

На правах рукописи



Канимбуе Людмила Салете

**ОСОБЕННОСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ, СОСТАВА
РУД И БЛАГОРОДНОМЕТАЛЛЬНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ
ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ХАРАЕЛАХСКОГО ИНТРУЗИВА
НОРИЛЬСКОГО РУДНОГО РАЙОНА**

Специальность 1.6.10 – Геология, поиски и разведка
твердых полезных ископаемых, минерагения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Санкт-Петербург, 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

Научный руководитель: **Таловина Ирина Владимировна**
доктор геолого-минералогических наук,
доцент, заведующий кафедрой
исторической и динамической геологии
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный
университет императрицы Екатерины II»

Официальные оппоненты: **Спиридонов Эрнст Максович**
доктор геолого-минералогических наук,
профессор кафедры минералогии ФГБОУ
ВО «МГУ имени М.В. Ломоносова»
Калугин Валерий Михайлович
кандидат геолого-минералогических наук,
заведующий лабораторией минералогии и
геохимии никеля, кобальта и металлов
платиновой группы ФГБУ «ЦНИГРИ»

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

Защита диссертации состоится «24» декабря 2024 г. в 13:00 на
заседании Диссертационного совета 24.2.364.02 (Д 212.121.04) при
ФГБОУ «Российский государственный геологоразведочный
университет имени Серго Орджоникидзе» (МГРИ) по адресу: 117997,
г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, дом 23, аудитория 473.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского
государственного геологоразведочного университета имени Серго
Орджоникидзе и на сайте <http://mgri.ru/>.

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
канд. геол.-минерал. наук



А.А. Иванов

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Норильский рудный район является основой минерально-сырьевой базы меди, никеля и платиновых металлов России, занимая лидирующие позиции на мировом рынке. Рудный потенциал определяется месторождениями сульфидных платиноидно-медно-никелевых руд мирового масштаба, которые генетически связаны с дифференцированными базит-гипербазитовыми интрузиями.

Наиболее важными типами руд, разрабатываемыми в настоящее время, являются богатые массивные и «медистые» руды, локализующиеся в нижних экзоконтактовой и эндоконтактовой зонах интрузивов. В условиях истощения запасов богатых руд изучение вкрапленного оруденения в пикритовых и такситовых габбро-долеритах приобретает особую актуальность. Стоит отметить, что вкрапленные руды содержат свыше 70 % запасов благородных металлов норильских месторождений (Годовой отчет ПАО «ГМК «Норильский никель», 2023), однако, в настоящее время отработка данного типа руд крайне ограничена. В связи с этим весьма перспективной представляется малоизученная центральная часть Хараелахского интрузива, характеризующаяся наибольшей мощностью горизонта вкрапленных руд.

За длительный период эксплуатации норильских месторождений в результате селективной разработки накопился большой объем отходов производства, состоящих в первую очередь из неотработанных вкрапленных руд, а также из хвостов обогащения богатых руд, «лежалых» пирротиновых концентратов. Сформировавшиеся месторождения техногенного сырья содержат запасы и прогнозные ресурсы ЭПГ в несколько сотен тон, что позволяет рассматривать их в качестве дополнительного источника цветных и благородных металлов (Гурская и др., 2016; Государственный доклад..., 2022). Существует необходимость в усовершенствовании технологий переработки руд для большего вовлечения вкрапленных руд в производство.

Несмотря на высокую степень изученности Норильского района, механизмы концентрации и распределения цветных и благородных металлов остаются предметами дискуссий, имея не только фундаментальное, но и прикладное значение. Изучение Хараелахского интрузива и приуроченного к нему Октябрьского месторождения

играет важную роль в решении генетических проблем ЭПГ-Cu-Ni руд в связи с тем, что на их примере были разработаны основные модели формирования норильских месторождений (Годлевский, 1960; Золотухин, 1971; Лихачев, 1982; Дистлер и др., 1988; Радько, 1991).

Анализ пород и руд Хараелахского интрузива с применением комплекса современных аналитических методов позволил уточнить устоявшиеся модели рудообразования, а также выявить закономерности концентрации цветных и благородных металлов во вкрапленных и массивных рудах.

Степень разработанности темы исследования

Хараелахский интрузив активно изучается с момента открытия Октябрьского месторождения в начале 1960-х годов. С тех пор, многочисленные работы были посвящены вопросам геологического строения, морфологии интрузива и связанного с ним медно-никелевого оруденения (Годлевский, 1960; Додин и др., 1971; Золотухин и др., 1975; Zenko, Czamanske, 1994; Stekhin, 1994; Туровцев, 2002; Лихачев, 1998, 2006; Sluzhenikin et al., 2014; Krivolutskaaya et al., 2019, 2021; Никулин, 2020) и многих других.

Детальные исследования минералов платиновых металлов, золота и серебра в рудах Талнахского рудного узла и, в частности, Хараелахского интрузива в разное время были выполнены А.Д. Генкиным, М.Н. Годлевским, О.Е. Звягинцевым, Г.Б. Роговером, Э.А. Кулаговым, М.Ф. Смирновым, В.В. Дистлером, О.А. Дюжиковым, А.А. Филимоновой, В.А. Ковалкером, Т.Л. Евстигнеевой, И.А. Наторхиным, О.Е. Юшко-Захаровой, Е.Н. Сухановой, Л.В. Разиным, В.Д. Бегизовым, Э.М. Спиридоновым, С.Ф. Служеникиным, А. Вымазаловой и другими исследователями.

Стоит отметить, что ранее изучение благороднометалльной минерализации проводилось преимущественно в массивных сульфидных и малосульфидных рудах, как в наиболее богатых типах, и единичные работы посвящены исследованию минералов благородных металлов во вкрапленных рудах (Генкин, 1968; Distler et al., 1999; Komarova et al., 2002; Tolstykh et al., 2021), что обусловлено редкой встречаемостью этих минералов в данных рудах и мелкими размерами их выделений.

Объектом исследования является Хараелахский дифференцированный интрузив с уникальным сульфидным платиноидно-медно-никелевым Октябрьским месторождением.

Предмет исследования – геологическое строение и закономерности изменения состава пород и руд в центральной части Хараелахского интрузива.

Цель работы – установить особенности геологического строения и закономерности накопления благороднометалльной минерализации во вкрапленных и массивных рудах центральной части Хараелахского интрузива.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения нижеуказанных **задач**:

1. Изучить геологические разрезы центральной части Хараелахского интрузива.

2. Определить петрографические, минералогические и геохимические особенности пород и руд центральной части Хараелахского интрузива.

3. Выявить минеральные формы нахождения благородных металлов в сульфидных рудах.

4. Выявить закономерности, определяющие характер распределения благороднометалльной минерализации в сульфидных рудах.

5. Определить физико-химические условия формирования сульфидного оруденения и благороднометалльной минерализации центральной части Хараелахского интрузива.

Научная новизна работы:

1. Выделены Северная и Южная интрузивные ветви центральной части Хараелахского интрузива, отличающиеся последовательностью залегания в вертикальном разрезе лейкогаббро и верхних такситовых габбро-долеритов, а также составом сульфидной вкрапленной минерализации.

2. Выявлены особенности минерального, петрохимического и микроэлементного состава пород центральной и периферических частей Хараелахского интрузива, позволяющие предполагать его многоэтапное становление.

3. Установлена обратная зависимость температуры кристаллизации минералов благородных металлов от фугитивности серы в рудообразующей системе во вкрапленных рудах и обратная зависимость от степени фракционирования в массивных рудах пределах центральной части Хараелахского интрузива.

Теоретическая и практическая значимость работы:

Детально изучен состав вкрапленных руд в пикритовых и такситовых габбро-долеритах центральной части Хараелахского интрузива, являющихся весьма перспективным источником металлов платиновой группы. Проведен сравнительный анализ сульфидной и благороднометалльной минерализации в центральной части Хараелахского интрузива. Результаты диссертационного исследования, а именно выявленные различия в минеральном составе сульфидных руд, в распределении, формах нахождения и размерах минералов благородных металлов, играют важнейшую роль для усовершенствования гравитационно-флотационных схем обогащения вкрапленных медно-никелевых руд месторождений Норильского района и других регионов.

Методология и методы исследования

Диссертационная работа основана на результатах изучения пород и сульфидных руд центральной части Хараелахского интрузива. В основу работы положен фактический и аналитический материал из коллекции ведущего научного сотрудника ГЕОХИ РАН, д.г.-м.н. Криволицкой Н.А. Также в диссертации использован материал, предоставленный сотрудниками ООО «Норникель Технические Сервисы».

В ходе исследования был описан керновый материал 7 скважин, проанализировано 150 проб, изготовлено и изучено 220 шлифов и 60 аншлифов горных пород и руд. Выполнено более 1800 локальных измерений состава минералов методами сканирующей электронной микроскопии (Институт Карпинского, ГЕОХИ РАН) и более 790 измерений рентгеноспектральным микроанализом (ГЕОХИ РАН, ИГМ СО РАН). Анализ валового состава проб проведен в Центральной лаборатории Всероссийского научно-исследовательского геологического института им. А.П. Карпинского. Концентрации петрогенных элементов в образцах определены методом рентгеноструктурного фазового анализа. Содержания редких, редкоземельных элементов и благородных металлов измерены методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. Определения массовых долей Ni, Cu, Co выполнены методом атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. Обработка и визуализация аналитических данных проводилась с использованием программного обеспечения: Excel, Statistica 10,

WinPyrox, Corel DRAW 2020.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Центральная часть Хараелахского рудоносного интрузива имеет сложное строение, сформировавшееся в результате многоимпульсного внедрения магматического расплава.

2. Массивные талнахитовые руды залежи С-4 центральной части Хараелахского интрузива сформировались при высокой степени фракционирования и имеют повышенные содержания легкоплавких ЭПГ, золота и серебра по сравнению с массивными пентландит-халькопирит-пирротиновыми рудами залежи С-3, обогащенными тугоплавкими ЭПГ.

3. Вкрапленные пентландит-халькопирит-пирротиновые и кубанит-халькопирит-троилитовые руды центральной части Хараелахского интрузива образовались на более ранних стадиях по отношению к массивным пентландит-халькопирит-пирротиновым рудам залежи С-3 и талнахитовым рудам залежи С-4, внедрившихся на заключительном этапе эволюции интрузива.

Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 1.6.10. Геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения по пункту 1 «Условия образования месторождений твердых полезных ископаемых» по следующим подпунктам:

- геодинамические, геологические условия образования, эволюция процессов рудообразования в истории Земли, эпохи рудообразования, геохронология месторождений и длительность рудообразующих процессов; проблема образования крупных и уникальных месторождений; связь с магматизмом, метаморфизмом и осадконакоплением;

- рудообразующие системы и их генетические модели: магматические, пегматитовые, карбонатитовые, скарновые, грейзеновые, гидротермальные (порфировые, колчеданные, эпитеермальные и др.);

- структуры и текстуры руд, их происхождение и генетическое значение;

- этапы и стадии рудообразования;

- происхождение металлоносных магм, источники металлов, происхождение и состав минералообразующих флюидов, условия и формы переноса металлов флюидами;

- условия рудообразования по данным флюидных включений, минеральной и изотопной термометрии.

Степень достоверности результатов исследования обусловлена представительностью каменного материала и проведением аналитических работ в аккредитованных лабораториях современными методами. Новые сведения, полученные в ходе исследования, согласуются с результатами предыдущих работ и дополняют их.

Апробация результатов. Основные положения и результаты работы докладывались на следующих конференциях и форумах: XI Российская молодёжная научно-практическая Школа «Новое в познании процессов рудообразования» (Москва, 2022); Международная научно-практическая конференция «Менделеевские чтения. Химические процессы в недрах Земли» (Санкт-Петербург, 2023); XVI Международная научно-практическая конференция «Новые идеи в науках о Земле» (Москва, 2023); XIX Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (Санкт-Петербург, 2023); VIII Всероссийская конференция с международным участием «Ультрамафит-мафитовые комплексы: геология, строение, рудный потенциал» (Новосибирск, 2023); Всероссийская конференция «Минералообразующие системы месторождений высокотехнологических минералов: достижения и перспективы исследований» (Москва, 2023); XIII Международная научно-практическая конференция «Научно-методические основы прогноза, поиска, оценки месторождений алмазов, благородных и цветных металлов» (Москва, 2024).

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования, анализе научной литературы по изучаемой проблематике, документации кернового материала. Автор принимал участие в камеральной работе с образцами, пробоподготовке, выполнении лабораторных исследований. Весь объем петрографических и минералогических исследований методом сканирующей электронной микроскопии, а также обработка и визуализация аналитических данных по составу изученных пород и руд выполнены автором лично. Интерпретация, обобщении результатов, формулировка выводов проводились соискателем при участии научного руководителя.

Публикации. Результаты диссертационного исследования

освещены в 12 печатных работах, в том числе в 2 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 6 глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, включающего 126 наименований, 3 приложений. Диссертация изложена на 130 страницах машинописного текста, содержит 33 рисунков и 8 таблиц.

Благодарности

Автор выражает благодарность своему научному руководителю д.г.-м.н. И.В. Таловиной за ценные консультации и поддержку. Автор особенно благодарен д.г.-м.н. Криволицкой Н.А. (ГЕОХИ РАН) за предоставленный материал, всестороннюю поддержку и помощь в подготовке публикаций по теме диссертации. Искренняя признательность выражается сотрудникам ООО «Норникель Технические Сервисы» Пилюгину А.Г. и Кетрову А.А. за организационную помощь, предоставление материалов, а также за ценные советы. Неоценимую помощь в подготовке минераграфической части диссертации оказали сотрудники отдела минералогических методов анализа Института Карпинского Ляхницкая В.Д., Бильская И.В., Кобзева Ю.В. и доцент кафедры геологии и разведки месторождений полезных ископаемых Горного университета Воронцова Н.И., за что им выражается огромная благодарность. За детальное проведение электронно-зондовых микроанализов автор признателен аналитикам Грузовой Е.Л. (Институт Карпинского), Демидовой С.И., Коноковой Н.Н. (ГЕОХИ РАН), Королюк В.Н. (ИГМ СО РАН). Отдельная благодарность выражается Гонгальскому Б.И., Бровченко В.Д. (ИГЕМ РАН), Чайка И.Ф. (ИЭМ РАН) за ценные консультации и всестороннюю поддержку.

Работа выполнена при финансовой поддержке Национального института по распределению стипендий Республики Ангола в рамках проекта «Почетный грант» 2022 года.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен анализ истории и современного состояния изученности Норильского рудного района.

Во второй главе дана краткая характеристика геологической позиции Норильского района и описано геологическое строение Хараелахского рудоносного интрузива.

В третьей главе приведены сведения о фактическом материале и аналитических методах, использованных в исследовании.

В четвертой главе представлена петрографическая, минералогическая и геохимическая характеристика изученных пород центральной части Хараелахского интрузива. Обосновано первое защищаемое положение.

В пятой главе приведена структурно-вещественная характеристика сульфидных вкрапленных и массивных руд центральной части Хараелахского интрузива.

В шестой главе выявлены особенности состава сульфидных руд, позволившие обосновать второе защищаемое положение. Выполнен статистический анализ состава и форм нахождения минералов благородных металлов в рудах, а также оценены физико-химические параметры формирования оруденения. Сформулировано третье защищаемое положение. На основе полученных данных предложена модель формирования центральной части Хараелахского интрузива.

Заключение отражает основные выводы, полученные в ходе исследования в соответствии с целью и решаемыми задачами.

Краткая характеристика объекта исследования

Норильский район занимает положение на северо-западной окраине Сибирской платформы в зоне сочленения последней со структурами Енисей-Хатангского рифтогенного прогиба и Западно-Сибирской плиты (Струнин, 1994). Главными магмо- и рудоконтролирующими структурами являются Норильско-Хараелахский и Имангдинский глубинные разломы, а также Северо-Хараелахский разлом, совпадающий с южной границей Енисейско-Хатангского прогиба (Додин, 2001).

Хараелахский дифференцированный рудоносный интрузив

примыкает к западному борту Норильско-Хараелахского разлома и имеет северо-западное падение (рисунок 1). Интрузив представляет собой пластинообразное тело площадью около 30 км² с линзовидным строением разреза фронтальной части и резким воздыманием подошвы в бортах (Золотухин и др., 1975, Дистлер и др., 1988; Туровцев, 2002).

Вмещающими породами являются аргиллитовые отложения разведчинской и курейской свит (D₂rz и D₁Kr), во фронтальных частях также галогенно-карбонатно-мергелевые отложения мантуровской свиты (D₂mt). В направлении погружения интрузива на северо-восток на отдельных участках переходит в отложения зубовской свиты нижнего девона (D₁zb) (Дюжиков, 2015).

Октябрьское месторождение Хараелахского интрузива имеет наиболее мощные рудные залежи и самое высокое содержание сульфидов, которое достигает 30% (Лихачев, 1996; Спиридонов, 2022). В пределах Октябрьского месторождения выделяют более 15 интрузивных тел, различных по размеру и составу сульфидной минерализации (Золотухин, 1975; Dyuzhikov et al., 1992).

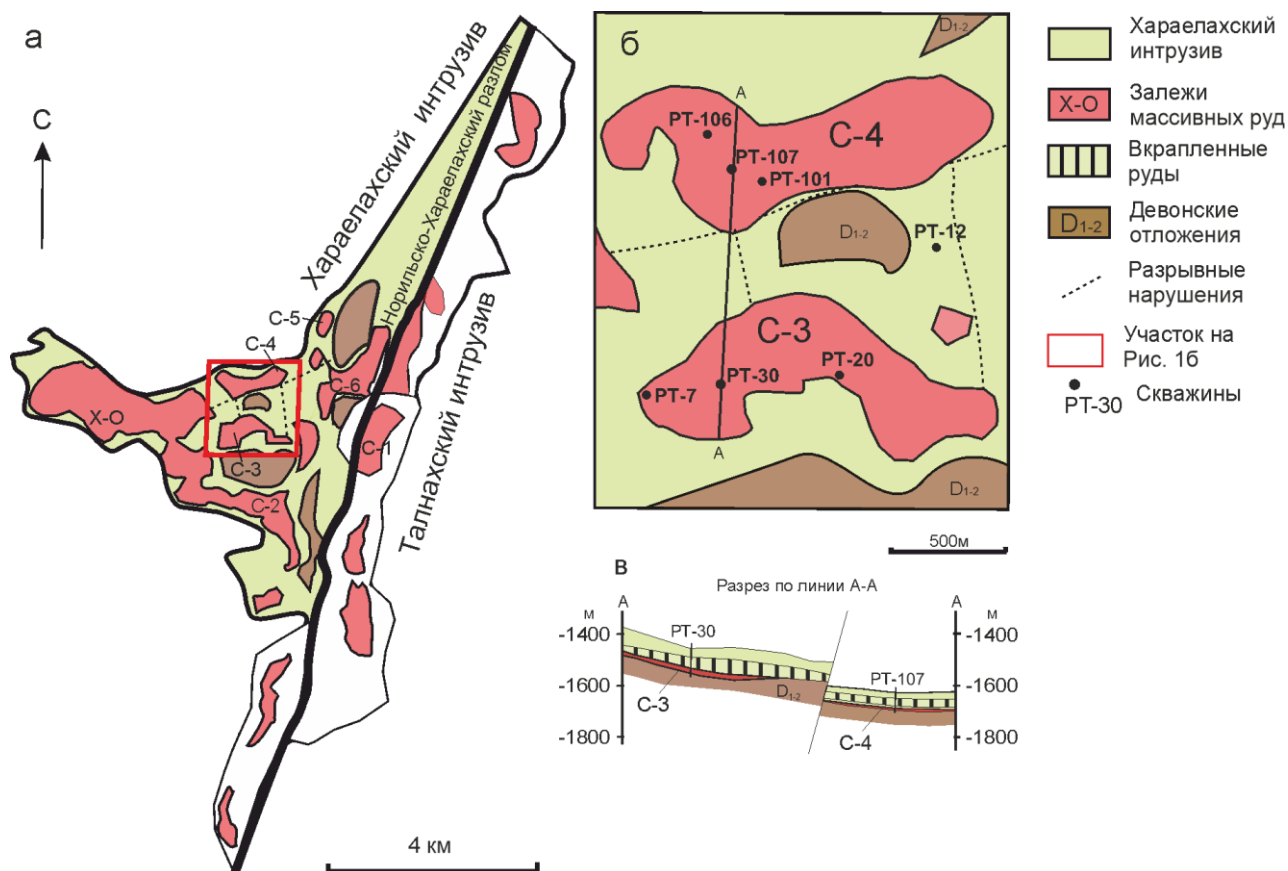


Рисунок 1 – Проекция Талнахского рудного узла (а); б – участок исследований в центральной части Хараелахского интрузива (б); в – схематический разрез через залежи С-3 и С-4 по (Кравцов и др., 1987).

В данной работе изучено строение центральной части Хараелахского интрузива, к которой приурочены залежи массивных руд Третья Северная (С-3) и Четвертая Северная (С-4) (рисунок 1 б), находящиеся в пределах рудника «Таймырский» (Лихачев, 1996; Крылов и др., 2023). На сегодняшний день этот участок Октябрьского месторождение не отработан.

ОБОСНОВАНИЕ ЗАЩИЩАЕМЫХ ПОЛОЖЕНИЙ

1. Центральная часть Хараелахского рудоносного интрузива имеет сложное строение, сформировавшееся в результате многоимпульсного внедрения магматического расплава.

В разрезе центральной части Хараелахского интрузива присутствуют следующие горизонты: верхние контактовых габбро-долериты, верхние такситовые габбро-долериты, лейкократовые габбро; габбро-долериты от безоливиновых до оливиновых, а также пикритовые, такситовые и нижние контактовые габбро-долериты. По разной последовательности залегания слоев были выделены 2 интрузивные ветви: Северная и Южная (рисунок 2).

Так, в Южной ветви верхняя часть разреза содержит лейкогаббро, в то время как в Северной ветви вместо них наблюдаются верхние такситовые габбро-долериты. Расположение такситовых габбро-долеритов в верхней части разреза свидетельствует против кристаллизационной дифференциации, так как богатые оливином породы присутствуют как в верхней, так и в нижней части интрузива. Также в ветвях наблюдаются разнонаправленные тренды эволюции сульфидного расплава в горизонте пикритовых габбро-долеритов (Tolstykh et al., 2024).

По скважине РТ-12 Хараелахский интрузив демонстрирует сложное строение, проявляющееся в нарушении порядка залегания дифференциатов. В верхней части разреза наблюдается последовательность от лейкогаббро до контактовых габбро-долеритов, типичная для интрузивов норильского типа. Нижняя часть скважины представляет собой сокращенную последовательность, в которой отсутствуют лейкогаббро и безоливиновые габбро-долериты. Такое строение интрузива может быть результатом двухфазного внедрения магматического расплава, при котором нижняя часть разреза сформировалась более поздней порцией расплава после полной

дифференциации верхней части (Золотухин и др., 1975; Малич и др., 2017).

Изучены породообразующие, второстепенные и акцессорные минералы выделенных ветвей центральной части Хараелахского интрузива. Оливины, пироксены и плагиоклазы Северной и Южной интрузивных ветвей имеют широкую вариацию составов, однако отсутствуют четкие отличия между ветвями. В то же время, породообразующие минералы центральной части Хараелахского интрузива демонстрируют сходство с минералами краевых частей.

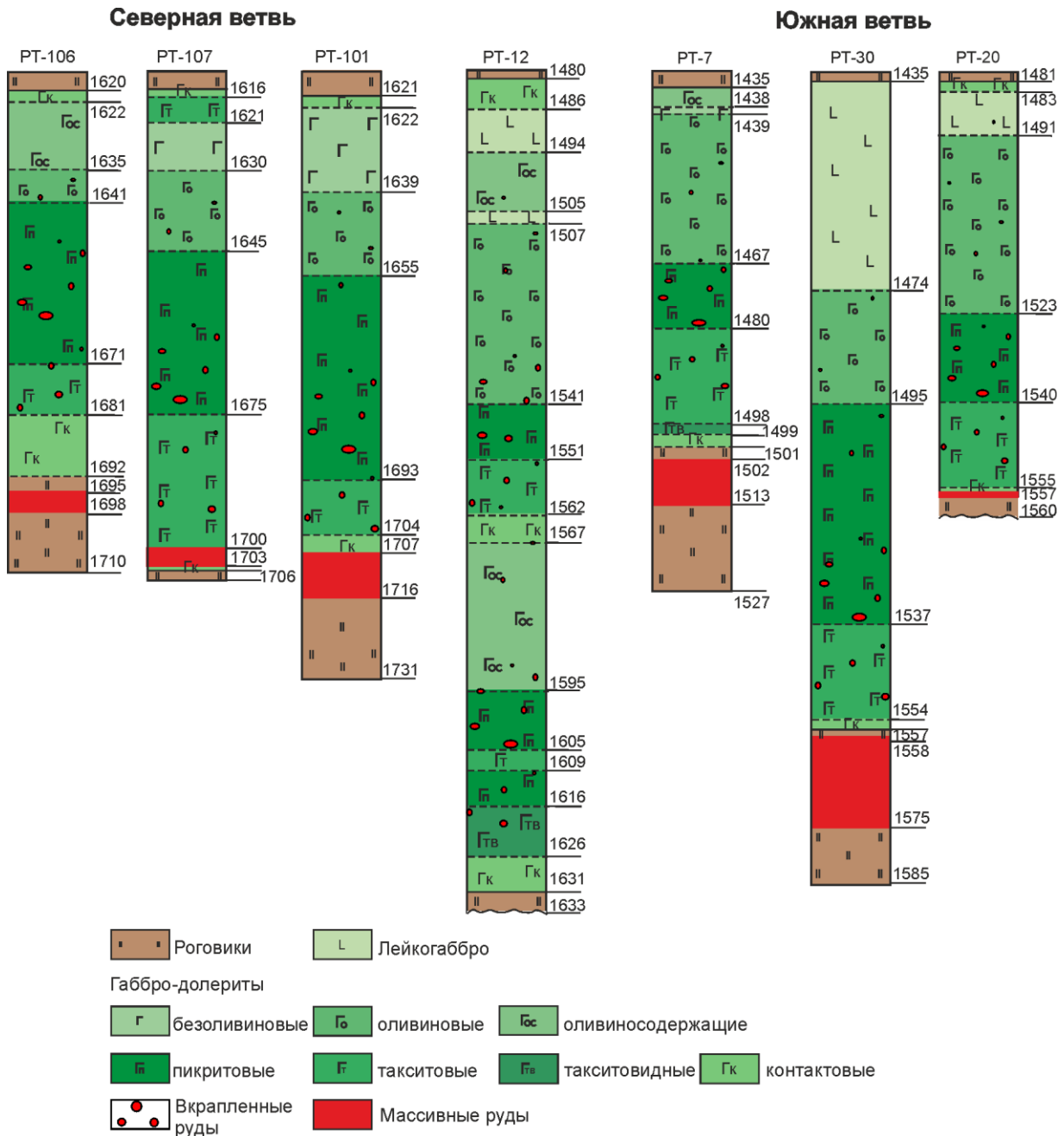


Рисунок 2 – Строение центральной части Хараелахского интрузива по скважинам, вскрывшим Северную и Южную ветвь. Расположение скважин показано на рисунке 1.

Сравнение составов оливинов разных частей Хараелахского интрузива показало, что изученные оливины пикритовых и такситовых габбро-долеритов центральной части значительно обогащены NiO, в отличие от пород краевых частей (рисунок 3). Вместе тем, составы оливинов западной и южной части Хараелахского интрузива формируют поля, существенно отличающиеся друг от друга, а фигуративные точки оливинов центральной части накладываются на них. Данные особенности также могут свидетельствовать в пользу формирования пород центральной, западной и южной части Хараелахского интрузива из разных порций магматического расплава.

Пироксены изученных пород имеют большой разброс по составу вне зависимости от типа пород (рисунок 4). Согласно классификации (Marimoto, 1989), они относятся к Ca-Mg-Fe типу и соответствуют клинопироксену-авгиту состава $Wo_{39-44}En_{41-52}Fs_{9-19}$ с магнезиальностью Mg# от 61 до 85 мол.%, а также ортопироксену-энстатиту состава $Wo_{1-4}En_{66-81}Fs_{16-31}$ с Mg# = 66–79 мол.%. Состав пироксенов центральной части Хараелахского интрузива также сопоставим с краевыми частями (рисунок 4).

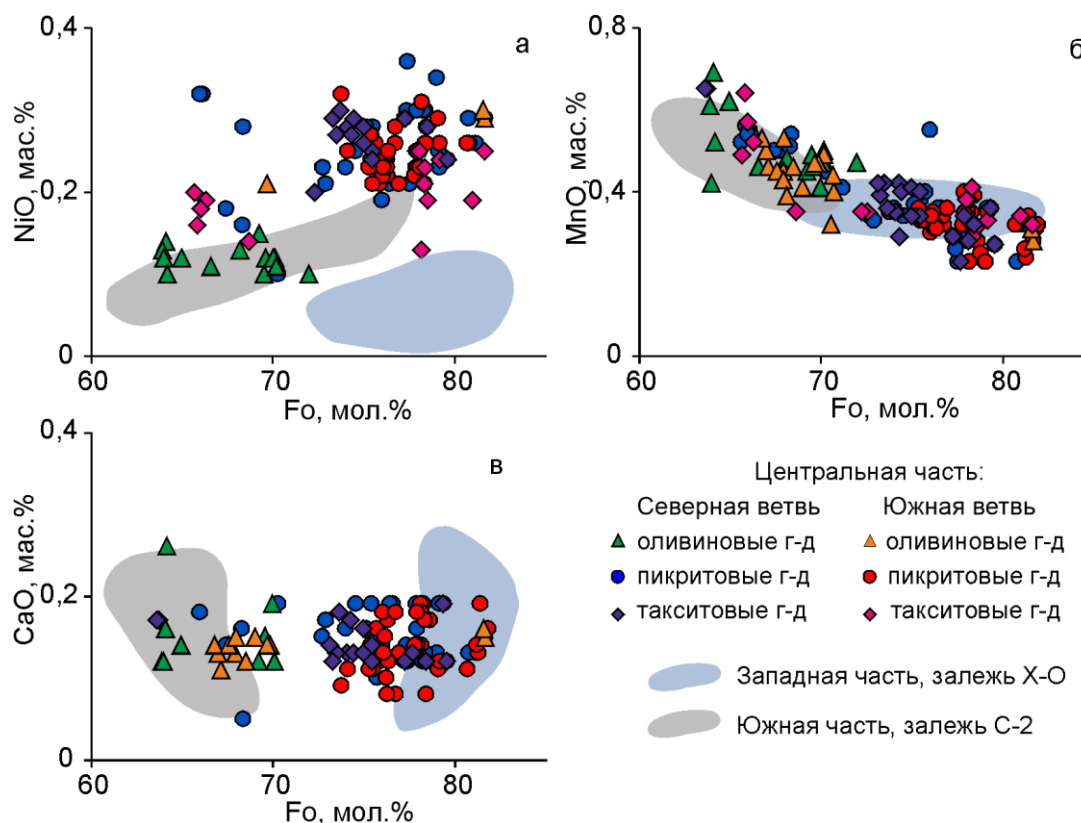
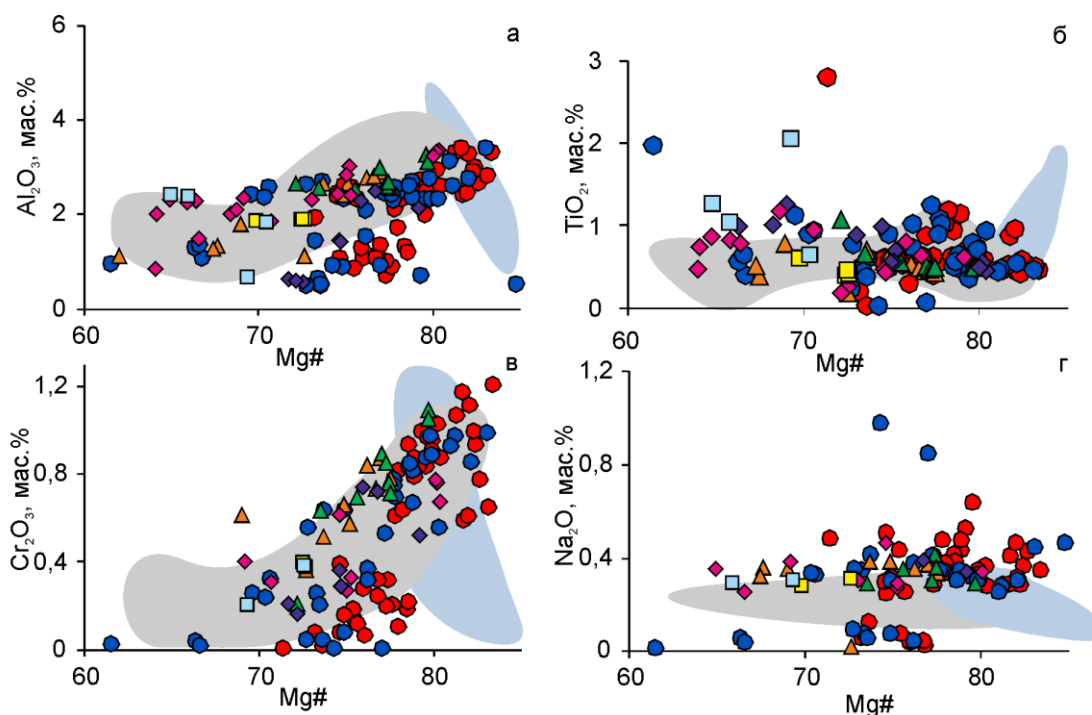


Рисунок 3 – Диаграммы состава оливина изученных пород центральной части Хараелахского интрузива. Поля для оливинов из пород западной части Хараелахского интрузива по (Рябов и др., 2001), из южной части по (Krivolutskaya, 2016).



Центральная часть:

Северная ветвь

- верхние такситовые г-д ▲ оливиновые г-д ● пикритовые г-д ◆ такситовые г-д ● Западная часть, залежь X-O
- Южная ветвь
- лейкогаббро ▲ оливиновые г-д ● пикритовые г-д ◆ такситовые г-д ● Южная часть, залежь C-2

Рисунок 4 – Диаграммы состава пироксенов изученных пород центральной части Хараелахского интрузива. Поля для пироксенов из пород западной части Хараелахского интрузива по (Рябов и др., 2001), из южной части по (Krivolutskaya, 2016).

Состав плагиоклаза охватывает весь изоморфный ряд от анортита до альбита, что характерно для интрузивов норильского типа, и также аналогичен по всей площади интрузива.

Сравнение химического состава интрузивных пород показало значительное разнообразие в содержании петрогенных оксидов при их резких колебаниях в разрезе интрузива. На бинарных диаграммах поля фигуративных точек разных пород накладываются друг на друга (рисунок 5). Подобные скачкообразные изменения химического состава пород и отсутствие их постепенной эволюции по разрезу центральной части Хараелахского интрузива могут указывать на низкую степень кристаллизационно-гравитационной дифференциации интрузива в современной камере.

Анализ спектров распределения редких элементов в породах Хараелахского интрузива, нормированных на примитивную мантию, показывает схожую топологию графиков (рисунок 6).

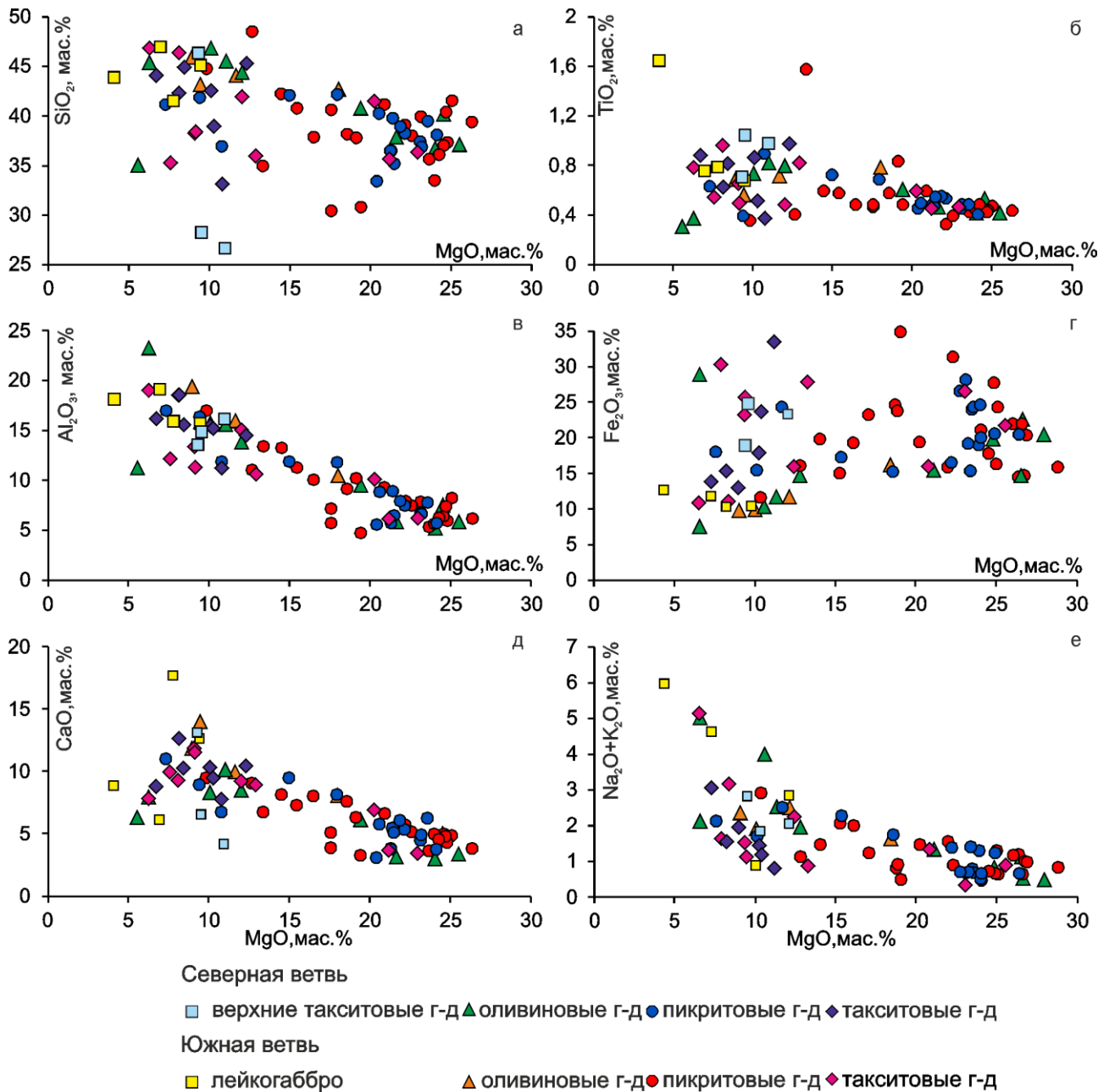


Рисунок 5 – Диаграммы состава изученных пород центральной части Хараелахского интрузива.

Породы характеризуются высокими содержаниями некогерентных элементов, положительными аномалиями U, Pb, Sr, что свидетельствует о контаминации исходных магматических расплавов коровым материалом. Также отмечены отрицательные аномалии Th, Nb, Ta, типичные для интрузивных пород Сибирской трапповой провинции. Отличительной особенностью пород центральной части Хараелахского интрузива по сравнению с другими частями является отрицательная аномалия Zr, указывающая на особенности родоначальных магм.

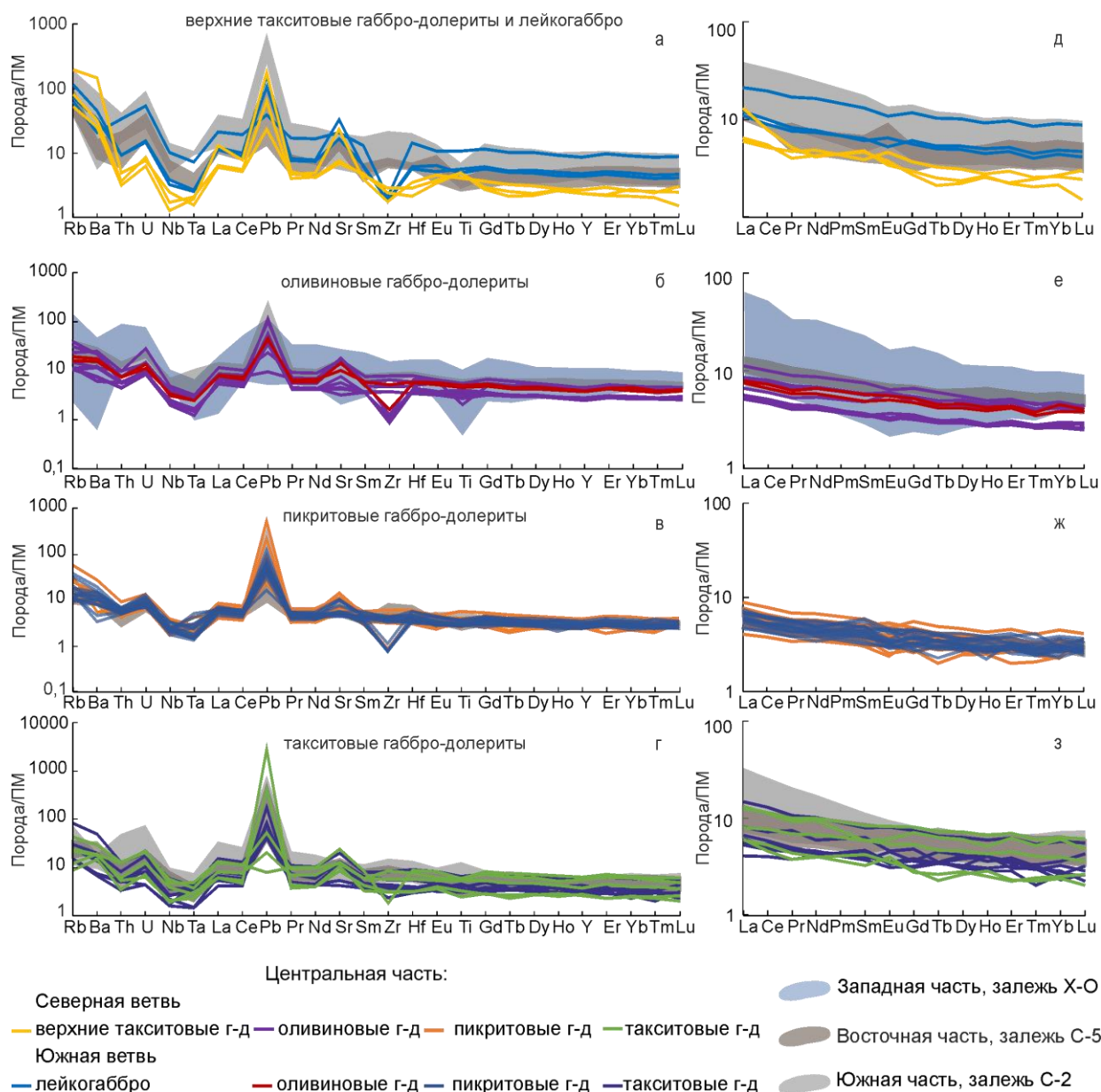


Рисунок 6 – Нормированные на примитивную мантию (Lyubetskaya, Korenaga, 2007) мультиэлементные спайдер-диаграммы (а-г) и спектры распределения редкоземельных элементов (д-з) для изученных пород центральной части Хараелахского интрузива: Поля пород западной, восточной и южной частей Хараелахского интрузива по (Krivolutskaya et al., 2021).

Графики распределения редкоземельных элементов в изученных породах имеют пологий отрицательный наклон. Дифференциаты характеризуются незначительным обогащением легкими РЗЭ и слабым фракционированием тяжелых РЗЭ.

Таким образом, проведенный анализ пород Северной и Южной ветвей центральной части Хараелахского интрузива выявил их идентичность как по составу породообразующих и второстепенных минералов, так и по геохимическим свойствам пород. Однако, как будет показано далее, ветви существенно отличаются по составу

сульфидной и благороднометалльной минерализации.

С одной стороны, породы центральной части Хараелахского интрузива демонстрируют сходство с его краевыми частями по минеральному и химическому составу. Вместе тем, наблюдаются значительные различия составов пород и минералов западной и южной части интрузива. Кроме того, центральная часть Хараелахского интрузива имеет сложное строение, проявляющееся в нарушении порядка залегания дифференциатов, что также отмечено на других участках интрузива. Перечисленные особенности свидетельствуют о формировании Хараелахского интрузива из различных порций магматического расплава.

2. Массивные талнахитовые руды залежи С-4 центральной части Хараелахского интрузива сформировались при высокой степени фракционирования и имеют повышенные содержания легкоплавких ЭПГ, золота и серебра по сравнению с массивными пентландит-халькопирит-пирротиновыми рудами залежи С-3, обогащенными тугоплавкими ЭПГ.

В пределах центральной части Хараелахского интрузива отмечают вкрапленные руды в пикритовых и такситовых габбро-долеритах, а также массивные руды, формирующие сплошные сульфидные залежи. По результатам исследований автором были выделены вкрапленные кубанит-халькопирит-троилитовые руды и массивные талнахитовые руды залежи С-4, приуроченные к Северной интрузивной ветви, а также вкрапленные пентландит-халькопирит-пирротиновые руды и массивные пентландит-халькопирит-пирротиновые руды залежи С-3, расположенные в нижних горизонтах Южной интрузивной ветви.

Выявленные различия состава руд обусловлены разностью фугитивности серы в момент их образования. Как известно (Дюжиков и др., 1988), в условиях низкой фугитивности серы образуются фазы с высоким содержанием железа: троилит, талнахит, мойхукит, пунторанит, железистый пентландит. Последовательное возрастание фугитивности серы обеспечивает формирование ассоциаций троилита с кубанитом, халькопиритом, гексагональным пирротинном. При более высоких значениях активности серы образуются ассоциации моноклинного пирротина, халькопирита, никелистого пентландита.

Одной из характерных особенностей вкрапленных руд является

их весьма высокая обогащенность платиноидами, отнесенная к 100% сульфидного вещества (рисунок 7 а). Так, в расчете на сульфидную составляющую эти руды в 4-5 раз богаче платиновыми металлами, чем большинство минеральных разновидностей массивных руд. Следовательно, сульфидные расплавы, из которых сформировались вкрапленное оруденение и оруденение массивных залежей, отличались начальной концентрацией платиновых металлов (Служеникин, Дистлер, 1998; Канимбуе и др., 2022).

Ведущую роль в распределении благородных металлов в массивных рудах играет процесс фракционной кристаллизации сульфидного расплава (Генкин и др., 1981). Массивные пентландит-халькопирит-пирротиновые руды залежи С-3 значительно менее фракционированы по сравнению с массивными талнахитовыми рудами залежи С-4 (рисунок 8). Это обуславливает существенно разные концентрации благородных металлов в массивных рудах залежей С-3 и С-4 (рисунок 7 б). Так, талнахитовые руды залежи С-4 обеднены тугоплавкими ЭПГ, но обогащены платиной, палладием, золотом и серебром. В пентландит-халькопирит-пирротиновых рудах залежи С-3 наблюдается обратная картина: содержания Rh, Ru, Ir и Os на порядок выше по сравнению с другими типами руд.

Таким образом, проведенные исследования состава вкрапленных и массивных руд Хараелахского интрузива подчеркивают зависимость концентрации благородных металлов от минерального состава руд и от особенностей их эволюции, главным образом от степени фракционирования.

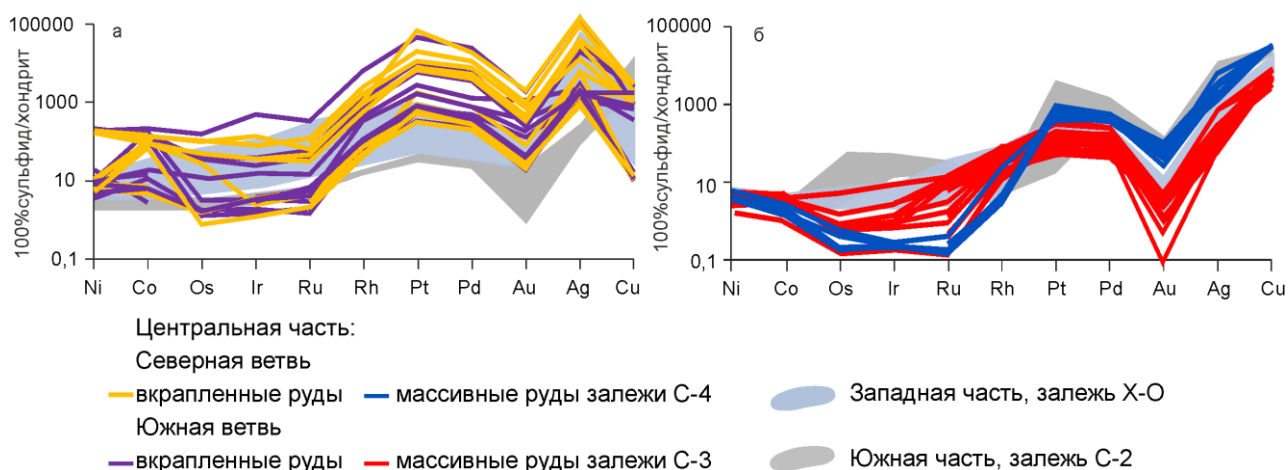


Рисунок 7 – спектры распределения Ni, Co, Cu и благородных металлов для вкрапленных (а) и массивных (б) руд центральной части Хараелахского интрузива, пересчитанные на 100% сульфид и нормированные на хондрит С1 по (McDonough, Sun, 1995; Tagle et al., 2008).

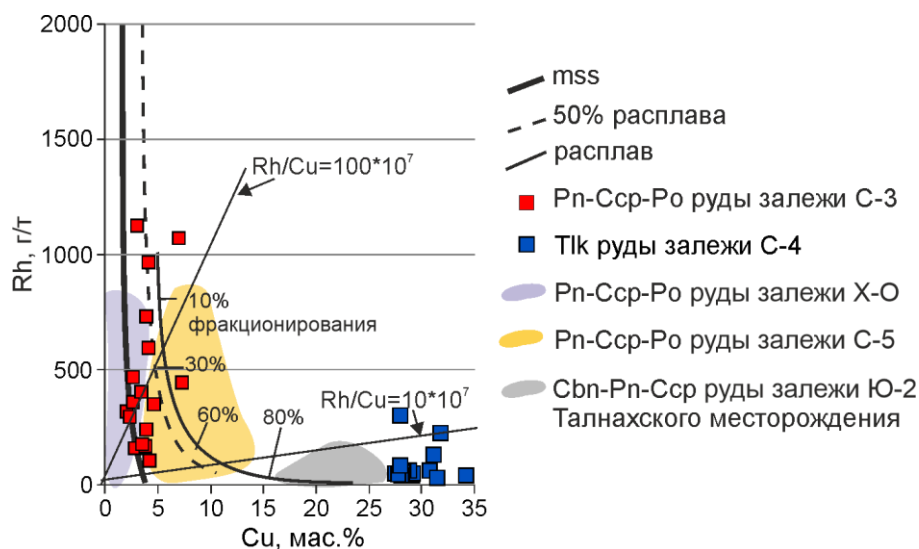


Рисунок 8 — диаграмма Rh-Cu для массивных пентландит-халькопирит-пирротиновых руд залежи С-3 и талнахитовых руд залежи С-4 центральной части Хараелахского интрузива с модельными кривыми Релеевского фракционирования (Налдретт, 2003). Поля массивных руд залежей Х-О, С-5 Октябрьского месторождения и залежи Ю-2 Талнахского месторождения по (Krivolutskaya et al., 2019, 2020; Tolstykh et al., 2020).

3. Вкрапленные пентландит-халькопирит-пирротиновые и кубанит-халькопирит-троилитовые руды центральной части Хараелахского интрузива сформировались на более ранних стадиях по отношению к массивным пентландит-халькопирит-пирротиновым рудам залежи С-3 и талнахитовым рудам залежи С-4, внедрившихся на заключительном этапе эволюции интрузива.

В ходе исследования автором определено 378 зерна минералов благородных металлов (МБМ), среди которых 26 минеральных видов МПГ и 9 минералов золота и серебра. Они формируют ксеноморфные зерна, метакристаллы и сложные срастания, ассоциируются с медистыми минералами, гораздо реже с пирротинном и пентландитом. МБМ распределены в рудах крайне неравномерно, образуя скопления в самой верхней части залежей сплошных руд. Их прожилки, просечки, выделения в трещинах сульфидных минералов доказывают их более позднюю минерализацию. Вместе с тем, в изученных массивных рудах встречаются агрегаты округлой формы, кристаллизация которых происходила одновременно с остыванием сульфидного расплава.

Вкрапленные кубанит-халькопирит-троилитовые руды в Северной ветви центральной части Хараелахского интрузива характеризуются широким распространением минералов золота и серебра. Среди них автором определены золото-серебряные

соединения с содержанием золота от 36 до 46 мас.%, самородное серебро с примесью палладия до 3 мас.%, аурикуприд Cu_3Au , гессит Ag_2Te , сопчеит $\text{Ag}_4\text{Pd}_3\text{Te}_4$ и аргентопентландит $\text{Ag}(\text{Fe},\text{Ni})_8\text{S}_8$.

Особенностью кубанит-халькопирит-троилитовых руд является разнообразие минералов Pd, Sn и Cu, среди которых найдены кабриит Pd_2CuSn , таймырит $(\text{Pd},\text{Cu},\text{Pt})_3\text{Sn}$, паоловит Pd_2Sn , нильсенит PdCu_3 , ниглиит PtSn и серия составов атокит-рустенбургит $(\text{Pd},\text{Pt})_3\text{Sn}$. Диагностирован широкий набор теллуридов и висмутидов, включающий мончеит $\text{Pt}(\text{Te},\text{Bi})_2$, соболевскит PdBi , котульскит $\text{Pd}(\text{Te},\text{Bi})_{2-x}$. Встречаются плюмбид палладия звягинцевит Pd_3Pb , арсениды (палладоарсенит Pd_2As , стиллуотерит Pd_8As_3 , мертиит $\text{Pd}_8\text{Sb}_{2,5}\text{As}_{0,5}$). Найдены единичные зерна сперрилита PtAs_2 , изоферроплатины Pt_3Fe и кейтконнит $\text{Pd}_{20}\text{Te}_7$.

Во вкрапленных пентландит-халькопирит-пирротиновых рудах Южной ветви центральной части Хараелахского интрузива среди МПГ наиболее распространены соединения палладия с висмутом и теллуrom – котульскит $\text{Pd}(\text{Te},\text{Bi})_{2-x}$, майченерит PdBiTe , фрудит PdBi_2 , а также арсениды палладия – палладоарсенид Pd_2As , неназванный минерал Pd_5As_2 . Кроме этого, присутствуют сперрилит PtAs_2 , паоловит Pd_2Sn , рустенбургит $(\text{Pt},\text{Pd})_3\text{Sn}$. Также обнаружены стибиопалладинит Pd_5Sb_2 , служеникинит $\text{Pd}_{15}(\text{Sb}_{7-x}\text{Sn}_x)$, мертиит $\text{Pd}_8\text{Sb}_{2,5}\text{As}_{0,5}$ и единичные зерна куперита PtS , кейтконнита $\text{Pd}_{20}\text{Te}_7$, изоферроплатины Pt_3Fe и стиллуотерита Pd_8As_3 .

Серебро присутствует в виде сопчеита $\text{Ag}_5\text{Pd}_4\text{Te}$, гессита Ag_2Te и электрума. Золото также встречается в виде аурикуприда Cu_3Au . Нередко наблюдаются включения сульфидов и силикатов в МПГ (рисунок 9 б, е).

По результатам исследования вкрапленных руд выявлена обратная зависимость между температурой кристаллизации МПГ и фугитивностью серы в рудообразующей системе. Во вкрапленных кубанит-халькопирит-троилитовых рудах наиболее развиты высокотемпературные соединения системы Pd-Pt-Sn-Cu (~480 – 500°C) по (Razin et al., 1975; Vymazalova et al., 2022). Во вкрапленных пентландит-пирротин-халькопиритовых рудах доминируют более низкотемпературные ассоциации арсенидов, висмутидов и теллуридов палладия, формирующихся в интервале ~ 290 – 350°C по (Бегизов, 1977; Makovicky, 2002).

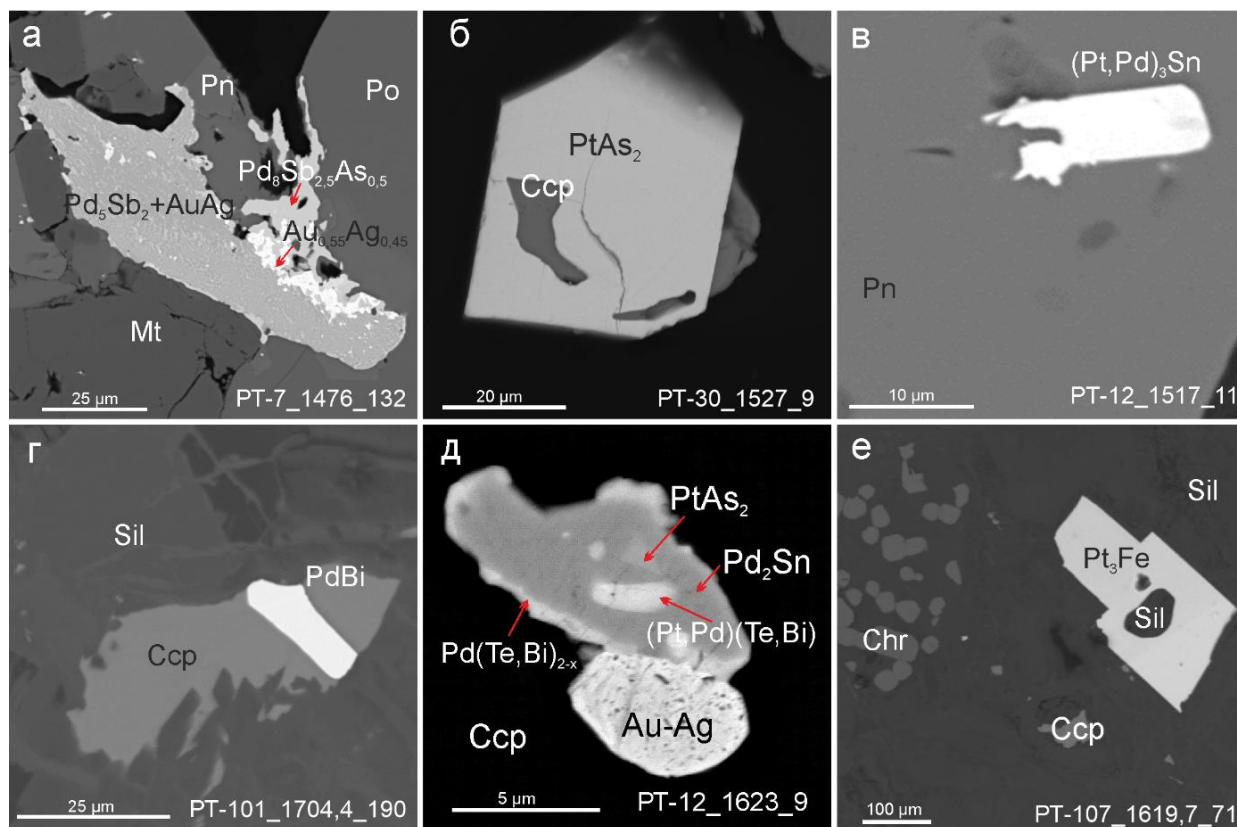


Рисунок 9 – Морфология минералов благородных металлов во вкрапленных рудах центральной части Хараелахского интрузива (а-в – пентландит-халькопирит-пирротиновые руды; г-е – кубанит-халькопирит-троилитовые руды).

В массивных талнахитовых рудах залежи С-4 Северной ветви центральной части Хараелахского интрузива благороднометалльная минерализация представлена преимущественно зернами электрума, золотосодержащего серебра, самородного золота, теларгпалита $(Pd,Ag)_3Te$ и таймырита $(Pd,Cu,Pt)_3Sn$, а также единичными выделениями палладоарсенида Pd_2As и кейтконнита $Pd_{20}Te_7$ и фазы $Pd(Te,Bi)$.

В массивных пентландит-халькопирит-пирротиновых рудах залежи С-3 Южной ветви Хараелахского интрузива платинометалльная минерализация представлена в основном сперрилитом $PtAs_2$ и паоловитом Pd_2Sn . Здесь сперрилит вместо привычных метакристаллов формирует мелкие выделения неправильной и прожилковой формы (рисунок 10 б).

Реже встречаются мончеит $Pt(Te,Bi)_2$, котульскит $Pd(Te,Bi)_{2-x}$, соболевскит $PdBi$, куперит PtS , минералы ряда атокит-рустенбургит $(Pd,Pt)_3Sn$, мертиит $Pd_8Sb_{2.5}As_{0.5}$ и налдреттит Pd_2Sb . Золото и серебро образуют сплавы с содержанием Au от 32 до 62 мас. Серебро также присутствует в виде гессита и аргентопентландита.

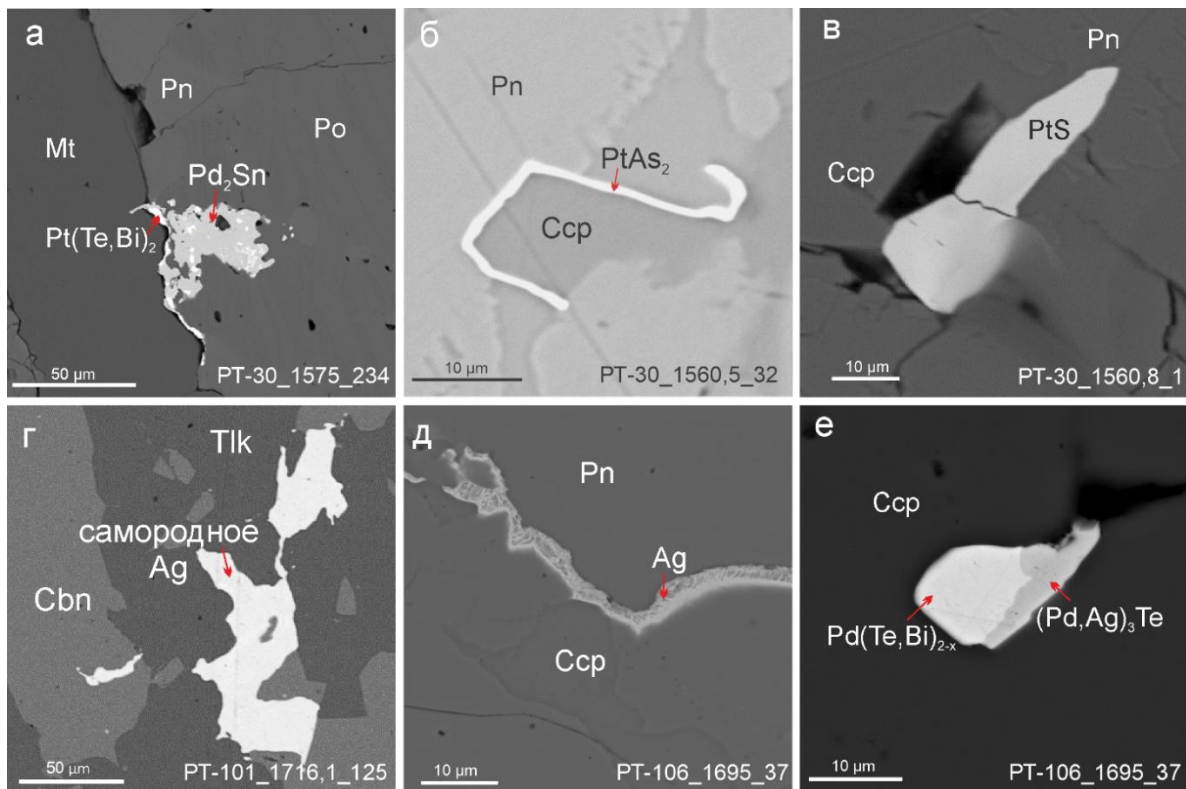


Рисунок 10 – Морфология минералов благородных металлов массивных рудах центральной части Хараелахского интрузива (а-в – пентландит-халькопирит-пирротиновые руды; г-е – талнахитовые руды).

В наименее фракционированных пентландит-халькопирит-пирротиновых рудах залежи С-3 Южной ветви преобладают высокотемпературные минералы, преимущественно соединения платины. В массивных талнахитовых рудах, характеризующихся наиболее высокой степенью фракционирования, широко распространены низкотемпературные парагенезисы МБМ. Следовательно, в массивных рудах наблюдается обратная зависимость температуры образования МБМ от степени фракционирования этих руд.

Таким образом, благороднометалльная минерализация в рудах центральной части Хараелахского интрузива представлена висмутидами, теллуридами, арсенидами, станнидами, плюмбидами палладия и платины, а также соединениями золота, серебра, меди. Распределение изученных минеральных парагенезисов благородных металлов в рудах разного состава проиллюстрировано на рисунке 11. Вкрапленные кубанит-халькопирит-троилитовые руды Северной ветви характеризуются преобладанием высокотемпературной ассоциацией минералов палладия, платины, меди и олова

Во вкрапленных пентландит-пирротин-халькопиритовых рудах широко развиты низкотемпературные ассоциации арсенидов, висмутидов и теллуридов палладия, а также золотосеребряные соединения. В массивных талнахитовых рудах наиболее распространены низкотемпературные минералы золота и серебра. В массивных пентландит-халькопирит-пирротиновые руды залежи С-3 большая часть МБМ представлена сперрилитом, а также станнидами палладия и платины.

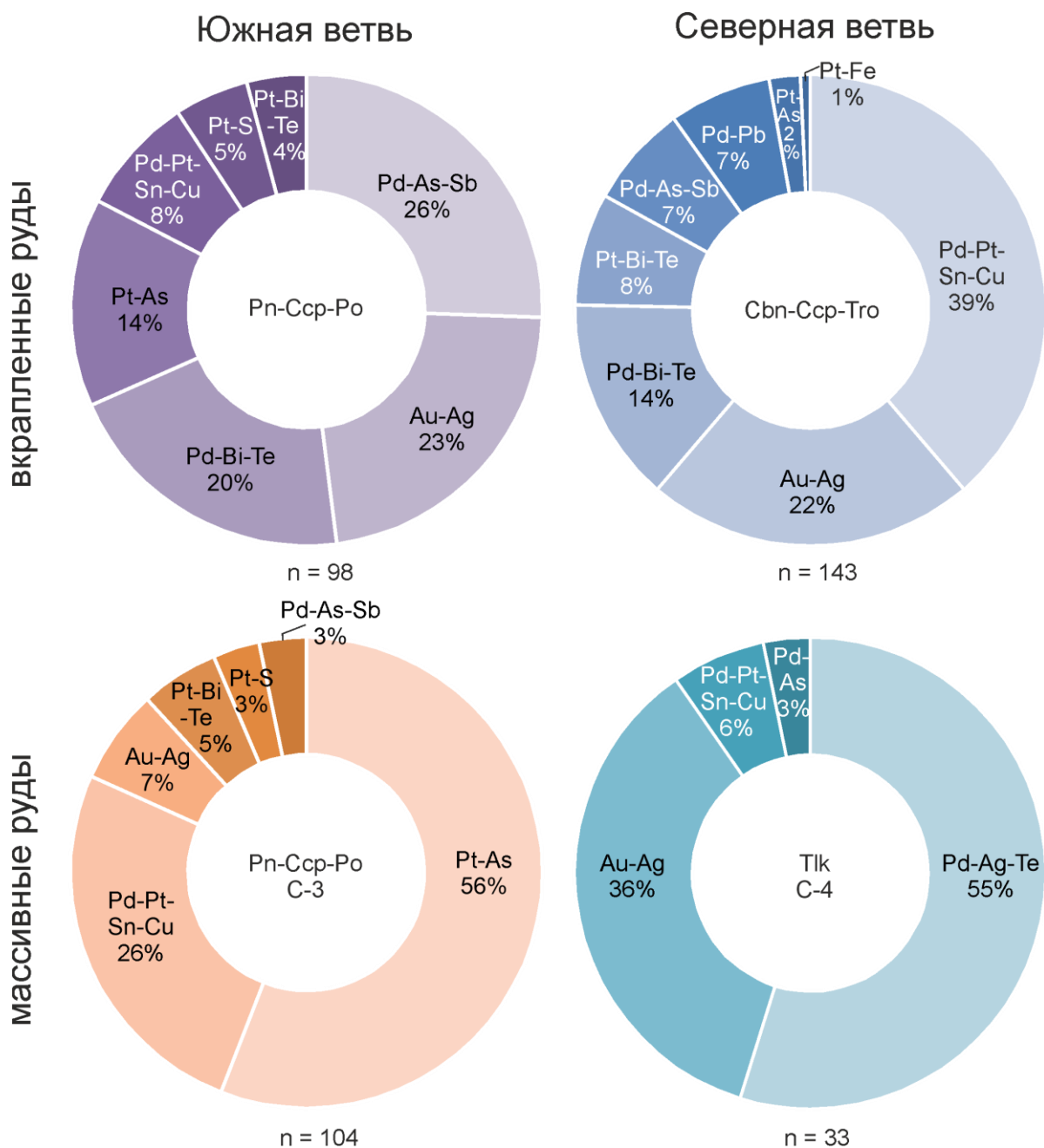


Рисунок 11 – Круговые диаграммы распределения минеральных парагенезисов благородных металлов во вкрапленных и массивных рудах центральной части Хараелахского интрузива. n – количество диагностированных минеральных индивидов.

Различия в парагенезисах МБМ и в минеральном составе руд свидетельствуют против кристаллизационно-гравитационной дифференциации сульфидного вещества и указывают на самостоятельную эволюцию каждого типа вкрапленных и массивных руд при разных условиях, а именно при разных величинах фугитивности серы и степенях фракционирования.

Выявленные различия в концентрации благородных металлов во вкрапленных и массивных рудах, а также различные парагенезисы минералов благородных металлов внутри интрузивных ветвей свидетельствуют о независимом формировании сначала вкрапленного, затем массивного оруденения в Хараелахском интрузиве.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе диссертационного исследования центральной части Хараелахского интрузива проведено комплексное изучение петрографических, минералогических и геохимических особенностей интрузивных пород и сульфидных медно-никелевых руд, что позволило достичь следующих результатов:

1. Установлены нарушения порядка залегания дифференциатов в изученных разрезах скважин. Выявлены особенности строения центральной части Хараелахского интрузива, позволившие обосновать ее разделение на 2 интрузивные ветви: Северную и Южную. По сравнительному анализу минерального и химического состава пород установлены отличия центральной, западной и южной частей интрузива.

2. Проведен сравнительный анализ распределения металлов платиновой группы, золота и серебра во вкрапленных и массивных рудах. Показана зависимость состава благороднометалльной минерализации от состава сульфидных руд. Сделан вывод о ведущей роли процесса фракционирования в распределении концентраций благородных металлов в рудах разного состава.

3. Детально изучены формы, размеры и состав минералов благородных металлов во вкрапленных и массивных рудах центральной части Хараелахского интрузива. Выявлена обратная зависимость температуры кристаллизации МБМ от фугитивности серы в рудообразующей системе во вкрапленных рудах и обратная зависимость от степени фракционирования в массивных рудах. Сделан вывод о раздельном формировании вкрапленных и массивных руд.

В работе показана высокая перспективность центральной части

Октябрьского месторождения. В условиях селективной отработки месторождения существует необходимость в усовершенствовании технологий переработки руд для большего активного вовлечения вкрапленных руд в производство цветных и благородных металлов. Полученные впервые данные о форме нахождения МБМ во вкрапленных и массивных рудах центральной части Хараелахского интрузива играют важную роль в разработке схем их дальнейшего обогащения.

Результаты, полученные в ходе исследования, позволили предложить модуль формирования центральной части Хараелахского интрузива, согласующуюся с гипотезой о многостадийном образовании сульфидного оруденения в Хараелахском интрузиве (Дистлер и др., 1998; Дюжиков и др., 1988; Лихачев, 1988). Установлены признаки самостоятельной эволюции каждого типа вкрапленных и массивных руд при разных условиях. Выявленные особенности в строении центральной части Хараелахского интрузива также свидетельствуют о его длительном, многоэтапном становлении.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Канимбуге, Л.С. Платинометалльное оруденение Норильского района: история и перспективы развития / Л.С. Канимбуге, И.В. Таловина // Известия Уральского государственного горного университета. – 2022. – № 4 (68). – С. 56–63.

2. Канимбуге, Л.С. Особенности морфологии и состава минералов благородных металлов во вкрапленных и массивных рудах центральной части Октябрьского месторождения, Норильский район / Л.С. Канимбуге, Н.Д. Толстых, Н.А. Криволицкая, И.В. Таловина // Известия высших учебных заведения. Геология и разведка. 2024. – №1 (66). – С.88–98.

Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus:

1. Canhimbue, L. Geochemical Distribution of Platinum Metals, Gold and Silver in Intrusive Rocks of the Norilsk Region / L. Canhimbue, I. Talovina // Minerals. – 2023. – Vol. 13. – P. 719.

2. Tolstykh, N.D. Mineralogical zoning of the PGE-Cu-Ni orebodies at the central part of Oktyabr'sky deposit, Norilsk district, Russia / N.D. Tolstykh, N.A. Krivolutsкая, L.S. Canhimbue, B.I. Gongalsky, I.A.

Kuz'min // Mineralogical magazine. – 2024. – Published online. – P. 1–36.

Публикации в иных научных изданиях:

1. Канимбуге, Л.С. Сравнение геохимических характеристик платиноидно-медно-никелевых руд и пород интрузий Норильского района / Л.С. Канимбуге // Новое в познании процессов рудообразования. – Москва: ИГЕМ РАН. – 2022. – С. 120–122.

2. Канимбуге, Л.С. Анализ закономерностей распределения платиновых металлов, золота и серебра в интрузивах Норильского района / Л.С. Канимбуге // Новые идеи в науках о Земле. – Москва: МГРИ. – 2023. – С.44–48.

3. Канимбуге, Л.С. Особенности распределения и концентрации благородных металлов в интрузивах Норильского района / Л.С. Канимбуге // Актуальные проблемы недропользования. Санкт-Петербург: Горный университет. – 2023. – С. 353–355.

4. Криволицкая, Н.А. Новые данные о геологическом строении Октябрьского месторождения, Норильский рудный район / Н.А. Криволицкая, Н.Д. Толстых, Л.С. Канимбуге, Б.И. Гонгальский, И.А. Кузьмин // Ультрамафит-мафитовые комплексы: геология, строение, рудный потенциал. – Новосибирск: ИПЦ НГУ. – 2023. – С. 109–111.

5. Толстых, Н.Д. Минералого-геохимические особенности руд центральной части Октябрьского месторождения, Норильский рудный район / Н.Д. Толстых, Н.А. Криволицкая, Л.С. Канимбуге, Б.И. Гонгальский // Минералообразующие системы месторождений высокотехнологических минералов: достижения и перспективы исследований. – Москва: ИГЕМ РАН. – 2023. – С. 386–389.

6. Канимбуге, Л.С. Рудный потенциал и генетические особенности центральной части Октябрьского месторождения, Норильский район / Л.С. Канимбуге, И.В. Таловина // Научно-методические основы прогноза, поисков, оценки месторождений алмазов, благородных и цветных металлов. – Москва: ЦНИГРИ. – 2024. – С. 160–161.