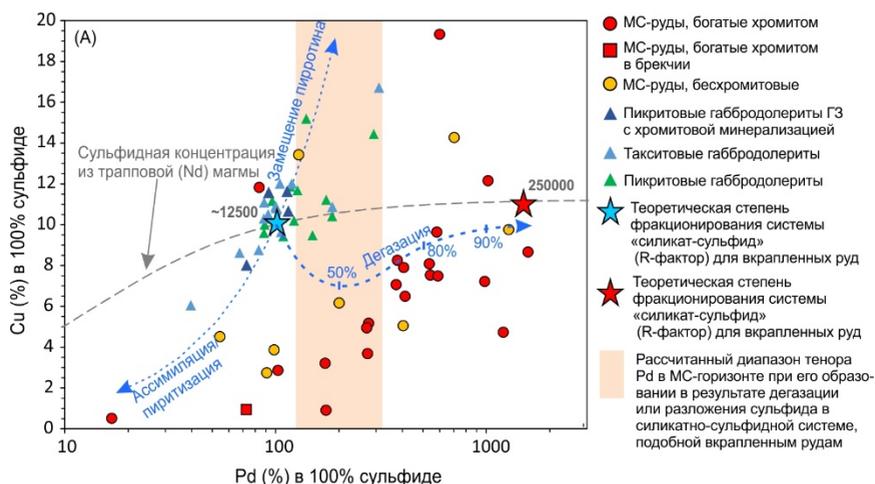


Рисунок 17. Соотношения теноров Cu и Pd в МС-рудах и вкрапленных рудах интрузии Норильск-1. Серый пунктирный тренд – извлечение ЭПГ в сульфидную фракцию (рассчитано для базальтов надеждынской и моронговской свит). Голубые пунктирные тренды – рассчитанное изменение теноров Pd и Cu при преобразовании раннемагматической сульфидно-силикатной системы, характерной для вкрапленных руд. Для расчетов использовались данные (Meurer et al., 1999; Yao and Mungall, 2021).

Другим, и, по мнению автора, более вероятным механизмом увеличения тенора ЭПГ, является флюидное концентрирование, детально описанное в (Boudreau, 2019) и заключающееся в формировании «хроматографической колонки» при миграции флюидов из области дегазации сульфидоносных кумулятов (область выноса ЭПГ) в область вторичного насыщения флюида по сульфиду. В области вторичного насыщения при этом формируются высокоплатиноносные сульфиды, поскольку коэффициент распределения «сульфидный расплав - флюид» для ЭПГ гораздо выше, чем для S и Cu (Boudreau, 1982), и, соответственно, ЭПГ концентрируются в самой

фронтальной части горизонта. Переотложение Cu также происходит, однако на более длительном интервале и не так резко, как ЭПГ. Мы предполагаем, что этот сценарий образования «малосульфидных» руд из «обычных вкрапленных» на данный момент наиболее непротиворечив для интрузии Норильск-1, потому что (1) распределение ЭПГ, Cu и S (резкий максимум по ЭПГ, сглаженный запаздывающий максимум по Cu и платообразное, с максимумом в верхней части минерализации, распределение S), наблюдаемое в разрезах ВЭЗ, хорошо согласуется с теоретическим (Boudreau, 1982; Meurer et al., 1999; Boudreau, 2004), (2) объясняет соотношения теноров Pd и Cu и (3) объясняет локализацию МС-горизонта в верхней части интрузии (Рис. 20).

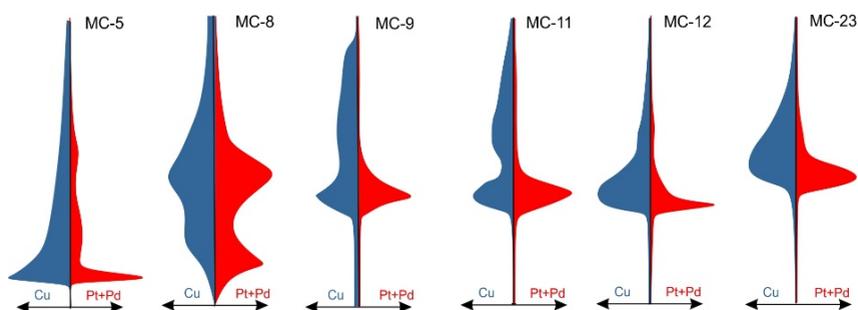


Рисунок 18. Сглаженные профили распределения Cu и Pt+Pd в ВЭЗ интрузии Норильск-1 в различных скважинах, по данным (Ерыкалов и др., 2006).

Наконец, чтобы объяснить корреляцию содержания ЭПГ и Cr₂O₃ (Рис. 10Б) и преобладание хромитового типа МС-горизонта над бесхромитовым, мы предполагаем, что совместное концентрирование хромита и сульфидной жидкости происходило благодаря интенсивному образованию пузырьков флюида при ассимиляции, на границу раздела которых с силикатным расплавом, как показано (Matveev and Ballhaus, 2002) и (Yao and Mungall, 2020) избирательно налипают и кристаллы хромшпинелида, и капельки сульфидов (Рис. 16А).

В Заключение, на основании сформулированных в качестве защищаемых положений в Главе 5 выводов, автор предлагает целостную схему формирования ВЭЗ и МС-горизонта в интрузии Норильск-1 в приближении внедрения интрузии из глубинной камеры дифференциации в несколько стадий (Zen'ko and Czamanske, 1994; Likhachev, 2004). Эта схема, графически отображенная на Рис. 16 (магматический этап) и 19 (поздне- и постмагматический этап), предполагает последовательное внедрение (1) лейкогаббрового габбро, за счет всплывающего в глубинной камере

плагноклаза, (2) зон ВЭЗ и НЭЗ в виде тела такситовых габбродолеритов с преимущественной локализацией хромит-сульфидной минерализации в ВЭЗ и (3) главной зоны - в среднюю, наименее закристаллизованную, часть предыдущего внедрения (пространственное разделение ВЭЗ и НЭЗ). На посткумулусной стадии происходит дегазация кумулятов, богатых ЭПГ-несущими сульфидами, в нижних частях интрузии, и концентрирование ЭПГ восходящим потоком флюидов в минерализованных горизонтах ВЭЗ с формированием МС-оруденения (Рис. 19).

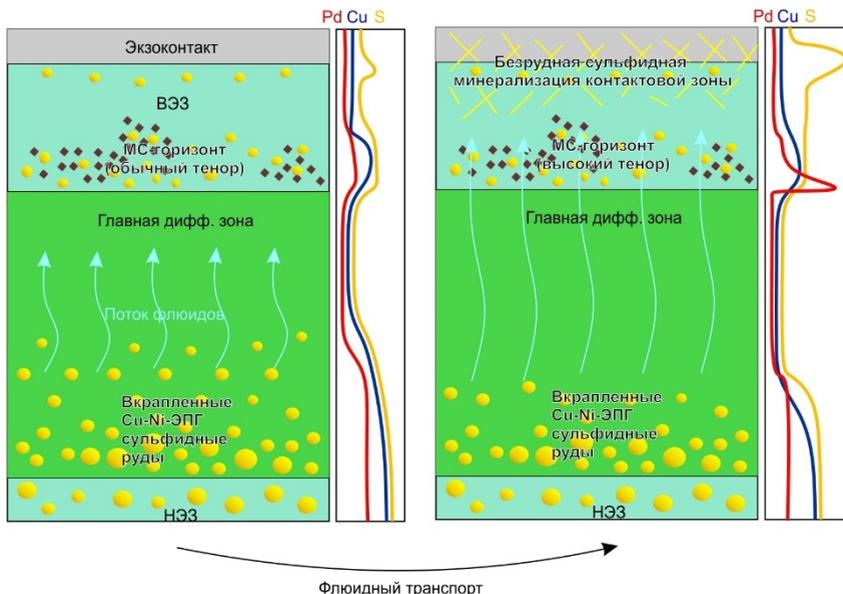


Рисунок 19. Схема поздне- и постмагматического этапа формирования МС-горизонта за счет флюидного транспорта. Слева – гипотетическое состояние после магматического концентрирования ЭПГ, справа – фактическое распределение сульфидной минерализации и концентраций ЭПГ (после флюидного переноса). Профили Pd, Cu и S – качественные, на основании данных автора и (Дистлер, 1994; Tolstykh et al., 2020).

В Заключение также отмечено, что данный механизм применим и для других интрузий норильского типа, объясняет локализацию МС-горизонтов и их непрямую связь с хромитовой минерализацией.

Список публикаций автора по теме диссертации

Статьи в рецензируемых журналах:

Chayka I., Izokh A., Kamenetsky V., Sokol E., Lobastov B., Kontonikas-Charos A., Zelenski M., Kuttyrev A., Sluzhenikin S., Zhitova L., Shvedov G., Shevko A., Gora M.

Wall rock assimilation as a trigger for chromite mineralization in layered intrusions: direct insights from the Noril'sk-1 intrusion, Siberian LIP // **Lithos** (предварительно принята, на доработке после рецензии)

Чайка И. Ф., Изох, А. Э., Калугин, В. М., Житова, Л. М., Шведов, Г. И., Гора, М. П., Шевко, А. Я. Оливин и хромшпинелиды месторождения Норильск-1: особенности состава и петрологические следствия // **Геосферные исследования**. – 2022. – №2. – С. 78–100.

Chayka I. F., Kamenetsky V. S., Zhitova L. M., Izokh A. E., Tolstykh N. D., Abersteiner A., Lobastov B. M., Yakich T. Y., Hybrid nature of the PGE-chromite-rich rocks of the Noril'sk-1 intrusion: genetic constraints from Cr-spinel and spinel-hosted multiphase inclusions // **Economic Geology**. – 2020 – V. 115. – Is. 6. – P. 1321–1342.

Chayka I. F., Zhitova L. M., Antsiferova T. N., Abersteiner A., Shevko A. Y. Izokh A. E., Tolstykh N. D., Gora M. P., Chubarov V. M., Kamenetsky V. S. In-situ crystallization and continuous modification of chromian spinel in the “sulfide-poor platinum-group metal ores” of the Noril'sk-1 intrusion (Northern Siberia) // **Minerals**. – 2020. – V. 10. – Is. 6. -- P. 498.

Tolstykh N. D., Zhitova L. M., Shapovalova M. O., **Chayka, I. F.** The evolution of the ore-forming system in the low sulfide horizon of the Noril'sk 1 intrusion, Russia // **Mineralogical Magazine**. – 2019. – V. 83. – Is. 5. – P. 673-694.

В сборниках и тезисах конференций

Чайка, И. Ф., Изох, А. Э., Каменецкий, В. С., Житова, Л. М., Служеникин, С. Ф., Марфин, А. Е., Шевко, А. Я., Гора, М. П., Петренко, Д. Б., Лобастов, Б. М., Калугин, В. М., Шведов, Г. И. Петрология и вопросы генезиса малосульфидных ЭПГ-руд интрузии Норильск-1, Норильск-Талнахский рудный район // *Металлогения древних и современных океанов - 2022*, т. 1, с. 151–154.

Chayka, I. F., Izokh, A. E., Kamenetsky, V. S., Zhitova, L. M., Sluzhenikin, S. F., Marfin, A. E., Shevko, A. Y., Gora, M. P., Petrenko, D. B., Lobastov, B. M., Kalugin, V. M., Shvedov, G. I. (2022). Sulphide-poor pge ores of the noril'sk-1 intrusion: mineralogy, geochemistry and genetic constraint // *Abstracts from the early-career researchers virtual International Platinum Symposium*, volume 131, pages 18–19, United Kingdom.

Чайка, И. Ф., Изох, А. Э., Калугин, В. М., Житова, Л. М., Шведов, Г. И., Гора, М. П., Шевко, А. Я. Физико-химические условия формирования вкрапленных и малосульфидных Cu-Ni-ЭПГ руд интрузии Норильск-1: по данным состава оливина и хромшпинели // *Уральская минералогическая школа – 2021*, т. 27, с. 134–137. ООО Универсальная Типография Альфа Принт Екатеринбург.

Чайка, И. Ф., Каменецкий, В. С., Томиленко, А. А., Изох, А. Э., Житова, Л. М., Шевко, А. Я., Гора, М. П. Проблема редокс-условий образования малосульфидных руд интрузии Норильск-1: подходы к решению и первые данные // *Современные проблемы геохимии - 2021: Материалы конференции молодых ученых (Иркутск, 14 - 17 сентября 2021 г.)*. с. 49–51. Иркутск, Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН.

Чайка, И. Ф., Изох, А. Э., Каменецкий, В. С., Житова, Л. М., Якич, Т. Ю. Хромшпинелиды платиноносных пород верхнего эндоконтакта интрузии Норильск-1: состав, силикатные включения и вопросы генезиса // *Металлогения древних и современных океанов - 2019. Четверть века достижений в изучении субмаринных месторождений. (Материалы двадцать пятой научной молодежной школы имени профессора В.В. Зайкова) Миасс. 2019, pages 84–87. ООО ФОРТ - ДИАЛОГ - Исеть г. Екатеринбург.*

Chayka I.F., Kamenetsky V.S., Izokh A.E., Zhitova L.M., Tolstykh N.D., Yakich T. Yu and Lobastov B.M. Nonmagmatic imprint in chromite-PGE-enriched rocks from the Upper zone of Noril'sk-1 intrusion: evidence from Cr-spinel-hosted inclusions. // *SEG2019: South American Metallogeny: Sierra to Craton. Society of Economic Geologists*

Чайка, И. Ф., Kamenetsky, V. S., Izokh, A. E., Zhitova, L. M., Tolstykh, N. D., Yakich, T. Y., and Lobastov, B. M. Petrological conundrums of chromite-pge-enriched rocks of norilsk-1 intrusion: evidence from Cr-spinel hosted inclusions // *Magmatism of the Earth and related strategic metal deposits - 2019, volume 36 of Proceedings of XXXVI International Conference, pages 66–67. GEOKHI RAS.*

Чайка, И. Ф. Хромшпинелиды платиноносных пород верхнего эндоконтакта интрузии Норильск-1: состав, силикатные включения и вопросы генезиса // *Материалы 57-й Международной научной студенческой конференции. 2019. с. 79–79. Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Новосибирск.*

Tolstykh, N. D., Zhitova, L. M., Shapovalova, M. O., and **Chayka, I. F.** Evolution of sulphide melt in the low-sulphide horizon of the noril'sk-1 deposit // *Large Igneous Provinces through earth history: mantle plumes, supercontinents, climate change, metallogeny and oil-gas, planetary analogues. Abstract volume of the 7 International Conference. 2019. Pages 139–140. издательство Томского ЦНТИ Томск.*