

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Крылов Иван Олегович

**УСЛОВИЯ ЛОКАЛИЗАЦИИ МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ РУД
ЗАПАДНОГО ФЛАНГА ОКТЯБРЬСКОГО
МЕСТОРОЖДЕНИЯ ТАЛНАХСКОГО РУДНОГО УЗЛА
(НОРИЛЬСКИЙ РУДНЫЙ РАЙОН)**

1.6.10 – Геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых,
минералогия (геолого-минералогические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Москва – 2024

Диссертация подготовлена на кафедре геологии, геохимии и экономики полезных ископаемых Геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

- Научный руководитель** *Дергачев Александр Лукич – доктор геолого-минералогических наук, доцент*
- Официальные оппоненты** *Игнатов Петр Алексеевич – доктор геолого-минералогических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе», кафедра геологии месторождений полезных ископаемых, заведующий*
- Раткин Владимир Васильевич – доктор геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, ФГБУН Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, лаборатория рудно-магматических систем, ведущий научный сотрудник*
- Терентьев Роман Анатольевич – кандидат геолого-минералогических наук, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», НИИ Геологии, отдел метаморфизма и рудообразования, ведущий научный сотрудник*

Защита диссертации состоится 15 февраля 2024 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета МГУ.016.6 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, геологический факультет, ауд. 415.

E-mail: dsmsu0403@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/016.6/2837>

Автореферат разослан «__» января 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета МГУ 04.03
кандидат технических наук

К.М. Кузнецов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Норильский рудный район занимает площадь около 45 тыс. км², в северо-западной части Среднесибирского плоскогорья. Он является уникальным и имеет очень важное экономическое значение, как для России, так и для мировой экономики в целом. Рудный район включает в себя ряд крупных месторождений, в которых заключено 75% мировых запасов Pd, 15% запасов Pt, а также значительная доля российских запасов Ni, Cu и Co. Потенциал Норильской металлогенической провинции намного превышает запасы известных мировых месторождений.

В связи с важным экономическим значением района интерес к геологическому строению входящих в него месторождений особенно возрос во второй половине XX века. Открытие в начале 1960-х годов Октябрьского и Талнахского месторождений с уникальными запасами сульфидных руд вывели Россию на лидирующие позиции в мире по запасам и добыче меди, никеля и металлов платиновой группы. Запасы Октябрьского месторождения являются одной из двух составляющих, на которых держится вся промышленная мощь Норильского района, что делает проблему условий формирования крупных медно-никелевых месторождений до сих пор актуальной.

Актуальность темы исследования. Актуальность диссертационной работы определяется важным экономическим значением месторождений Норильского рудного района для минерально-сырьевой базы страны. В максимальной степени это относится к интенсивно разрабатываемому Октябрьскому месторождению, которое является крупнейшим медно-никелевым с платиноидами месторождением в России. Его запасы богатых сульфидных руд близятся к исчерпанию. С точки зрения наращивания запасов наибольший геологический интерес в настоящее время представляют фланги Октябрьского месторождения, отвечающие краевым частям ветвей Хараелахского интрузива, где продолжаются разведочные работы. Кроме того, в пределах Норильской металлогенической провинции проводятся поисково-оценочные работы, задачей которых является выявление потенциально возможных рудных тел в маломощных дифференцированных силлах. Успешное решение этих задач делает актуальным изучение геологического строения маломощных краевых частей крупных интрузивных тел, а также особенностей локализации в них рудных тел.

Степень разработанности. Геологическое изучение месторождений Норильского рудного района ведется с тридцатых годов прошлого века. Главной его задачей являются поиски месторождений сульфидных платино-медно-никелевых руд. Все такие месторождения и крупные проявления пространственно и генетически связаны с расслоенными гипербазитовыми интрузивами трапповой формации, мощностью до 360 м, имеющими пластообразную или лополитообразную, реже дайкоподобную форму и протяжённостью до нескольких десятков километров. За весь период изучения Норильской металлогенической провинции накопилось огромное количество материала о природе основного и

ультраосновного магматизма, геодинамических обстановках формирования медно-никелевых месторождений, металлогении, петрогенезисе, образовании сульфидных медно-никелевых руд и т.п. Вместе с тем, постепенное уменьшение запасов основных богатых залежей Октябрьского месторождения ставит перед геологами сложную задачу проведения поисково-оценочных работ в Норильской металлогенической провинции и доразведки флангов известных крупных месторождений. Остаются до сих пор нерешенными и многие вопросы, касающиеся генезиса уникальных месторождений Норильского типа.

Цели и задачи. Главной целью работы являлось выявление закономерностей локализации рудных тел и детализация их морфологии, а также характеристика типов, минералого-геохимических и текстурно-структурных особенностей руд западного фланга Октябрьского месторождения.

Конкретными задачами, решавшимися в рамках работы, являлись:

- обобщение и подтверждение данных более ранних исследований месторождения о типах руд и их пространственном размещении на флангах Октябрьского месторождения;

- построение 3D-моделей каркасов рудных тел по данным скважин разведочного бурения и описание их морфологии;

- исследование типоморфных особенностей породобразующих и аксессуарных минералов рудовмещающих пикритовых габбро-долеритов на западном фланге Октябрьского месторождения, выявление характера распределения элементов-примесей в минералах;

- изучение типов магматических сульфидных руд на западном фланге октябрьского месторождения и закономерностей их распределения;

- изучение минерального состава различных типов руд в западной части Хараелахского интрузива;

- выделение типов вкрапленных руд по текстурно-структурным особенностям, изучение каждого типа методом рентгеновской 3D-томографии, анализ результатов на основе фрактальной теории.

Фактический материал, положенный в основу написания диссертационной работы. Геологический материал, использовавшийся для составления настоящей работы, был собран автором в течение двух полевых сезонов (2021, 2022 гг.) на руднике Октябрьском, а также в окрестностях шахты Комсомольская.

Собранный автором новый фактический материал представлен:

Обширными данными разведочного бурения, собранными в процессе геологической документации керна 26 разведочных скважин, пробуренных в 2016 – 2021 гг. (13 400 п. м. бурения);

Каменным геологическим материалом, включающим 200 образцов горных пород и руд, отобранных преимущественно из рудных интервалов из керна разведочных скважин в западной части Хараелахского интрузива, а также 10 образцов, отобранных из подземных горных выработок на руднике Октябрьский;

Коллекцией шлифов и аншлифов горных пород и руд западного фланга Октябрьского месторождения (30 шлифов, 170 аншлифов);

Каркасными 3D моделями рудных тел на западном фланге Октябрьского месторождения, выполненными в ГГИС Micromine и Leapfrog на базе документации разведочных скважин;

Анализами акцессорных минералов (2077 замеров) в образцах из рудовмещающих пород Хараелахского интрузива, выполненных с использованием ICP-MS;

160 Фурье инфракрасными (ИК) спектрами поглощения плагиоклазов, 200 ИК-спектрами оливина и 150 спектрами клинопироксена из рудовмещающих пород Хараелахского интрузива;

Статистическими данными полученные в ходе фрактального анализа сульфидных минералов вкрапленных руд.

Научная новизна работы. Задачи, поставленные в диссертации, не являются абсолютно новыми для месторождений Норильского рудного района, но впервые они решены для новых объектов – рудных залежей западного фланга Октябрьского месторождения. Использование комплекса современных методов исследований позволило надежно охарактеризовать минеральный состав сульфидных медно-никелевых руд, их текстурно-структурные признаки и обосновать выделение их типов, установить закономерности пространственного распределения и морфологию рудных тел в пределах западной ветви Хараелахского интрузива. Интерпретация данных рентгеновской 3D томографии на основе фрактальной теории позволили сделать важные выводы о минеральном составе вкрапленных руд и их текстурно-структурных особенностях.

Личный вклад автора. В ходе полевых работ в 2021 и 2022 году, автором были отобраны образцы для минералого-петрографических и ИК-исследований. С 2021 по 2022 год, в рамках работы в Региональном общественном Фонде имени академика В.И. Смирнова, автор принимал личное участие в НИР, посвященных изучению особенностей минеральных ассоциаций платинометалльного оруденения на месторождениях Норильской металлогенической провинции. В ходе работы автором самостоятельно выполнено массовое трехмерное моделирование рудных тел на западном фланге месторождения. При его участии выполнены ИК-спектроскопия породообразующих минералов, элементный анализ акцессорных минералов и интерпретация данных фрактального анализа вкрапленных руд. Автор принимал активное участие в постановке научных задач, проведении интерпретации полученных данных, разработке теоретических моделей, анализе полученных результатов и предоставлении их в печати. В работах [1,2], опубликованных в соавторстве, основополагающий вклад и основная идея проведения исследований принадлежит соискателю.

Теоретическая и практическая значимость работы. Приведенные в работе новые данные о морфологии и основных закономерностях пространственного распределения залежей сульфидных медно-никелевых руд западного фланга

Октябрьского месторождения имеют важнейшее значение для оптимизации дальнейших геологоразведочных работ. Разработанная характеристика минерального состава и текстурно-структурных особенностей вкрапленных руд западного фланга Октябрьского месторождения будут использованы в дальнейшем при их добыче и обогащении на Норильской обогатительной фабрике.

Методика и объекты исследования. Для выяснения особенностей состава породообразующих минералов пикритовых габбро-долеритов, изучались породообразующие минералы из оливинсодержащих, оливиновых, такситовых и пикритовых габбро-долеритов Хараелахского интрузива. Образцы для изучения отбирались из разведочных скважин, пробуренных на западном фланге Октябрьского месторождения (рис. 1).

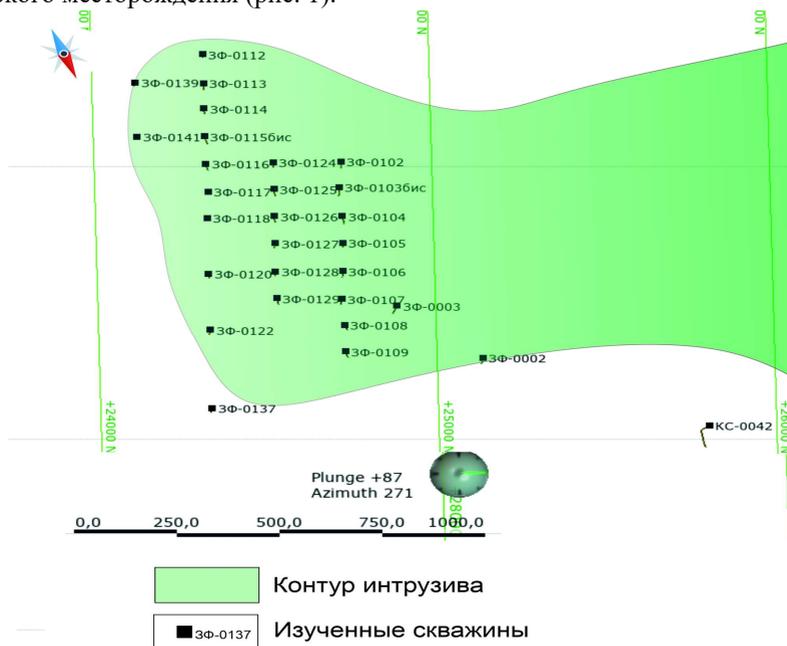


Рис. 1. Схема расположения изученных разведочных скважин в пределах западного фланга месторождения Октябрьское (ГИС Leapfrog);

Петрологическое и минераграфическое изучение рудовмещающих пород и руд были выполнены на поляризационном микроскопе AxioLab (Carl Zeiss) кафедры геологии, геохимии и экономики полезных ископаемых Геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, микрофотографии сделаны на микроскопе AxioPlan с использованием программного комплекса AxioVision. Минераграфическое описание образцов было выполнено в соответствии со стандартными требованиями описания рудных минералов. Шлифы, аншлифы и шашки для исследований были также изготовлены на базе шлифовальной мастерской Геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова и на базе шлифовальной мастерской ФГБУ ЦНИГРИ.

После предварительного минераграфического и петрографического изучения, определение основных минералообразующих элементов в породообразующих минералах было проведено методом микрорентген-флуоресцентной спектromетрии после предварительного напыления шашек углеродом. Для измерений использовался JEOL JSM-7100F, с приставкой: Oxford Instruments X-taхn. Детектор работал в режиме 50 кв. мм. Напыление образцов производилось в лаборатории локального исследования вещества на кафедре петрологии и вулканологии Геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. Микрорентгеноспектральный анализ проводился в НИЦ Курчатовский институт ИРЭА.

Исследование породообразующих минералов (плагноклазов, оливинов, орто- и клинопироксенов) было произведено методом ИК-спектроскопии (ИКС). ИК-исследования выполнены на ИК-Фурье микроскопе Nicolet-380 с ИК-Фурье микроскопом Centaurus (THERMO Scientific, США) и ИК-Фурье-спектрометром VERTEX 70 с модулем комбинационного рассеяния RAM II в диапазоне волновых чисел $650 - 4000 \text{ см}^{-1}$ и $400 - 4000 \text{ см}^{-1}$ соответственно в НИЦ «Курчатовский институт» (ИРЕА).

Элементы-примеси в окисно-рудных минералах изучались квадрупольным масс-спектрометром ELAN DRC-e (производитель: PerkinElmer), приставка лазерного отбора – NWR 266 (производство: New Wave Research) на базе НИЦ Курчатовский институт ИРЭА. Всего произведено 2077 замеров.

Каркасное 3D моделирование рудных тел западного фланга Октябрьского месторождения проводилось при помощи программного обеспечения ГГИС Leapfrog и Micromine.

Исследование образцов вкрапленных руд происходило в несколько этапов: минераграфическое и петрографическое описание, геохимическое определение петрогенных и рассеянных элементов, а также элементов платиновой группы, золота и серебра, 3D-томография, компьютерное вычисление фрактальных размерностей и анализ полученных данных. Химический состав минералов определялся локальным рентгеноспектральным анализом на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Leo 1450 (Carl Zeiss, Германия), оборудованном ЭДС-спектрометром Aztec Ultimmax 100 (Oxford Instruments, Великобритания) в Геологическом институте Кольского научного центра РАН.

Определение элементов также выполнялось в Институте химии и технологии редких элементов Кольского научного центра РАН. Определение кремния проводилось методом атомно-эмиссионной спектromетрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП АЭС) на приборе ICPE 9000 (Шимадзу, Япония) после сплавления. Низкие концентрации кремния дополнительно измерялись методом спектрофотометрии (реагент – гетеромолибденовая поликислота, по синей окраске). Содержания элементов платиновой группы, золота и серебра определялось в ООО «Институт Гипроникель» масс-спектрометрическим методом

с индуктивно связанной плазмой iCAP Q модели iCAP Qc, а также атомно-абсорбционным спектрометром iCE 3300.

Трехмерная рентгеновская томография образцов руд выполнялась в Казанском федеральном университете с помощью микро- и нанофокусной исследовательской рентгеновской системы для компьютерной томографии General Electric V|tome|X S 240 (Германия).

Фрактальный анализ сульфидов и определение их двухмерной фрактальной размерности проводилось с помощью программы GG_3 [Чернявский, Степенщиков, 2021], по изображениям в обратно рассеянных электронах (BSE-изображения).

Положения, выносимые на защиту:

1. На западном фланге Октябрьского месторождения линзовидные тела сульфидных Cu-Ni руд: богатых, медистых и вкрапленных - пространственно связаны, образуют субгоризонтальную рудную зону, располагаясь в ней на нескольких горизонтах. Морфология рудных тел определяется постепенным выклиниванием Хараелахского интрузива и погружением его в юго-восточном направлении, контурами развития рудовмещающих пикритовых габбро-долеритов, уменьшением их мощности и сменой их по латерали безрудными оливинсодержащими и безоливиновыми габбро-долеритами.

2. Рудовмещающие пикритовые габбро-долериты западной части Хараелахского интрузива содержат несколько генераций породообразующих и аксессуарных минералов, различающихся составом в пределах изоморфных рядов и определенным набором элементов-примесей. По мере приближения к рудным телам в пикритовых габбро-долеритах закономерно растёт основность плагиоклаза и увеличение в его составе примеси Fe, повышаются железистость клинопироксена и содержание в нём TiO₂.

3. Наиболее распространенные на западном фланге Октябрьского месторождения каплевидные и каплевидно-интерстициальные вкрапленные руды не различимы по фрактальной размерности, что позволяет предполагать близость их свойств обогатимости и возможность совместной переработки этих руд. Структуры сульфидных агрегатов различного размера в них математически самоподобны. Это подтверждает формирование рассматриваемых руд в ходе единого геологического процесса, вероятно - ликвации.

Степень достоверности и апробация результатов. Результаты исследований автора были представлены на международных и российских конференциях и совещаниях: XVIII Всероссийская (с международным участием) Ферсмановская научная сессия, (Апатиты, 2021), X Международная научно-практическая конференция «Научно-методические основы прогноза, поисков, оценки месторождений алмазов, благородных и цветных металлов (Москва, 2021), XIX Всероссийская (с международным участием) Ферсмановская научная сессия, (Апатиты, 2022), III Молодежная научно-образовательная конференция Минерально-сырьевая база алмазов, благородных и цветных металлов от прогноза

к добыче, ФГБУ ЦНИГРИ (Москва, 2022), Рудная школа ЦНИГРИ 2023 "Минерально-сырьевая база алмазов, благородных и цветных металлов - от прогноза к добыче (Москва, 2023), XXX Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Ломоносов-2023" (Москва, 2023), Научные чтения Экзолит–2023 (Москва, 2023).

Публикации. Результаты полученных исследований опубликованы в 6 работах, из них 3 статьи опубликованы в журнале, рецензируемом в RSCI.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и библиографического списка, общим объемом 143 страницы, содержит 18 таблиц и 53 рисунка. Список использованной литературы содержит 176 наименований.

Благодарности. Проведению исследований и написанию работы способствовали многолетние научные труды, посвященные уникальным медно-никелевым месторождениям Норильского рудного района, авторами которых являются Годлевский М. Н., Налдретг Дж., Додин Д. А., Генкин А. Д., Урванцев Н. Н., Суханова Е. Н., Кравцов В. Ф., Люлько В. А., Золотухин В. В., Дистлер В. В., Рябов В. В., Туровцев Д. М., Служеникин С. Ф., Федоренко В. А., Тарасов А. В., Криволицкая Н. А., Юдовская М. А., Дюжиков О. А., Степанов В. К., Спиридонов Э. М., Радько В. А., Мирошникова Л. К., и др.

Автор выражает благодарность своему научному руководителю – Александру Лукичу Дергачеву, за руководство при написании работы и зав. кафедрой геологии геохимии и экономики полезных ископаемых Виктору Ивановичу Старостину за помощь в выборе направления исследований и пристальное внимание к работе. Автор выражает признательность и благодарит профессора кафедры минералогии Эрнста Максевича Спиридонова и доцента той же кафедры Юлию Дмитриевну Гриценко за разностороннюю помощь, исчерпывающие консультации и помощь в выполнении минералогических исследований, профессора РАН кафедры петрологии и вулканологии Андрея Викторовича Боброва за консультации при проведении петрологических исследований, Александра Сергеевича Якубчука за ценные консультации, Михаила Александровича Богуславского, Алексея Алексеевича Бурмистрова, Татьяну Алексеевну Филицину и других сотрудников кафедры геологии, геохимии и экономики полезных ископаемых за важные замечания и справедливую критику, зав. кафедрой региональной геологии и истории Земли профессора Анатолия Михайловича Никишина за консультации при составлении первых разделов работы, зав. кафедрой нефтегазовой седиментологии и морской геологии, профессора Юлиану Валерьевну Ростовцеву за добрые советы и помощь на финальных стадиях выполнения работы, сотрудников ООО «Норникель Технические Сервисы» за помощь в отборе геологического материала, Марию Дмитриевну Киселеву и Софью Андреевну Рихтер за помощь в обработке каменного материала. Особую благодарность автор также выражает Ивану Ивановичу Никулину – доктору г.-м. н., зам. генерального директора ООО

«Норникель Технические сервисы» за помощь в выборе направления исследований и неоценимый вклад в выполнение работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1 «История геологического изучения района» посвящена краткой истории геологического изучения Норильского рудного района и открытию Октябрьского месторождения, в ней отражена этапность геологических исследований и перечислены основные работы, в которых рассматривались основные аспекты геологического строения района.

В главе 2 «Геологическое строение и история геологического развития района» детально приведены сведения о геологическом строении Норильско-Талнахского рудного узла. Она содержит описание разреза стратифицированных толщ, вмещающих рудоносные интрузивы, дополненное результатами исследований последних нескольких лет. В этом разрезе большое внимание уделено магматическим образованиям позднепалеозойского-раннемезозойского возраста и особенностям образования рудоносных пластообразных интрузивов Норильского типа. По литературным данным описаны периоды активного вулканизма и формирование пород раннетриасовой трапповой формации. Охарактеризована геолого-структурная позиция района, приведено тектоническое районирование, описание краевых региональных структур Западно-Сибирской платформы. Показаны главные дизъюнктивные структуры в районе (Норильско-Хараслахацкий, Боганидский и Имангдинско-Летнинский глубинные разломы), а также оперяющие их структуры второго порядка (Северо-Хараслахацкий и Кета-Ирбинский разломы), приводится краткий обзор и обсуждение гипотез, объясняющих различные аспекты образования уникальных медно-никелевых месторождений Норильского рудного района.

Глава 3 «Особенности локализации типов руд на Западном фланге Октябрьского месторождения» обосновывает первое защищаемое положение. В ней приведена подробная характеристика геологического строения западного фланга Октябрьского месторождения. Приведены новые данные о морфологии рудных тел, основанные на результатах интерпретации данных новых разведочных скважин, охарактеризованы 3D модели каркасов рудных тел на западном фланге месторождения, описаны 3D модели, морфология новых рудных тел и типы руд, слагающие их. По результатам сформулировано первое защищаемое положение.

Глава 4 «Минералого-геохимическая характеристика Хараслахацкого интрузива» обосновывает второе защищаемое положение. В ней содержится петрологическая характеристика Хараслахацкого интрузива, а также сравнение пород, слагающих его западный фланг и осевую часть; приводятся результаты изучения химического состава породообразующих и аксессуарных минералов,

рассмотрена корреляция химического состава минералов с рудоносностью пород. По результатам сформулировано второе защищаемое положение.

Глава 5 «Особенности состава и строения вкрапленных руд на западном фланге Октябрьского месторождения» обосновывает третье защищаемое положение. В ней приведена подробная характеристика вкрапленных руд, локализованных в пределах краевой части Хараелахского интрузива. Выделены несколько текстурно-структурных типов минерализации во вкрапленных рудах, приведены результаты фрактального анализа каждого типа руд. Сформулировано третье защищаемое положение.

Первое защищаемое положение раскрыто в главе 3 и обосновывается результатом изучения морфологии рудных тел и типов минерализации на западном фланге Октябрьского месторождения.

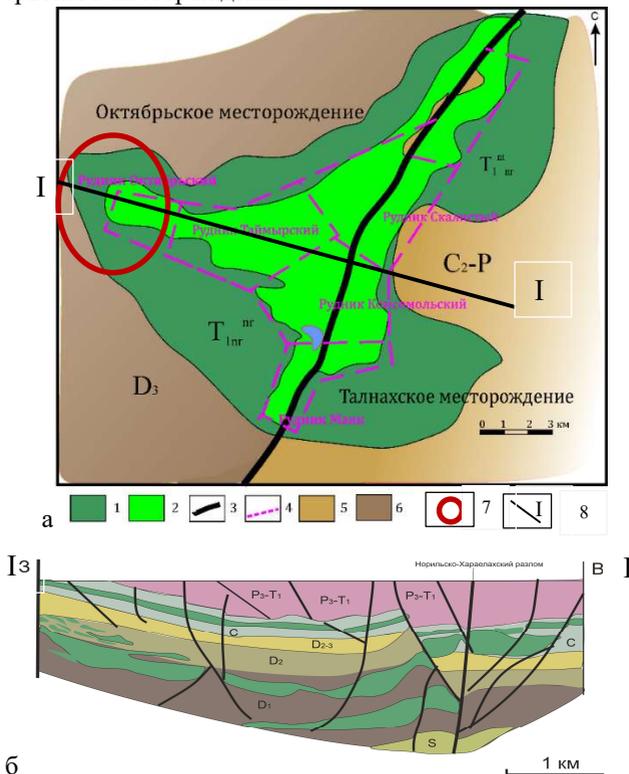


Рис. 2 а – Геологическая схема Талнахского рудного узла; б – Схематический геологический разрез через Хараелахский и Талнахский интрузивы по линии I-I. Условные обозначения: 1 – контур распространения лейкократовых, безоливиновых, оливинсодержащих и контактовых габбро-долеритов; 2 – контур развития пикритовых габбро-долеритов; 3 – Норильско-Хараелахский разлом; 4 – границы полей рудников; 5 – отложения верхнего девона; 6 – отложения верхнего палеозоя; 7 – изученный фланг Октябрьского месторождения, 8 – линия разреза

Хараелахский интрузив расположен в пологой западной части мульды и ограничивается с востока Норильско-Хараелахским разломом (рис. 2). Интрузив полого погружается в северо-западном направлении, имеет приподнятые юго-восточную и северо-западную краевые части, а также опущенную центральную. Контролируемый разломом интрузив состоит из двух полого вытянутых ветвей: Северо-восточной и, собственно, Хараелахской. Западный фланг Октябрьского месторождения отвечает Хараелахской ветви сложно построенного межформационного интрузива, где сосредоточены рудные тела, наиболее обогащенные платиноидами. Основные морфологические черты интрузива в этом районе обусловлены преимущественно доинтрузивной пликативной тектоникой, трещинами и разломами, сопровождавшими внедрение и дальнейшее становление интрузива, пластическими деформациями и локальными закрытыми эксплозиями.

По сравнению с Талнахским месторождением, где рудоносный интрузив локализуется в породах тунгусской серии, рудные тела на западном фланге Октябрьского месторождения группируются на более низком стратиграфическом уровне. Залегание интрузива в слоистых породах девона и положение непосредственно в пределах висячего (западного) крыла разлома отчасти определило морфологические особенности рудных тел на западном фланге Октябрьского месторождения.

На западном фланге наиболее рудонасыщенным является горизонт пикритовых габбро-долеритов, который отвечает рудоносному нижнему горизонту пикритовых габбро-долеритов в осевой части Хараелахского интрузива. В северо-западном направлении его мощность постепенно уменьшается, происходит замещение пикритовых габбро-долеритов оливинсодержащими и безоливиновыми разновидностями, которые слагают апофизы интрузива. Результатом является усложнение морфологии, появление многочисленных раздувов, пережимов и разветвлений рудных тел на серию апофиз.

На западном фланге месторождения распространены рудные тела трех типов: сплошных богатых, медистых и прожилково-вкрапленных. С помощью ГГИС Micromine и Leapfrog были построены 3D модели каркасов рудных тел каждого типа, а также геологическая модель Хараелахского интрузива, которые отображают взаимное расположение залежей сульфидных руд разных промышленных типов и их морфологию в плане (рис. 3).

И в центральных частях Октябрьского месторождения, и на его западном фланге очертания залежей богатых и в меньшей степени медистых руд зачастую повторяют в плане контуры распространения горизонта пикритовых габбро-долеритов. Раздувы мощности горизонта могут использоваться в качестве поискового признака на богатые и медистые руды.

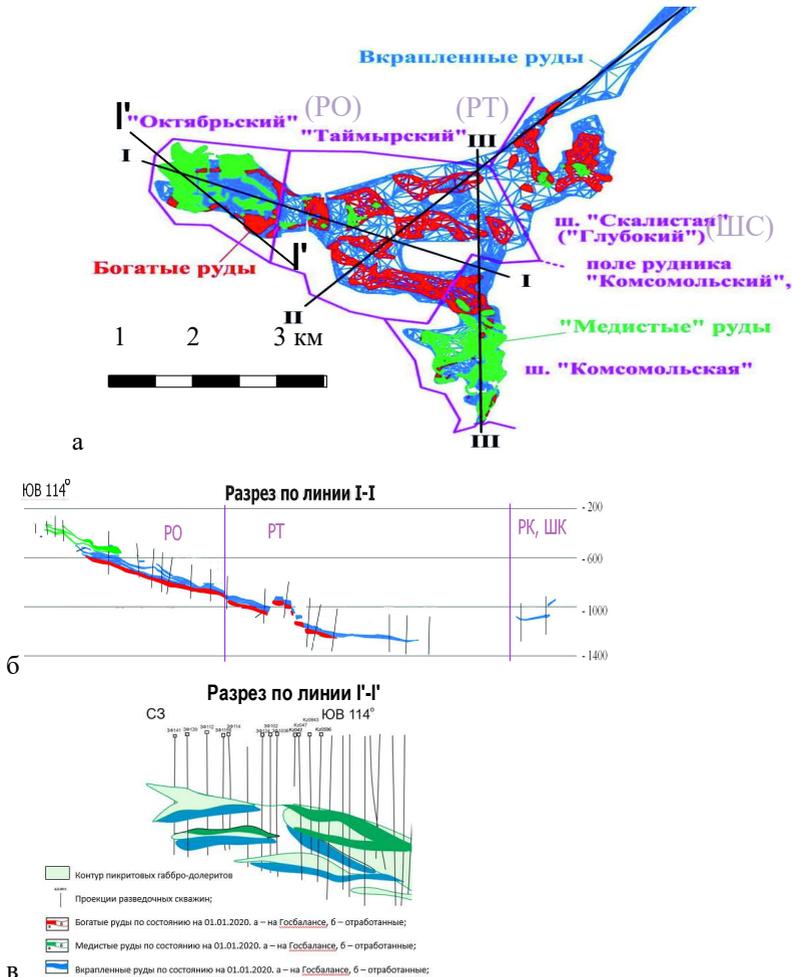


Рис.3. Каркасные 3D модели рудных тел Октябрьского и Талнахского месторождения: а – позиция рудных тел в плане; б – поперечный разрез Хараелахской интрузии; в – детализированный разрез рудных тел западного фланга Октябрьского месторождения

Богатые руды залегают в придонных горизонтах Хараелахского интрузива и представляют собой сплошные халькопирит-пирротиновые минеральные агрегаты. В центральной части интрузива они слагают линзообразные и пластообразные тела, сменяющиеся на западном фланге серией разобщенных линз, апофизов и жил, осложненных пострудной тектоникой. С учетом отработанных на сегодняшний день залежей средняя мощность рудных тел в центральной части месторождения колеблется от первых десятков сантиметров до 5 м, в то время как на западном фланге месторождения их мощность варьирует от первых десятков сантиметров до 10 метров. По минеральному составу, структуре и текстуре эти руды сходны со

сплошными рудами основной залежи Октябрьского месторождения, но слагают тела более сложной морфологии.

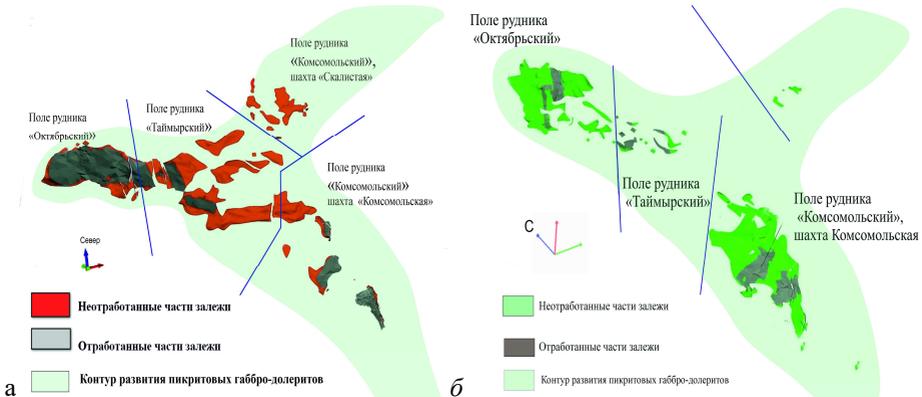


Рис. 4. 3D модели каркасов рудных тел богатых (а) и медистых (б) руд Октябрьского месторождения (ГИС Micromine)

Главными минералами руд являются моноклинный и гексагональный пирротин (по данным минераграфических исследований и РСМА), халькопирит, пентландит и магнетит. Богатая руда характеризуется следующим соотношением сульфидов (% масс. в расчете на 100% сульфидов): пирротин - 61, халькопирит - 24, пентландит - 15. Доля магнетита составляет 6 % масс, породных включений - 2 % масс. В залежах богатых руд на западном фланге наблюдаются пирротиновые зоны, в которых выделяются участки, обогащенные кубанитом. Содержание никеля (2,5-3,5%) и меди (12,3-14,0%) в кубанитовых рудах выше, чем в пирротиновых. Залежь богатых руд на западном фланге в настоящее время не вскрыта выработками, в то время как Хараелахская залежь в поле рудника «Октябрьский» в значительной степени отработана.

Медистые руды западного фланга являются прожилково-вкрапленными и имеют разнообразный минеральный состав. Они залегают преимущественно в осадочных породах среднего девона и в контактовых частях интрузива габбро-долеритов, локализуясь вокруг скоплений богатых руд и образуя вокруг них своеобразный ореол. По уровню локализации медистые руды Октябрьского месторождения в целом подразделяются на верхние (развитые только в верхнем экзоконтакте Талнахского рудоносного интрузива, в полях рудников шахты «Комсомольская» и «Октябрьский») и нижние разновидности. На западном фланге Октябрьского месторождения тела медистых руд залегают в ангидрит-пироксеновых роговиках по породам среднего девона, которые содержат многочисленные линзы измененных габбро-долеритов с сульфидной вкрапленностью, и отвечают нижнему стратиграфическому уровню локализации таких тел в центральной части месторождения. Пластообразные тела медистых руд характеризуются зональными изменениями минерального состава и текстур руд,

изменчивой морфологией, резкими колебаниями мощности и непредсказуемым поведением контактов, осложненных более поздней тектоникой. Тела медистых руд контролируются в основном поверхностями контактов апофиз интрузива с вмещающими породами, а также тектоническими зонами между апофизами интрузива.

По минеральному составу выделяются пирротиновые, пирротин-халькопиритовые, халькопиритовые, халькопирит-борнитовые и халькозин-борнитовые разности медистых руд. Эти руды также характеризуются относительно низкими содержаниями условного Ni и, по сути, являются продолжением залежей богатых руд, но с рудами более низкого качества.

Вкрапленные руды локализуются в горизонтах пикритовых габбро-долеритов и составляют основной объем руд изученной части западного фланга Октябрьского месторождения. Они образуют выдержанную по площади, практически непрерывную линзообразную залежь. В разрезе нижняя граница залежи вкрапленных руд совпадает с подошвой интрузива, а верхняя - с кровлей горизонта пикритовых габбро-долеритов. На западном фланге Октябрьского месторождения залежь вкрапленных руд, оконтуренная по показателям кондиций, распадается на более мелкие рудные тела небольшой мощности, размещенные на нескольких горизонтах.

Вкрапленные руды западного фланга Октябрьского месторождения являются полиминеральными и содержат весьма обширный комплекс сульфидов, селенидов, теллуридов, арсенидов, сульфоарсенидов, интерметаллидов, самородных элементов, окислов и др. Главными минералами руд являются пирротин (моноклинный и гексагональный), халькопирит и пентландит, реже троилит, кубанит и валлериит. Повсеместно в рудах среди сульфидов встречается титаномагнетит. Преимущественным распространением на западном фланге Октябрьского месторождения пользуются халькопиритовые вкрапленные руды, в отличие от центральной части Хараелахской интрузии, где преобладают халькопирит-пирротиновые и кубанит-пирротиновые вкрапленные руды.

Для всех рудных тел на западном фланге месторождения характерна сложная морфология, отличающаяся от центральной части месторождения. По рассчитанным показателям кондиций все рудные залежи на флангах имеют более высокую группу сложности, по сравнению с центральной частью месторождения. Это должно учитываться в дальнейшем при эксплуатационной разведке фланга месторождения, а также при выборе системы обработки месторождения.

Результаты изучения морфологии рудных тел и минерального состава руд на фланге Октябрьского месторождения позволяют сформулировать первое защищаемое положение: *На западном фланге Октябрьского месторождения линзовидные тела сульфидных Cu-Ni руд: богатых, медистых и вкрапленных - пространственно связаны, образуют субгоризонтальную рудную зону, располагаясь в ней на нескольких горизонтах. Морфология рудных тел определяется постепенным выклиниванием Хараелахского интрузива и*

погружением его в юго-восточном направлении, контурами развития рудовмещающих пикритовых габбро-долеритов, уменьшением их мощности и сменой их по латерали безрудными оливинсодержащими и безоливиновыми габбро-долеритами.

Второе защищаемое положение раскрыто в главе 4 и основывается на геохимических данных, полученных автором работы в результате изучения рудовмещающих пикритовых габбро-долеритов в западной части Хараелахского интрузива, которой отвечает западный фланг Октябрьского месторождения.

Рудные тела Октябрьского месторождения приурочены к горизонтам пикритовых габбро-долеритов, являющихся типоморфным признаком рудоносных интрузивов норильского типа.

Минеральный состав этих пород (об. %): плагиоклаз (45–60), клинопироксен (25–35), ортопироксен (0–5), оливин (0–2), биотит-флогопит (1–3). Из аксессуарных минералов встречены сфен, апатит, бадделейт, циркон. Одной из особенностей нижнего пикритового горизонта является его обогащённость Cr и Ti , в этих породах отмечается повышенное содержание ильменита и шпинелидов ряда хромитаномагнетита [Криволицкая, 2014].

Интерпретация ИК-спектров породообразующих минералов в горизонте пикритовых габбро-долеритов позволила установить некоторые закономерности, отмеченные впервые в краевой части Хараелахского интрузива.

Плагиоклазы в пикритовых габбро-долеритах характеризуются несколькими генерациями, каждая из которых характеризуется узким диапазоном изменения составов (рис.5).

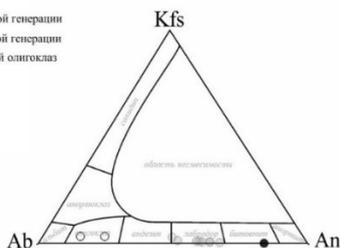


Рис. 5. Состав плагиоклаза разных генераций по данным микрозондового анализа в пикритовых габбро-долеритах западной ветви Хараелахского интрузива (скважины ЗФ).

Эта группа минералов характеризуется широким диапазоном содержаний элементов-примесей, что отражается на их спектрах поглощения (рис. 6).

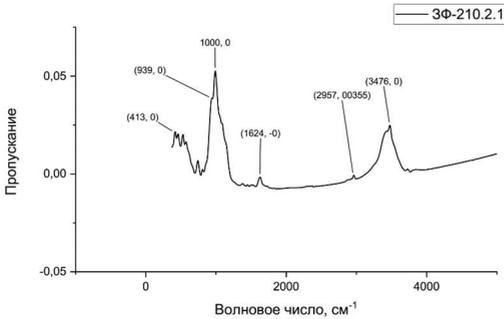


Рис. 6. Типичный спектр плагиоклаза (An53, по данным МРСА) из пикритовых габбро-долеритов Хараелахской интрузии.

Наличие элементов-примесей в кристаллической решетке вызывает смещение пиков спектров, масштабы которого пропорциональны содержанию примесей. Систематические исследования позволили установить направленное изменение состава для ранних и поздних генераций плагиоклазов в габбро-долеритах Хараелахской интрузии. Так, в пикритовых габбро-долеритах более ранние генерации представлены преимущественно лабрадором и битовнитом, поздние генерации имеют вариации состава от андезина, до олигоклаза. ИК-исследования также показали, что наиболее характерны для кристаллической решетки плагиоклазов в пикритовых габбро-долеритах примеси FeO (рис. 7).

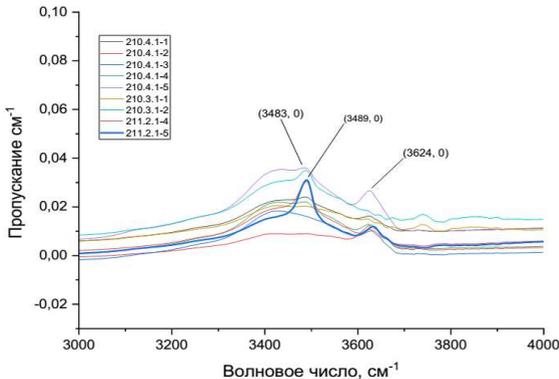


Рис. 7. Фрагмент ИК-спектров в диапазоне 3000–4000 см⁻¹. Изменение положения пика, в зависимости от содержания FeO.

Концентрация Fe в плагиоклазах пикритовых габбро-долеритов составляет в среднем 0,67 масс.%. Максимальное значение содержания Fe выявлено в плагиоклазах из горизонтов пикритовых габбро-долеритов, по контуру распространения которых, определяется морфология рудных тел. Таким образом нижние дифференциаты (пикритовые габбро-долериты) характеризуются плагиоклазами с повышенным, а верхние – безрудные – пониженными значениями содержания изоморфной примеси Fe в плагиоклазах.

Минералы группы клинопироксена образуют крупные (до трех мм) ксеноморфные зёрна. Их состав варьирует от авгита до диопсид-геденбергита. Интерпретация ИК-спектров клинопироксенов позволила установить, что наиболее распространенным минералом группы клинопироксена является авгит с содержанием Ca от 20 до 45 м.%. Все изученные авгиты в рудоносных габбро-

долеритах Хараелакского интрузива имеют повышенные содержания Mg по сравнению с Fe (рис. 8, 9), а также в них отмечается повышенное содержание примеси TiO_2 . По аналогии с плагиоклазом широкое развитие железистого клинопироксена в пикритовых габбро-долеритах также указывает на их рудоносность и значимость Fe в породообразующих минералах рудовмещающих горизонтов.

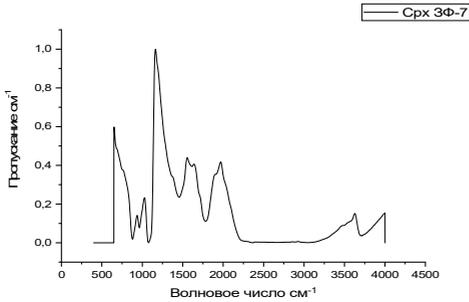


Рис. 8. Идентификационные линии поглощения эталонного авгита (пикритовый габбро-долерит).

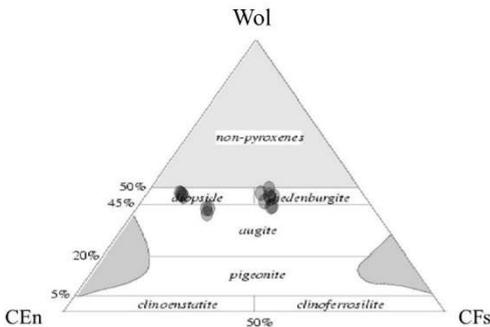


Рис. 9. Составы клинопироксенов (в мольных долях клиноэнстатита клиноферросилита и волластонита) пикритовых габбро-долеритов западной ветви

Титаномагнетит и *ильменит* встречаются в виде сростаний различной морфологии. Присутствуют сростки, где в идиоморфных зёрнах титаномагнетита заключены пластинчатые выделения ильменита (рис. 10 а), и концентрически-зональные агрегаты, в которых ильменит слагает центральные зоны, а титаномагнетит – краевые (рис. 10 б). В некоторых зёрнах ильменита можно наблюдать тончайшие ламели распада.

Составы титаномагнетита и ильменита из сростаний, в целом, типичны для базит-гипербазитовых массивов [Ivanuyk et al., 2017]. В них присутствует значительная примесь магния (до 1,6 мас.% MgO в титаномагнетите и до 3,8 мас.% в ильмените), в титаномагнетите отмечается высокое содержание ванадия (до 1,2 мас.% V_2O_3), в ильмените встречается примесь циркония (до 0,2 мас. % ZrO) (рис.11).

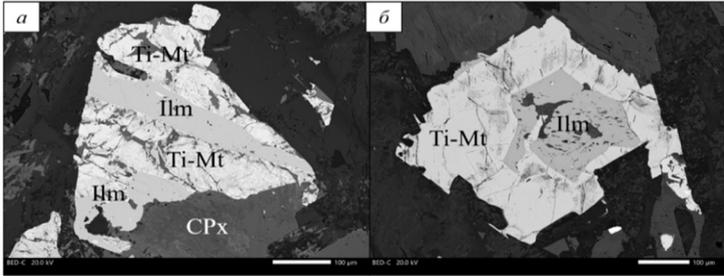


Рис.10. а – эпитаксиальное срастание, закономерно нарастающее на зерно клинопироксена, б – концентрически-зональный агрегат. Фото с электронного масс-спектрометра в режиме отражённых электронов.

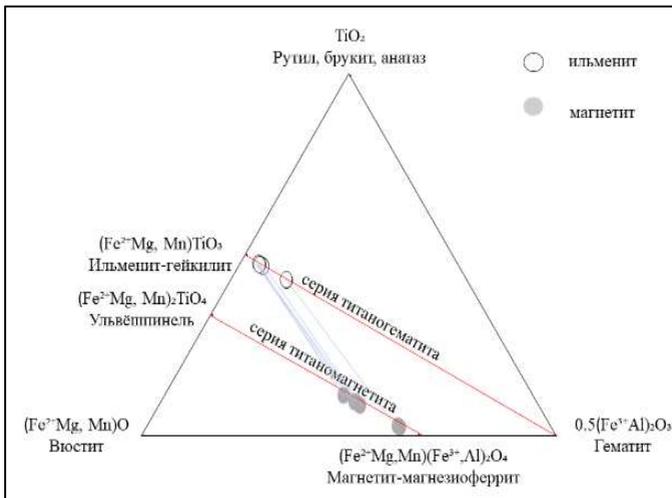


Рис. 11. Составы магнетит-ильменитовых пар (соединены голубыми линиями) по данным микрозондового анализа.

Хромшпинелиды в исследуемых породах обнаружены исключительно в виде мелких (до 5 мкм) идиоморфных включений в зёрнах оливина. По составу они соответствуют титанистому алюмохромиту и схожи с хромшпинелидами из аналогичного горизонта Талнахского интрузива (рис. 7), проанализированными ранее [Спиридонов Э.М., 2010]. Однако, по сравнению с теми же минералами в рудоносных габбро-долеритах Талнахского интрузива, хромшпинелиды западной ветви Хараелахского интрузива, в среднем, менее магниезильные и более обогащены глинозёмом (рис. 12). При этом наблюдается общее для обеих ветвей интрузива увеличение содержания Cr, Fe и Ti за счет уменьшения содержания Al. Согласно гипотезе Э. М. Спиридонова (устное сообщение), такой тренд возможен при кристаллизации на фоне понижения давления, т. е. в процессе подъема расплава из глубинного источника.

Первичные минералы габбро-долеритов подвержены вторичным изменениям, связанным с пострудными процессами, интенсивность проявления которых

возрастает по мере удаления от осевой зоны интрузива. Плагноклаз замещается сосюритовым агрегатом, эпидотом и альбитом, по мафическим минералам развиваются хлорит и серпентин, а также появляются тонкие прожилки и вкрапленники пирита. Титаномагнетит и ильменит при этом слабо подвержены изменениям и сохраняются даже в тех породах, где силикаты замещены практически полностью. В образцах из скважин западного фланга Октябрьского месторождения с трудом различима первичная магматическая структура породы, фактически, они представляют собой тонкозернистый агрегат вторичных минералов.

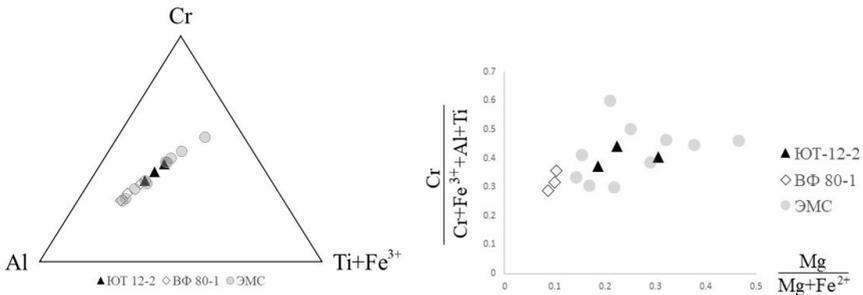


Рис. 12. Сравнение составов хромитинелидов из пикритовых габбро-долеритов Хараелахского интрузива и из пикритовых габбро-долеритов Талнахского интрузива (ЮТ-12-2, ВФ 80-1 – данные автора, ЭМС – данные Э.М. Спиридонова [2019, 2020, 2021]).

Таким образом, в рудоносных пикритовых габбро-долеритах Хараелахского интрузива устанавливаются несколько генераций породообразующих и аксессуарных минералов. Они различаются определенным набором элементов-примесей и изменениями состава в пределах изоморфных рядов. Указанные закономерные изменения составов минералов рудоносных пикритовых габбро-долеритов могут быть использованы при дальнейшей разведке флангов месторождений Талнахского рудного узла в качестве косвенных поисковых признаков.

В наибольшей мере это относится к плагноклазам, что делает их важным минералогическим индикатором рудоносности. Анализ Фурье ИК-спектров плагноклазов из пикритовых габбро-долеритов позволил установить их обогащенность Fe. Изученное распределение примесей в рудоносных пикритовых габбро-долеритах указывает на прямую корреляцию содержания примеси Fe с рудоносностью габбро-долеритов.

Результаты изучения минералого-геохимических особенностей рудовмещающих пород позволяют сформулировать второе защищаемое положение: *Рудовмещающие пикритовые габбро-долериты западной части Хараелахского интрузива содержат несколько генераций породообразующих и аксессуарных минералов, различающихся составом в пределах изоморфных рядов и определенным набором элементов-примесей. По мере приближения к рудным телам в пикритовых габбро-долеритах закономерно растёт основность плагноклаза и увеличение в его составе примеси Fe, повышаются*

железистость клинопироксена и содержание в нём TiO_2 .

Третье защищаемое положение базируется на результатах изучения минерального состава и текстурно-структурных особенностей вкрапленных руд на западном фланге Октябрьского месторождения, изложенных в главе 5.

Вкрапленные руды являются наиболее распространенным промышленным типом медно-никелевых руд. В большей части интрузивного массива скопления таких руд являются морфологически наиболее простыми, поскольку прослеживаются почти повсеместно, в соответствии с общей выдержанностью обоих горизонтов. Наиболее сложное строение горизонты вкрапленных руд имеют на фланге интрузива, где он расщепляется на серии апофиз. В нижней части интрузива они образуют лентовидное тело, протягивающееся вдоль всей ветви интрузива. В последнее время они постепенно вовлекаются в разработку по мере отработки богатых руд. Несмотря на широкое распространение этого типа руд, факторы контроля участков, где они в основном сконцентрированы, до сих пор не определены, это усложняет проведение эксплуатационно-разведочных и поисковых работ на флангах месторождения.

Анализ морфологии включений рудных минералов в изученных образцах пирротиновых вкрапленных руд позволил подразделить их на три типа, различающихся по текстурно-структурным характеристикам (рис. 13):

(1) каплевидный, (2) интерстициальный и (3) каплевидно-интерстициальный (переходная разновидность).

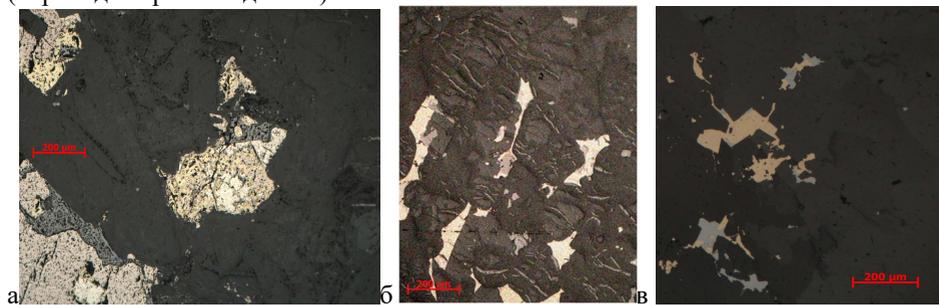


Рис. 13. Типы сульфидных включений во вкрапленных рудах западного фланга Октябрьского месторождения: а – каплевидный, б – интерстициальный, в – каплевидно-интерстициальный.

Руды с каплевидной текстурой (первый текстурно-структурный тип) широко распространены на Октябрьском месторождении, но на флангах встречаются реже чем в центральной части Хараелахского интрузива. Морфологию вкрапленности этого типа можно описать как крупно-каплевидную, для неё характерны крупные каплевидные вкрапленники, иногда соединенные между собой тонкими ветвящимися сульфидными прожилками.

В рудах с интерстициальной сульфидной вкрапленностью (второй текстурно-структурный тип) капли как таковые отсутствуют. Сульфидные агрегаты выполняют интерстиции между породообразующими минералами.

Неравномерная каплевидно-интерстициальная сульфидная вкрапленность

(третий текстурно-структурный тип) является промежуточным типом между двумя первыми. В этом случае сульфиды образуют и интерстициальную вкрапленность, и капли, но в отличие от оруденения первого типа, капли распределены неравномерно и имеют относительно малый размер и менее изометричную форму. В образцах каждого текстурно-структурного типа выделенных руд установлено четыре группы фаз, различающихся по степени поглощения рентгеновского излучения. Каждая морфометрическая характеристика несет в себе информацию о геометрических параметрах минеральных выделений и их распределении, и концентрации в образце. Точные значения рассчитанных морфометрических характеристик позволяют с высокой точностью определить свойства обогатимости руд. Одна из минеральных фаз представлена рудными минералами (сульфидами и оксидами). Для них были рассчитаны объем, площадь поверхности минерального агрегата, 3D-фрактальная размерность и анизотропия (рис. 14, табл. 1).

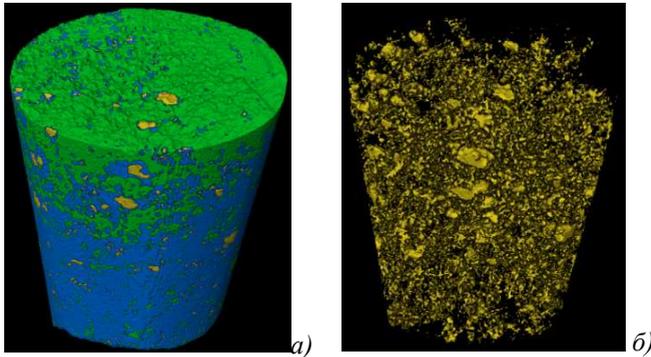


Рис. 14. *а* – общая картина распределения фаз в руде; *б* – трёхмерное распределение фазы 2.

Таблица 1.

Выделенные рентгеноплотностные фазы по данным 3D-томографии

Фаза	Минералы
Фаза-1	Минералы платиновой группы, галенит
Фаза-2	Сульфиды и оксиды железа: пирротин, пентландит, халькопирит, кубанит, пирит, ильменит, минералы группы шпинели
Фаза-3	Оливин, пироксен, амфибол, биотит, мусковит
Фаза-4	Плагиоклазы, тальк, серпентин

Фрактальный анализ показал, что трехмерная фрактальная размерность рудной фазы для первого типа минерализации составляет в среднем 1,97, для второго типа минерализации – 1,83, для третьего типа – 1,99. Двухмерная фрактальная размерность сульфидных агрегатов оруденения первого типа в среднем составляет 1,15, второго типа – 0,86, а третьего – 1,04. Сопоставив эти значения, можно увидеть, что они для каждого типа оруденения отличаются примерно на единицу, что согласуется с правилом Мандельброта [Mandelbrot,

1982]. Трехмерная томография также показала, что структуры сульфидных агрегатов различного размера подобны, то есть являются топологически регулярными структурами, что согласуется с механизмом формирования руд за счет ликвации и «оседании капель сульфидного дождя» [Спиридонов, 2010] и может являться косвенным подтверждением этих процессов.

С помощью 3D томографии установлено также, что фрактальная размерность рудной фазы в каплевидных рудах практически не отличается от фрактальной размерности в интерстициальных и каплевидно-интерстициальных рудах. Это дает основание предположить, что все эти типы вкрапленных руд будут близки по свойствам обогатимости. Таким образом, фрактальная размерность может являться индикатором определенных текстурных типов руд, что позволяет использовать их анализ для решения технологических проблем при переработке руд.

Полученные результаты позволяют сформулировать третье защищаемое положение: *Наиболее распространенные на западном фланге Октябрьского месторождения каплевидные и каплевидно-интерстициальные вкрапленные руды не различимы по фрактальной размерности, что позволяет предполагать близость их свойств обогатимости и возможность совместной переработки этих руд. Структуры сульфидных агрегатов различного размера в них математически самоподобны. Это подтверждает формирование рассматриваемых руд в ходе единого геологического процесса, вероятно - ликвации.*

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги исследования. Полученные в работе новые результаты расширяют знания о рудных телах на флангах Октябрьского месторождения, а также о геохимических особенностях рудовмещающих пород и типах руд.

Западный фланг Октябрьского месторождения характеризуется сложным геологическим строением и развитием всех типов руд: богатых, медистых и прожилково-вкрапленных, которые пространственно связаны и образуют субгоризонтальную рудную зону, в которой выделено несколько горизонтов залежей промышленных типов руд. Как и в осевых зонах интрузивных ветвей, морфология рудных тел определяется контуром развития пикритовых и такситовых разновидностей габбро-долеритов.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.

Полученные в ходе работы выводы позволили сформулировать несколько практических рекомендаций, которые могут быть полезны при дальнейших геологоразведочных и эксплуатационных работах на флангах месторождений Норильского района. Из первого защищаемого положения следует, что для наиболее продуктивной доразведки фланговых частей Октябрьского месторождения, необходимо учитывать геологические факторы, требующие изменения методики разведки. Выводы, полученные из второго защищаемого положения, позволяют рекомендовать геохимические закономерности, выявленные в рудоносных горизонтах краевой части интрузива, как дополнительный поисковый критерий при поиске «слепых» рудных тел в апофизах рудоносного интрузива. Систематическое изучение текстурно-структурных особенностей вкрапленных руд, обозначенных в третьем защищаемом положении, позволяет при помощи математической интерпретации выявить свойства руд, необходимые для выбора правильной технологии обогащения.

Таким образом выявленные закономерности важно учитывать в дальнейших поисково-оценочных и геологоразведочных работах, проводимых в Норильской металлогенической провинции, а также на других подобных месторождениях. Учет этих закономерностей позволяет повысить эффективность работ по расширению минерально-сырьевой базы Норильской металлогенической провинции, что является важнейшей задачей поисковых работ, проектируемых в предстоящий период.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в журналах Scopus, Web of Science (WoS), RSCI или включенных дополнительный список изданий, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности и отрасли наук:

1. **Крылов И. О.**, Никулин И. И., Самсонов А.А., Коршунов Д.М., Вильданов Д.И. Новые данные о составе плагиоклаза на западном фланге Октябрьского месторождения по данным инфракрасной спектроскопии // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 2022. № 2. С. 27–39. RSCI (0,81 п.л., авторский вклад 70%). DOI: 10.33623/0579-9406-2022-2-27-39. Импакт-фактор РИНЦ: 0,38.
2. **Крылов И. О.**, Никулин И. И. Новые данные об условиях локализации и составе сульфидных медно-никелевых руд западной части Октябрьского месторождения Норильского района // Вестник Московского университета. Сер.4. Геология. 2023. № 3. С. 98 – 112. RSCI (0,94 п.л., авторский вклад 80%) DOI: 10.55959/MSU0579-9406-4-2023-63-3-98-112. Импакт-фактор РИНЦ: 0,38.
3. Никулин И. И., Калашников А. О., **Крылов И. О.**, Михайлова Ю. А., Грошев Н. Ю., Кадыров Р. И. Фрактальный анализ состава и строения сульфидных вкрапленных руд в пикритовых габбро-долеритах Октябрьского месторождения (Норильский рудный узел) // Вестник Московского университета. Сер.4. Геология. 2023. № 1. С. 60–74. RSCI (0,88 п.л., авторский вклад 50%) DOI: 10.55959/MSU0579-9406-4-2023-63-1-60-74. Импакт-фактор RINC 0,38.

Учебное пособие:

4. Никулин И.И., Радько В.А., Самсонов А.А., Вильданов Д.И., Коршунов Д.М., **Крылов И.О.** Топоминералогическое картирование интрузий Норильского района по данным инфракрасной спектроскопии: Методическое пособие. Под общ. ред. В.И. Старостина. Москва. Издательство: ВНИИ-геосистем, 2020. 108 с. (6,75 п.л., авторский вклад 15%).

Иные публикации:

5. **Крылов И. О.** Типоморфные особенности клинопироксенов в породах интрузий Норильского типа. // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН (18)18, С. 223-226, 2021. (0,25 п.л.).
6. **Крылов И. О.**, Лыков Н. А. Возможная роль палеозойских отложений в образовании месторождений Норильской металлогенической провинции // Экзолит - 2023. Новаторская литология Фролова: общее и частное. Сборник научных материалов. М.; МАКС Пресс. 2023. С. 98-101. (0,25 п.л., авторский вклад 80%).