



Марфин Александр Евгеньевич

**ВОЗРАСТ И ГЕНЕЗИС СУЛЬФИДНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ ОКТЯБРЬСКОГО
МЕСТОРОЖДЕНИЯ, ТАЛНАХСКИЙ РУДНЫЙ УЗЕЛ**

Специальность 25.00.04 – Петрология, вулканология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата геолого-минералогических наук

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Актуальность исследования обуславливается наличием множества противоречащих друг другу гипотез образования Октябрьского месторождения в целом и в особенности широко развитых в пределах этого месторождения прожилково-вкрапленных руд. Остаются нерешенными вопросы: связаны ли все три типа выделяемых руд (вкрапленных, массивных и прожилково-вкрапленных) с единым геологическим процессом, связано ли сульфидное оруденение исключительно с магматизмом, только с постмагматическими процессами или носит смешанный характер, являются ли процессы оруденения одновозрастными формированию Хараелахской интрузии?

Цель работы: Целью является изучение руд Октябрьского месторождения и вмещающих их пород с минералого-геохимической, петрологической и геохронологической точек зрения.

Задачи исследования:

1. Изучить типохимизм халькопирита – сквозного минерала всех трех типов руд Октябрьского месторождения;
2. Выяснить характер метасоматических и метаморфических изменений в контакте Хараелахской интрузии и вмещающих пород. Оценить максимальные температуры контактового метаморфизма;
3. Методами in-situ U-Pb геохронологии определить возраст минералов, находящихся в парагенетической ассоциации с сульфидами прожилково-вкрапленных руд;
4. Сделать вывод о генезисе сульфидного оруденения.

Объектом исследования в данной работе является PGE-Cu-Ni Октябрьское месторождение.

Предметом исследования выступали массивные, вкрапленные и прожилково-вкрапленные руды Октябрьского месторождения, а также вмещающие, метаморфические и метасоматические породы эндо- экзоконтакта.

Методологическая основа и методы исследования заключается в применении прецизионных методов определения микроэлементного состава в халькопирите различных типов руд методом LA-ICP-MS, а также изотопных отношений свинца и урана в урансодержащих минералах (титаните, апатите, перовските и гранате).

Фактический материал. В основе диссертации лежит каменный материал, собранный автором из керна скважин эксплуатационной разведки различных участков во время работы геологом на Октябрьском месторождении в 2018-2019 гг. Коллекция образцов представлена тремя выделяемыми типами руд Октябрьского месторождения, а также вмещающими породами рамы.

Защищаемые положения:

1. Из халькопирита трех главных промышленных типов руд Октябрьского месторождения (вкрапленных, массивных и прожилково-вкрапленных), наиболее контрастным по составу является халькопирит прожилково-вкрапленных руд. На основании распределения концентраций Se, Te, Pb и Cd можно уверенно отличать халькопирит прожилково-вкрапленных руд от халькопирита массивных и вкрапленных руд.
2. В верхнем контакте Хараелахской интрузии широко проявлено ороговикование и скарнирование вмещающих пород. Среди высокотемпературных контактовых метаморфических пород наиболее проявлены породы пироксен-роговиковой фации. Температура их образования находится в интервале 720 ° – 820 °С.
3. Рудная минерализация в эндо- и экзоконтактных породах Октябрьского месторождения генетически ассоциирует с метаморфическими (титанит) и метасоматическими (титанитом, апатитом, перовскитом, гранатом) минералами. Их возраст, оцененный U-Pb методом, в пределах погрешности измерений совпадает с возрастом Хараелахской интрузии ~ 252 млн лет.

Научная новизна работы.

1. Подробно охарактеризован халькопирит всех трех типов руд Октябрьского месторождения, предложена схема классификации халькопирита по содержанию в нем элементов-примесей, причем для прожилково-вкрапленных руд это сделано впервые. Показано, что халькопирит является надежным индикаторным минералом для выяснения особенностей распределения элементов-примесей в ходе кристаллизации сульфидных руд. Предложена основанная на методах математической статистики схема разделения халькопирита по содержаниям Se, Te, Cd и Pb, позволяющая привязывать этот минерал к конкретному типу руд. Аналогичные статистические

схемы типизации минералов использовались ранее для циркона, апатита, граната и пирита. Для халькопирита подобный статистический анализ приведен впервые.

2. Методами in-situ U-Pb геохронологии определены значения возраста титанита, апатита, граната и перовскита из пород верхней эндо- и экзоконтактной зоны Октябрьского месторождения. Аналогичный метод in-situ датирования таких минералов является достаточно широко распространенным, но применение для четырех минералов одновременно – достаточно редко. Кроме того, для данного изучаемого объекта такое датирование выполнено впервые.

3. Впервые дана численная оценка температуры контактового метаморфизма в кровле Хараелахской интрузии с использованием мономинерального термометра, основанного на содержании Zr в титаните. Ранее оценка температур контактового метаморфизма на этом объекте оценивалась, исходя из минерального парагенезиса. Показана хорошая сходимость обоих подходов.

Теоретическая и практическая значимость. Новые данные, полученные в ходе работы, могут быть использованы как поисковые критерии при разведке месторождений в Норильском регионе. В частности, данные о типохимизме халькопирита могут быть использованы при поиске сульфидных руд в Норильском и, возможно, других регионах мира.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Настоящая диссертационная работа соответствует паспорту специальности 25.00.04 – «Петрология, вулканология», а именно в процессах изучения связи метаморфизма, метасоматизма и рудообразования с магматизмом в соответствии со следующими областями исследований:

Пункт 1 – магматическая геология: геологическое положение и геохронология магматических пород, магматические области и геодинамические обстановки их образования.

Пункт 3 – рудоносный магматизм: связь магматизма и оруденения, вещественная специализация и петрологические критерии оценки рудоносности магматических комплексов, петрологические факторы образования рудных концентраций.

Пункт 5 – метаморфизм: фазовые равновесия минералов, определение P-T-параметров и реконструкции P-T-трендов, связь метаморфизма с магматизмом, метаморфогенное рудообразование.

Личный вклад. Автор принимал непосредственное участие на всех этапах исследований, при постановке задач, сборе образцов к исследованию, подготовке их к аналитическим работам и, частично, при выполнении собственно анализов, обработке полученных результатов, интерпретации новых и литературных данных.

Апробация результатов и публикации. Результаты, полученные в ходе диссертационного исследования представлены в 13 печатных изданиях, среди них в 2 рецензируемых журналах (Minerals, Economic Geology), входящих в Web of Science Core Collection. Основные результаты были опробированы на конференциях в Иркутске, Москве, Томске, Санкт-Петербурге (2018, 2019, 2020).

Достоверность результатов обеспечивается собранным автором геологическим материалом, применением современных аналитических методов и публикациями, входящими в WoS.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из 6 глав, введения, заключения и 7 приложений. Общий объем работы составляет 122 страниц печатного текста, в том числе 35 рисунков, 6 таблиц, список использованной литературы включает 158 наименований.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю, д.г.-м.н. профессору РАН Иванову Алексею Викторовичу без чьей неоценимой помощи данная работа не была бы написана. Так же автор благодарит к.г.-м.н., «New Star Professor» Университета Тасмании Каменецкого Вадима Семеновича за проведение работ по U-Pb датированию методом LA-ICPMS и многочисленные консультации, которые внесли неоценимый вклад и помогли улучшить данную работу. Настоящее исследование стало возможным при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-35-90013 и по программе «мегагрантов» по постановлению р220 Правительства РФ № 075-15-2019-1883. Автор выражает признательность сотрудникам Института земной коры СО РАН: Демонтеровой Е.И., Пашковой Г.В., Уховой Н.Н. за помощь в интерпретации результатов аналитических данных. Автор выражает благодарность сотрудникам Института геохимии СО РАН – Радомской Т.А. за помощь в описании аншлифов руд и Митичкину М.А. за помощь в изготовлении аншлифов, Томского политехнического университета – Якич Т.Ю. за аналитические исследования руд методом SEM EDS, ИГЕМ РАН – Абрамовой В.А. за аналитические исследования халькопиритов методом LA-ICPMS. Так же автор выражает благодарность сотрудникам «Норильскгеологии», содействовавших в отборе каменного материала, и коллегам по

работе на руднике «Октябрьский» - Батяеву Е.А., Едемской А.В., а также всем тем, кто консультировал и помогал автору на всех этапах подготовки работы.

Связь работы с научными проектами. Настоящее исследование стало возможным при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-35-90013 и по программе «мегагрантов» по постановлению р220 Правительства РФ № 075-15-2019-1883.

ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР И ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Активное изучение северо-запада Сибирской платформы началось в 20е годы XX века в связи с открытием медно-никелевого месторождения Норильск-1 [Урванцев, 1923; 1927]. К указанному периоду относятся работы Б.Н. Рожкова, И.Ф. Григорьева, А.Н. Розанова, Е.Г. Багратуни, В.С. Домарева, Ю.М. Шеймана и других [Багратуни, 1932; Годлевский, 1959]. Первое петрографическое описание лавовой толщи было выполнено Б.Н. Рожковым [Рожков, 1932]. В дальнейшем туфолавовую толщу и интрузивные породы изучали А.Н. Розанов, В.С. Домарев, В.К. Котульский, М.Е. Яковлева, В.С. Соболев [Годлевский, 1959]. На данный момент существует большое количество обобщающих работ по различным аспектам геологии траппов базальтов и рудоносных интрузий региона (см. [Рябов и др., 2000; Krivolutskaya, 2016; Малич и др., 2018] и ссылки там). Несмотря на значительные успехи в изучении данных образований, среди особо актуальных проблем можно выделить две: проблему возраста и проблему вещества. Первая связана с отсутствием четких геологических взаимоотношений между рудоносными интрузивами и траппами базальтов, в результате чего существует гипотеза о полигенном характере образования расслоенных норильских интрузий. Однако подавляющее количество высокоточных U-Pb CA-ID-TIMS датировок по циркону из пород интрузий указывает на узкий промежуток времени их образования [Kamo et al., 2003; Burgess and Bowring, 2015] (рис. 1), что находится в хорошей корреляции с палеомагнитными данными [Latyshev et al, 2020].

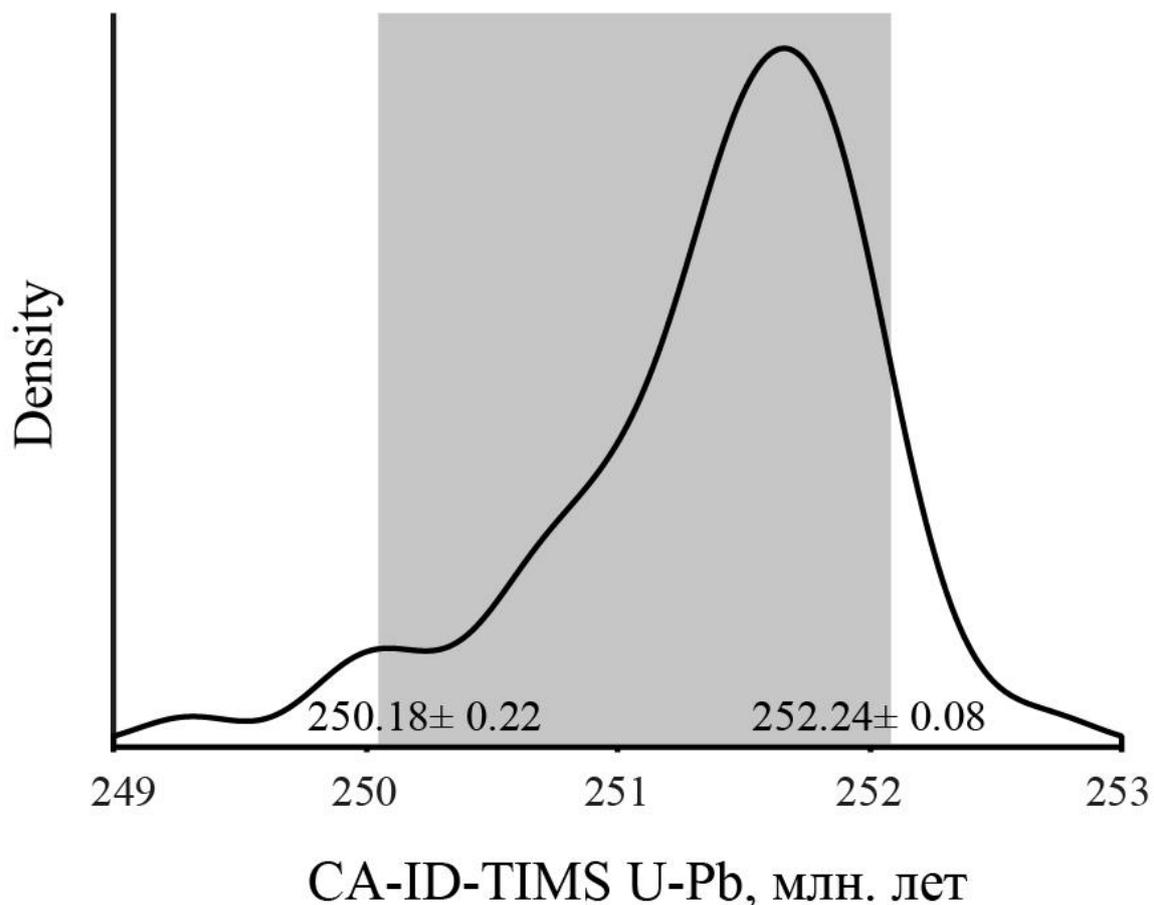


Рисунок 1. Кривая оценки плотности распределения U-Pb возрастов лав и интрузий провинции Сибирских траппов, полученных методом ID-TIMS (данные из работ [Burgess and Bowring, 2015; Kamo et al., 1996, 2003; Ivanov et al., 2021]). Серой зоной выделен промежуток 2.06 ± 0.23 млн. лет – длительность основной фазы магматизма Сибирских траппов.

У существующих методов датирования рудной минерализации (Re-Os, Pt-He) [Walker et al., 1994; Malych, Latypov, 2011; Якубович и др., 2015] погрешности и неопределенности оказываются слишком большими, чтобы решить вопрос соотношения магматизма и рудообразования.

Другая, не менее важная проблема заключается в вопросе, каким именно образом были сформированы уникальные по запасам PGE, Cu, Ni месторождения норильского региона. Существующие гипотезы множественны и противоречивы [Золотухин и др., 1975; Дюжиков и др., 1988; Радько, 1991; Naldret et al., 1996; Рябов и др., 2000; Туровцев 2002].

ГЛАВА 2. СТРОЕНИЕ И СУЛЬФИДНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ ОКТЯБРЬСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Октябрьское месторождение связано с Хараелахской интрузией и характеризуется наибольшим разнообразием типов руд и самыми значительными запасами Cu, Ni и PGE в регионе. Здесь выделяются по структурно-текстурным особенностям и положению относительно тела интрузии: массивные руды, прожилково-вкрапленные и вкрапленные (перечислены в порядке запасов рудного компонента). Хараелахский интрузив в плане представляет собой приблизительно равносторонний треугольник, длина сторон которого составляет 8-10 км, площадь около 30 км², при средней мощности интрузива 70 м [Туровцев, 2002]. Расслоенная серия пород Хараелахской интрузии аналогична расслоенной серии пород других рудоносных интрузивов. В Хараелахской интрузии сверху вниз выделяются следующие серии пород: *верхняя дифференцированная серия, основная дифференцированная серия, нижняя габбровая дифференцированная серия*. Кроме непосредственно магматических пород интрузии, широко распространены метаморфические и метасоматические породы в контактовом ореоле, которые на Октябрьском месторождении имеют сложное строение и являются зональными полифациальными, существенно пироксеновыми, контактово-метасоматическими комплексами. Зональность в них проявляется не только по нормали к интрузивным контактам, но и по латерали. В ореолах резко преобладают образования пироксен-роговиковой фации (мелилит-монтчеллитовая и гроссуляровая субфации). Непосредственно на контактах присутствуют роговики и мраморы спуррит-мервинитовой фации (установлены типоморфные минералы: санидин, тридимит, муллит, спуррит, мервинит). Габбродолериты на контактах преобразуются в двупироксен-плагиоклазовые роговики. Мощность зон ороговикования достигает 200 – 250 м, то есть превышает мощность интрузива.

Как уже было отмечено, Октябрьское месторождение связано с Хараелахской дифференцированной интрузией. Ввиду сложной морфологии последней это обуславливает сложное строение рудных тел. Тем не менее, на основании минерального состава и структурно-текстурных особенностей выделяются основные типы сульфидных руд: вкрапленные руды, залегающие в интрузивных породах, прожилково-вкрапленные («медистые») руды – во вмещающих породах кровли и в фронтальной части интрузии и массивные руды – в основании интрузии или во вмещающих породах под нею [Туровцев, 2002; Sluzhenikin et al, 2014]. Вкрапленные руды приурочены к горизонтам, сложенным пикритовыми, такситовыми, и реже контактными габбродолеритами. Массивные руды – наиболее важный промышленный тип рудной минерализации на месторождении. В большинстве случаев массивные руды локализованы во вмещающих метаморфических и метасоматических породах, на контакте с нижней границей распространения пород Хараелахской интрузии. Прожилково-вкрапленные руды, расположенные в метаморфических и метасоматических породах на контактах с рудоносными интрузиями, образуют внешние ореолы вокруг массивных рудных залежей.

3 ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Фактический материал представлен керном скважин, отобранным автором во время эксплуатационного бурения на Октябрьском месторождении в период 2018-2019 гг. и каменным материалом, отобранным во время экспедиции в Норильск в 2019 г. Общая информация о типах руд, их минеральном составе, концентрации рудных элементов описаны в многочисленных монографиях и журнальных публикациях, а также в производственных отчетах, посвященных PGE-Cu-Ni рудам норильско-талнахского региона. Ввиду этого кроме стандартных методов исследования (методы минераграфии, исследования прозрачных шлифов, сканирующая электронная микроскопия) были использованы методы, представленные в меньшем количестве исследований либо не представленных

вовсе (in-situ U-Pb датирование нециркониевых минералов, определение элементов примесей методом LA-ICP-MS).

Анализ основных элементов в сульфидах и пороодообразующих минералах и изображения в обратно рассеянных электронах (BSE) были получены с использованием сканирующих электронных микроскопов (SEM) Tescan Vega 3 SBU и Hitachi SU-70, оснащенных энергодисперсионными спектрометрами (EDS) Oxford Instruments (Абингдон, Великобритания) с системой микроанализа на базе Aztec в Томском политехническом университете (Томск, Россия) и в университете Тасмании (Хобарт, Австралия) соответственно.

Концентрации элементов-примесей в халькопирите определялись в полированных аншлифах методом LA-ICP-MS в лаборатории минерального анализа Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (Москва, аналитик Абрамова В.А.). Система LA-ICP-MS состоит из квадрупольного масс-спектрометра Thermo X series2, оснащенного лазером New Wave 213.

Для проведения процедуры кластеризации и построения деревьев классификации была использована свободная среда разработки RStudio.

U-Th-Pb геохронологические данные для апатита, титанита, перовскита и граната и содержания микроэлементов (для титанита и граната) были получены в университете Тасмании (Хобарт, Австралия) на квадрупольном ICP-MS Agilent 7900, соединенном с когерентным эксимерным ArF лазером (COMPex Pro 110), работающим на длине волны 193 нм, с длительностью импульса ~ 20 нс. Использовалась ячейка для абляции RESOlution/Laurin Technic S155 с постоянной геометрией.

ГЛАВА 4. МИКРОЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ ХАЛЬКОПИРИТА РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ РУД ОКТЯБРЬСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Халькопирит – основной рудный минерал меди, представленный на Октябрьском месторождении во всех типах руд – вкрапленных, прожилково-вкрапленных и массивных. Обладая сквозным характером, он потенциально подходит для исследования поведения микроэлементов в процессе образования различных типов руд. Удобство использования халькопирита заключается в первую очередь в меньшем количестве микровключений других минеральных фаз и отсутствии изобарных и молекулярных наложений при проведении LA-ICP-MS анализа. Однако считалось, что использование данных микроэлементного состава халькопирита является в общем случае менее предпочтительным по сравнению с другими сульфидами (например, пирит, галенит, сфалерит, борнит) [Cook et al., 2011; Cook et al., 2009; George et al., 2015; George et al., 2016; Maslennikov et al., 2009; Meffre et al., 2008].

Для целей данной диссертационной работы были измерены концентрации 14 микроэлементов в халькопирите из прожилково-вкрапленных (46 анализов), вкрапленных (25 анализов) и массивных (16 анализов) руд согласно методике, описанной в Главе 3.

Для выяснения особенностей поведения элементов-примесей в халькопирите различных типов руд Октябрьского месторождения, был применен аппарат математической статистики, включающий в себя кластерный анализ и «деревья» классификации. По результатам кластерного анализа показано, что элементы-примеси в халькопирите из различных типов руд Октябрьского месторождения демонстрируют сложное поведение и зачастую их вариации носят комплексный характер и зависят друг от друга. В этом случае для выяснения генетической принадлежности халькопирита к различным типам руд возможно использование классификационного метода, основанного на «дереве решений». Это стандартный статистический метод, доказавший свою эффективность, например, при классификации апатита, циркона, граната [Belousova et al., 2002a; Belousova et al., 2002b; Griffin et al., 2002; Griffin et al., 1999].

Для построения дерева классификации были использованы данные о содержании Se, Te, Cd, Pb. Выбор этих элементов осуществлен при помощи «проб и ошибок» и основан на оптимальном соотношении корректной классификации и минимального числа условий. В результате обработки данных с использованием выбранных элементов было получено следующее классификационное дерево (рис. 2). Данное классификационное дерево корректно разделяет халькопирит из различных типов руд с достоверностью ~86 % (отношение верно классифицированных зерен халькопирита к общему числу зерен в процентах).

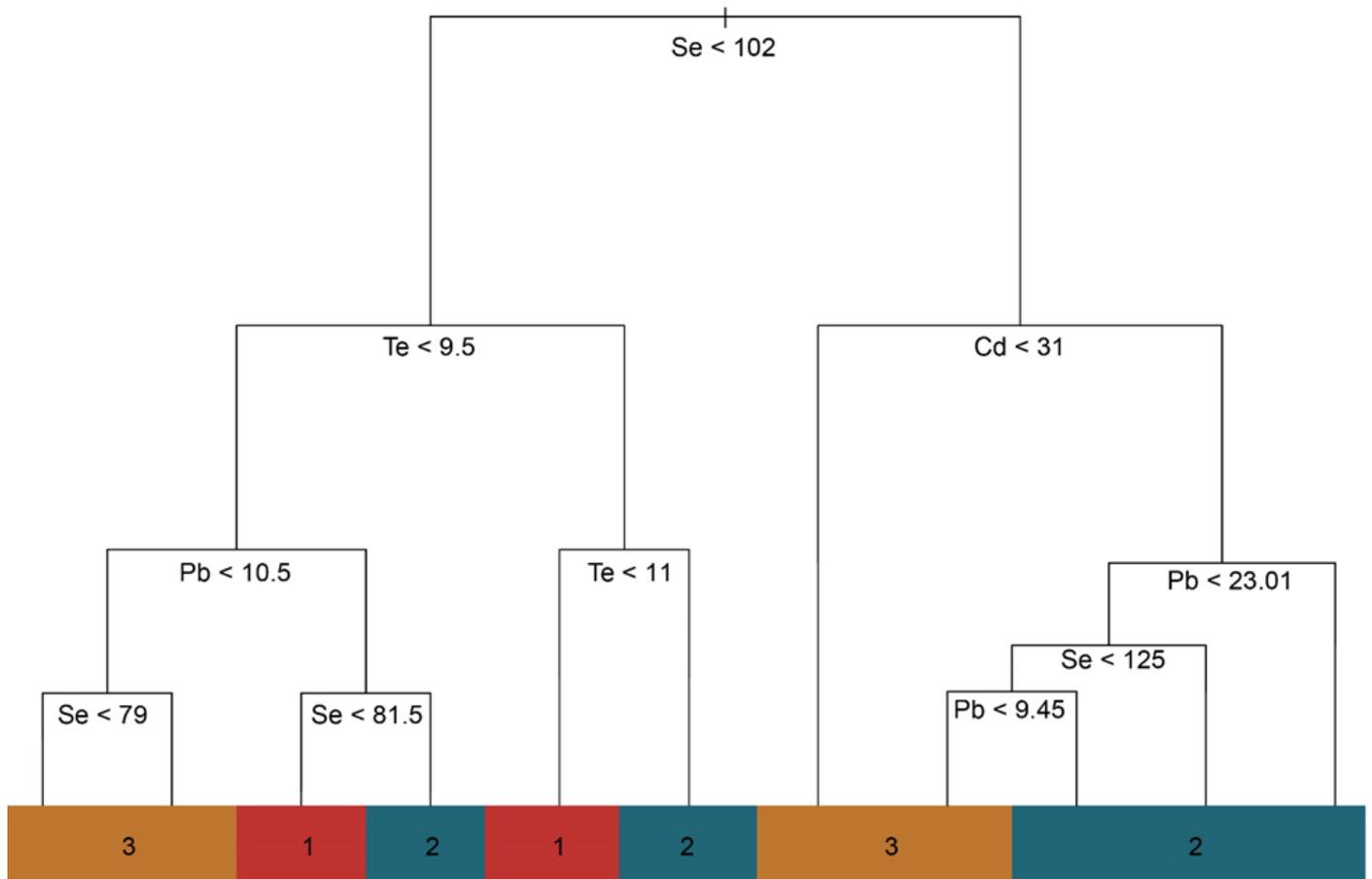


Рисунок 2. Предлагаемое дерево классификации для халькопирита Октябрьского месторождения. Разные цвета соответствуют различным типам руд; 1 – массивные руды, 2 – вкрапленные руды, 3 – прожилково-вкрапленные руды.

Использование полученного дерева классификации для отнесения халькопирита к одному из типов руд на независимых данных [Mansur et al., 2020] показывает 90% верных определений (в тестовой выборке весь халькопирит принадлежал массивным рудам). Это наглядно иллюстрирует, что классификация, предложенная в данном исследовании, работает по крайней мере для Октябрьского месторождения и не зависит от лаборатории, используемой для определения концентраций микроэлементов в халькопирите. Однако попытка использовать классификационное дерево на данных, приведенных для халькопирита из ледниковых отложений Северной Америки [Duran et al., 2019] дает только 50% совпадающих с типизацией халькопирита, предложенной в этой статье, что равносильно случайной классификации. Данный факт наводит на мысль, что общие классификации, предложенные в данном исследовании или в работах [Duran et al., 2019; George et al., 2018], скорее всего зависят от типа конкретных месторождений. Предложенный в этой работе классификационный алгоритм, вероятно, будет хорошо работать для месторождений норильского региона или других месторождений схожего генезиса, но может быть неприменим для других типов месторождений (например, SEDEX или VMS). Однако всё же основной проблемой использования халькопирита для генетической классификации является ограниченный набор эмпирических данных по халькопириту. С одной стороны, данное исследование несколько восполняет существующий пробел, но с другой стороны, так же иллюстрирует, что зачастую для выявления закономерностей необходимо использовать более сложные математические модели.

На основе предложенного дерева классификации и известных минеральных ассоциаций в различных типах руд можно выявить некоторые идеи относительно поведения элементов-примесей в халькопирите. Например, халькопирит вкрапленной руды в среднем богаче Cd и Pb, чем халькопирит двух других типов руд. Вероятно, это связано с тем, что исходный сульфидный расплав был богат этими элементами, а халькопирит кристаллизовался раньше галенита. Массивная руда, по-видимому, формировалась при агрегации сульфидных капель. Этот процесс шел уже после кристаллизации галенита, на что указывает в среднем более низкие концентрации Cd и Pb в халькопирите массивной

руды по сравнению с халькопиритом вкрапленной руды. Экспериментально было показано, что охлаждение сульфидного расплава от 700 °С до 400°С приводит к увеличению отношения Cu/Pb в расплаве в 3 раза, что свидетельствует о кристаллизации галенита при более высоких температурах, чем халькопирит [Mavrogenes et al., 2013]. Что касается распределения Se и Te в халькопирите, считается, что Se однородно распределяется между твердым раствором моносulfида (MSS) и промежуточным твердым раствором (ISS), тогда как Te более тяготеет к ISS [Patten et al., 2013]. В связи с этим нет никакой разницы между халькопиритом вкрапленных и массивных руд с точки зрения этих элементов, потому что эти руды являются продуктом эволюции MSS. Халькопирит прожилково-вкрапленных руд в среднем беднее всеми элементами-примесями по сравнению с двумя другими типами руд. Это может свидетельствовать о том, что прожилково-вкрапленная руда не является продуктом эволюции MSS и связана с другим процессом, например, ремобилизацией рудного вещества вследствие метаморфизма и метасоматоза.

ГЛАВА 5. ДАТИРОВАНИЕ МИНЕРАЛОВ ВЕРХНЕГО ЭНДО- И ЭКЗОКОНТАКТА ХАРАЕЛАХСКОЙ ИНТРУЗИИ

Как было отмечено выше, все предыдущие U-Pb датировки Хараелахской интрузии выполнялись для циркона или бадделейта. Между тем в породах расслоенной серии широко представлены титанит, апатит, гранат и перовскит. Последние два минерала особенно актуальны для Октябрьского месторождения, так как присутствуют в эндо- и экзоконтактах Хараелахской интрузии. Отдельно следует выделить перовскит, который встречается исключительно в прожилково-вкрапленных медно-никелевых рудах. Всего было отобрано 4 образца пород Октябрьского месторождения, представленных метасоматизированным роговиком (AM43), контактом габбродолерита и роговика (AM40), прожилково-вкрапленной рудой (AM19) и метасоматически измененным габброделеритом (AM18).

Особо обращают на себя внимание перовскит и гранат. В перовските обнаружены S, F, Cl содержащие фазы в качестве включений в кристаллах. Ввиду небольшого размера зерен данные фазы не могут быть надежно диагностированы, но с большой долей вероятности можно считать, что они соответствуют ангидриту, флюориту и галиту. Ангидрит и галит являются распространенными минералами в хемогенных осадочных девонских породах. Факт нахождения данных минералов в качестве включений свидетельствует об образовании перовскита *in-situ*. В результате чего часть первоначальных минералов осадочных пород была захвачена и сохранилась в качестве включений в перовските. Похожая ситуация наблюдается и с гранатом. Гранат присутствует в виде зерен, заключенных в халькопирит. Включения халькопирита также обнаруживаются внутри граната, что указывает на их парагенетическую ассоциацию. Особо стоит отметить на включения ангидрита, повсеместно обнаруживаемые в гранате. Это указывает на тот факт, что сульфидная минерализация в контактовом габбродолерите связана не с процессами ликвации, а с процессами метасоматоза. Т.е. шло одновременное формирование халькопирита, граната и ангидрита, последний, очевидно, является переотложенным из вмещающих толщ.

Также обращает на себя внимание различное поведение элементов-примесей в изученном титаните. Их анализ является мощным инструментом для понимания как генезиса титанита, так и служит основой для восстановления термической истории вмещающих пород (Cao et al., 2015; Fallourd et al., 2014; Gao et al., 2012; Gao et al., 2011; Hayden et al., 2008; Li et al., 2010; Sun et al., 2012). Титанит из контактового образца (AM40) имеет отрицательную европиевую аномалию, что возможно указывает на его одновременную кристаллизацию с плагиоклазом. Разброс значений концентраций для титанита из контактового образца незначительный, что, возможно, говорит о однородных условиях кристаллизации. Напротив, титанит из метасоматически измененного роговика (AM43) имеет более широкий диапазон концентраций микроэлементов, что, вероятно, указывает на изменчивые процессы кристаллизации, неоднородность исходного субстрата либо наложенные постмагматические процессы. С помощью информации о концентрации Zr в титаните можно оценить температуру его кристаллизации (термометр Zr-в-титаните) [Hayden et al., 2008]. Температура оценивалась в предположении, что давление во время кристаллизации составляло 1.5 кбар. Предполагаемое давление выбрано исходя из литостатического давления при мощности отложений над Хараелахской интрузией 4 км (такова максимальная наблюдаемая мощность туфолавоваы толщи в норильском регионе). Погрешность рассчитанных температур составляет около ± 20 °С [Hayden et

al., 2008]. Титанит из контакта габбродолерита и роговика показывает узкий диапазон температур кристаллизации от 720 ° С до 820 ° С, а титанит из метасоматически измененных роговиков – большие колебания температуры кристаллизации при меньших абсолютных значениях от 650 ° С до 820 ° С.

Апатит – распространенный урансодержащий минерал в магматических и метаморфических породах [Belousova et al., 2002a]. Апатит начинает кристаллизоваться ввиду низкой емкости основных породообразующих минералов по отношению к фосфору [Chew et al., 2011]. Это делает апатит значимым для целей U-Pb геохронологии [Chen and Zhang, 2018; Chen et al., 2019; Chew et al., 2011; Pochon et al., 2016], особенно в тех случаях, когда циркон или бадделлеит отсутствуют. По составу кристаллы апатита из образцов AM40 и AM43 различны, хотя все они относятся к апатиту, связанному с пневматолитовыми процессами [Серова, Спиридонов, 2018]. Апатит был датирован *in situ* в полированных аншлифах образцов AM40 и AM43, которые представляют собой контактовый образец габбродолерита и роговика и метасоматически измененного роговика соответственно. Возраст пересечения конкордии с дискордией составляет 258.2 ± 4.5 и 247.9 ± 5.1 для апатита из образцов AM40 и AM43, соответственно (рис. 3).

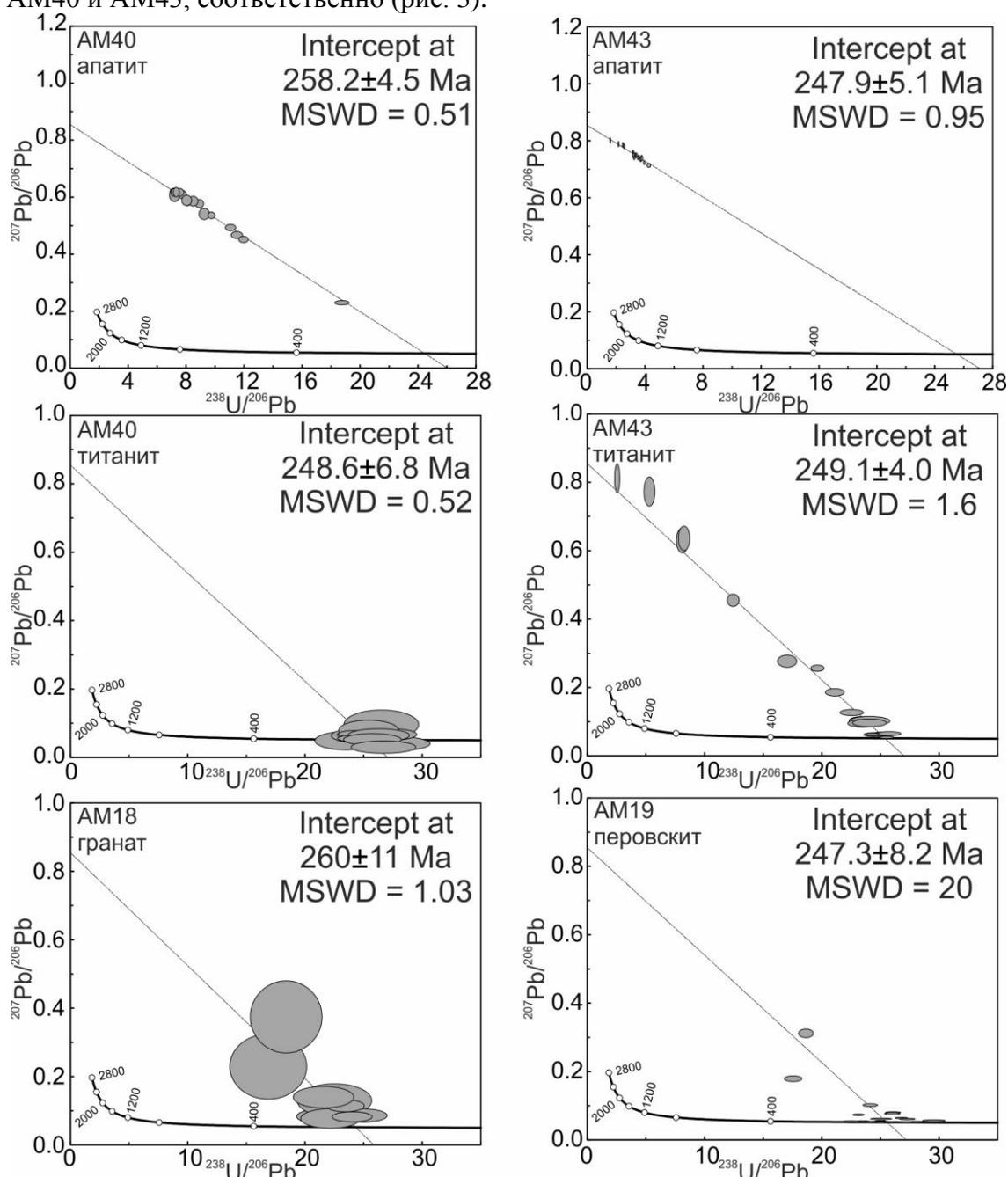


Рисунок 3. Диаграммы Терра-Васербурга для апатита, титанита, граната и перовскита из контактово-метасоматических пород Хараелакской интрузии.

Титанит – распространенный Ti-содержащий минерал на Октябрьском месторождении. Он встречается в магматических, метасоматических и метаморфических породах. Титанит используется в U-Pb геохронологии ввиду относительно высокой температуры закрытия (600-700 °C) [Cherniak, 1993; Scott and St-Onge, 1995; Sun et al., 2012]. Он используется для определения возраста пород различного состава [Cao et al., 2015; Fallourd et al., 2014; Fu et al., 2016; Sun et al., 2012]. Вычисленный возраст для образцов AM40 и AM43 составляет 248.6 ± 6.8 млн. лет и 249.1 ± 2.9 млн лет соответственно. Таким образом U-Pb значения возраста титанита из двух разных образцов идентичны (рис. 3).

Гранат гроссуляр-андрадитового состава – типичный скарновый минерал. На данный момент не существует исследований по оценке температуры закрытия U-Pb системы в гранате [Gevedon et al., 2018], считается, что она должна составлять >800 °C [Mezger et al., 1989]. Гранат успешно использовался в ряде геохронологических исследований [Deng et al., 2017; Gevedon et al., 2018; Seman et al., 2017; Salnikova et al., 2019]. Гранат был обнаружен в качестве включений в зернах халькопирита, он же содержит включения халькопирита. Пересечение дискордии с конкордией дает значение возраста 260 ± 11 млн лет (рис. 3).

Перовскит является обычным акцессорным минералом в щелочных ультраосновных и основных магматических породах и обычно применяется для датирования кимберлитов и карбонатитов [Abersteiner et al., 2019; Cox and Wilton, 2006; Reguir et al., 2010]. Кроме того, перовскит может кристаллизоваться в скарнах [Dawson et al., 2001; Starikova et al., 2014] и метаморфических породах [Shen et al., 2016]. Перовскит - типичный минерал в верхнем экзоконтакте Хараелахской интрузии [Sluzhenikin, 2011]. Датированные зерна перовскита не образуют достоверной дискордии, а располагаются вдоль конкордии. Полученный возраст составляет 247.3 ± 8.2 млн лет, однако характеризуется высоким значением среднего квадрата взвешанных отношений (СКВО) 20 (рис. 3).

ГЛАВА 6. ГЕНЕЗИС РУД ОКТЯБРЬСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Как уже было отмечено ранее, существует большое количество гипотез, объясняющих появление сульфидного PGE-Cu-Ni оруденения в дифференцированных трапповых интрузиях Сибирской платформы. Наиболее популярными среди магматических гипотез являются две. Первая утверждает, что интрузии являлись проточными камерами во время подъема магмы на поверхность из более глубоких магматических очагов [Радько, 1991; Naldrett et al., 1996]. В проточных камерах происходила ассимиляция сульфатов, сульфатредукция, в результате чего силикатная магма насыщалась серой. Это в свою очередь приводило к образованию сульфидных фаз (MSS) и концентрированию в них PGE и халькофильных элементов. При этом сульфидные фазы опускались на дно проточной камеры или выходили за ее пределы в осадочную толщу в силу большей плотности, где образовывали в итоге залежи массивных руд. Вторая гипотеза говорит о формировании сульфидного оруденения в два этапа – в первый шло внедрение силикатных магм и выпадение из них сульфидных капель, сформировавших вкрапленные руды. Во время второго этапа внедрялись сульфидные расплавы, в результате чего были сформированы массивные и прожилково-вкрапленные руды [Дюжиков, 1988].

На первый взгляд, опубликованные Re-Os датировки по сульфидам массивных руд свидетельствуют в пользу второй гипотезы, поскольку они несколько моложе возраста интрузий норильского типа и основной фазы траппового магматизма [Burgess and Bowring, 2015]. Учитывая важность этого, рассмотрим подробно данные Re-Os датирования.

Первые Re-Os данные для массивных и вкрапленных руд Хараелахской интрузии были получены в статье [Walker et al., 1994] и составляли 247 ± 3.8 млн лет. Поскольку ранее считалось, что возраст траппового вулканизма на Сибирской платформе соответствует ~ 248 млн лет [Renne and Basu, 1991; Campbell et al., 1992], был сделан вывод о согласованности возраста вулканизма и сульфидной минерализации. Однако следует рассмотреть три вопроса, касающиеся данной интерпретации:

1. Сейчас накоплен большой массив геохронологических и палеомагнитных данных, свидетельствующих, что основной этап траппового магматизма на Сибирской платформе соответствует интервалу $\sim 252 - 250$ млн лет, что на несколько миллионов лет древнее, чем считалось ранее [Burgess and Bowring, 2015; Latyshev et al., 2018].

2. В работе по определению Re-Os возраста [Walker et al., 1994] была использована константа распада [Linder et al., 1989], которая позже была уточнена [Smoliar et al., 1996; Selby et al., 2007]. Используя последнюю константу распада [Selby et al., 2007] Re-Os возраст сульфидных руд смещается в более молодую сторону и составляет 242.7 ± 3.8 , что заметно моложе возраста 251.71 ± 0.10 млн лет, полученного U-Pb CA-ID-TIMS методом для циркона из Хараелахской интрузии [Burgess and Bowring, 2015].

3. В работе [Walker et al., 1994] не приводятся значения СКВО (MSWD) для полученных Re-Os изохрон. Однако пересчет опубликованных в работе значений показывает, что данные характеризуются избыточным разбросом от линии регрессии. Рассчитанное СКВО составляет 178, что говорит о том, что полученную линию нельзя рассматривать как настоящую изохрону. Re-Os данные из другой работы [Malitch and Latypov, 2011] для массивных и вкрапленных руд Хараелахской интрузии в целом согласуются с данными из работы [Walker et al., 1994], однако они так же обладают чрезвычайно высокими значениями СКВО. При пересчете опубликованных данных на новую константу распада Re, все значения возраста омолаживаются, но значение СКВО по-прежнему остается крайне высоким. Таким образом, данные линии Re-Os регрессии не отражают истинное значение возраста. Другими словами, несмотря на небольшую ошибку в определении возраста для массивных руд, полученные значения нельзя считать истинными и принимать как значения возраста кристаллизации массивной руды.

Данные, полученные в ходе настоящей работы, позволяют наложить некоторые ограничения на время формирования прожилково-вкрапленных руд Октябрьского месторождения и верхнего контактового ореола Хараелахской интрузии. На рис. 4 приведены обобщенные данные датирования из настоящего исследования.

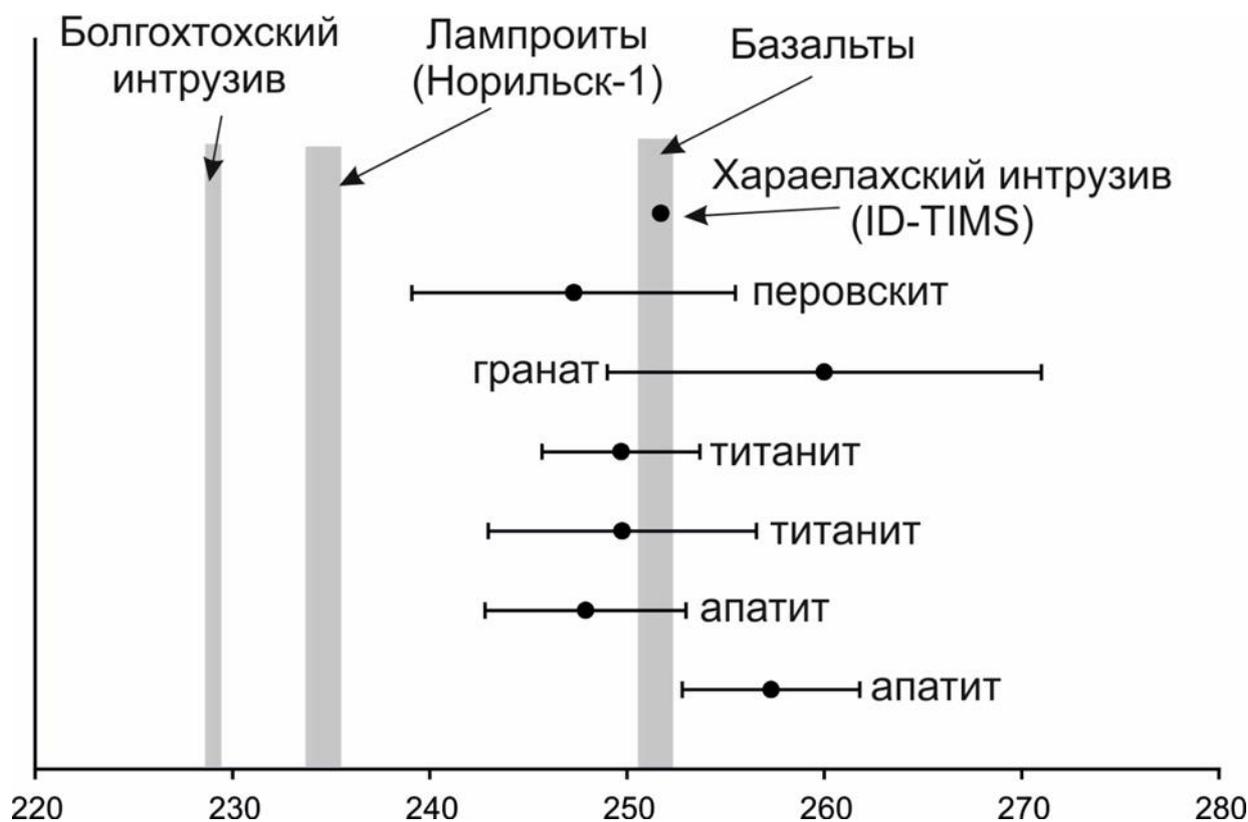


Рисунок 4. Обобщенные данные U-Pb LA-ICP-MS датирования титанита, апатита, перовскита и граната из контактового ореола Хараелахской интрузии (данная работа). Серыми полями показаны возрасты Болгохтохского интрузива [Kato et al., 2003], лампроитов Норильск 1 [Ivanov et al., 2018], основного этапа траптовых излияний на Сибирской платформе [Burgess and Bowring, 2015]. Точкой отмечен возраст циркона из Хараелахской интрузии [Burgess and Bowring, 2015].

Датирование уран-содержащих минералов, входящих в парагенетическую ассоциацию с сульфидами прожилково-вкрапленных руд указывает, что время формирования Хараелахской интрузии и сульфидного оруденения совпадает в пределах аналитической ошибки. Если все же

допустить, что порция сульфидного расплава внедрялась независимо от основного этапа магматизма, то это должно было произойти с небольшим перерывом по времени. Апатит из контакта массивного габбродолерита и роговиков с преобладанием пироксена (образец АМ40) - единственный минерал в нашем исследовании, возраст которого не совпадает с возрастом Хараелахской интрузии. Однако апатит перекрывается по возрасту с титанитом из того же образца и частично перекрывается ошибками с апатитом из метасоматически модифицированных роговиков (образец АМ43) (рис. 4). Возможно, более древняя датировка по апатиту из образца АМ40 связана с неточной коррекцией на общий свинец. Резюмируя, двухстадийная гипотеза [Дюжиков, 1988] не находит убедительного подтверждения в рамках имеющихся геохронологических данных. Хотя ее нельзя исключить полностью, если предположить, что разрыв между двумя стадиями не превышал первые миллионы лет или менее и не фиксируется из-за высоких погрешностей датировок.

Если предположить, что порция сульфидного расплава внедрялась независимо от основной силикатной магмы и сформировала залежи массивных и прожилково-вкрапленных руд, как это считалось ранее [Дюжиков, 1988; Туровцев, 2002], тогда можно было бы ожидать сходство состава халькопирита из этих двух типов руд и их отличие от халькопирита вкрапленных руд. Однако халькопирит из вкрапленных руд в Хараелахском интрузиве по микроэлементному составу схож с халькопиритом массивных руд, а различия естественным образом объясняются кристаллизацией халькопирита из MSS. В то время как микроэлементный состав халькопирита прожилково-вкрапленных руд контрастен по отношению и к халькопириту массивных и вкрапленных руд (Глава 4). Таким образом, полученные содержания микроэлементов в халькопирите не находят подтверждение о более поздней, самостоятельной порции сульфидной магмы. Эти данные скорее свидетельствуют в пользу генетической связи вкрапленных и массивных руд.

Как уже было отмечено, Хараелахская интрузия выделяется на фоне остальных дифференцированных интрузий норильского района мощными метаморфическими и метасоматическими ореолами, которые превышают мощность самой интрузии. Такие мощности изменений недостижимы при одноактном внедрении расплава в магматическую камеру. В качестве примера можно привести исследование [Сокол и др.; 2019], в котором изучена контактово-метаморфическая зона, предположительно, раннетриасового долеритового силла в бассейне Подкаменной Тунгуски в центральной части провинции Сибирских траппов. Мощность интрузии – <80 м. Она контактирует с мергелистыми известняками. Известняки метаморфизованы в мраморы, отличающиеся минеральным составом, исходя из которого рассчитаны температуры для четырех зон от более >900 °С до 500-550 °С на удалении нескольких метров от контакта интрузии. Эти параметры использованы в качестве граничных при моделировании, которое показало, что таких температур контактового метаморфизма можно было достигнуть, только если магма имела температуру 1200 оС, и она текла горизонтально внутри канала интрузии (силла) в течение 1 месяца. Если бы магма остывала, находясь в магматической камере без подпитки новыми горячими порциями, вмещающие породы не могли бы быть прогреты сверх 790 °С, а зона контактовых изменений была бы еще тоньше. В случае с Хараелахской интрузией мощность контактовых изменений 150-200 м при мощности интрузии 70-100 м. То есть, если принять гипотезу проточной магматической камеры [Радько, 1991; Naldrett et al., 1996], то время существования такой камеры должно было быть много более 1 месяца. По палеомагнитным данным время формирования Хараелахской интрузии не превышало 10 тыс лет [Latyshev et al, 2020]. Исходя из этих данных, нельзя однозначно подтвердить гипотезу проточной камеры, но они, по крайней мере, ей не противоречат. Тогда как высокая оценка температуры (720-820 °С) с помощью термометра Zr-в-титаните из образца АМ40 скорее подтверждает наличие долгоживущей проточной камеры.

Титанит и апатит из образца АМ43 (метасоматизированный пироксеновый роговик) характеризуются высокими значениями концентраций обычного свинца, что может быть одной из химических характеристик, указывающих на метасоматические процессы. Оценки температуры кристаллизации титанита из образца АМ40 (720-820 °С) фактически совпадает с температурами закрытия самого титанита.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования удалось получить некоторые ограничения на механизм и время формирования залежей руд Октябрьского месторождения (Хараелахская интрузия). Используя современные аналитические возможности, удалось показать, что:

1. Халькопирит из прожилково-вкрапленных руд максимально контрастен по содержанию элементов примесей (в частности Cd, Pb, Se, Te) по сравнению с халькопиритом из вкрапленных и массивных руд.

2. Зоны изменения вмещающих пород (ороговикования, скарнирования и др.) Хараелахской интрузии превышают мощность самой интрузии. Этого невозможно достичь при одноактном внедрении расплава и его кристаллизации в магматической камере. Для образования зон, подобным наблюдаемым, требуется существование долгоживущей проточной камеры. Верхний предел температур, зафиксированных с помощью термометра, основанного на содержании циркония в титаните, составляет 820 °С.

3. Время образования урансодержащих минералов из метаморфических и метасоматических пород верхнего контактового ореола Хараелахской интрузии (титанита, апатита, перовскита и граната) в рамках аналитических ошибок совпадает с возрастом кристаллизации циркона в самом интрузиве ~ 252 млн лет.

4. Все полученные данные лучше всего согласуются с образованием вкрапленных и массивных сульфидных руд в проточной магматической камере при ассимиляции магм серосодержащим коровым веществом, а прожилково-вкрапленных руд – при метаморфическом и метасоматическом перераспределении вещества в горячем контакте Хараелахской интрузии.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, включенных в «Перечень...» ВАК Минобрнауки России

1. Marfin, A.E., Ivanov, A.V., Abramova, V.D., Anziferova, T.N., Radomskaya, T.A., Yakich, T.Y., Bestemianova, K.V. A Trace Element Classification Tree for Chalcopyrite from Oktyabrsk Deposit, Norilsk–Talnakh Ore District, Russia: LA-ICPMS Study // Minerals. 2020. V.10. № 8. P. 716.

2. Marfin, A.E., Ivanov, A.V., Kamenetsky, V.S., Abersteiner, A., Yakich, T.Y., Dudkin, T.V. Contact metamorphic and metasomatic processes at the Kharaelakh intrusion, Oktyabrsk deposit, Norilsk-Talnakh ore district: Application of LA-ICP-MS dating of perovskite, apatite, garnet, and titanite // Economic Geology. .2020. V. 115. № 6. P. 1213-1226.

Материалы и тезисы докладов научных конференций

1 Ivanov A.V., Demonterova E.I., Marfin A.E., Dudkin T.V., Fiorentini M.L., Kamenetsky V.S. PGE and Au in ore-free dolerite sills of the Siberian traps: estimation of initial metal concentrations in mafic melts Magmatism of the Earth and Related Strategic Metal Deposits. 2019. T. 36. С. 107-108.

2 Marfin A.E., Abramova V.D., Yakich T.Y., Bestemianova K.V., Ivanov A.V., Kamenetsky V.S. LA-ICPMS analysis of the predominant ore minerals from various types of ores within the Oktyabrskoe deposit (Talnakh-Noril'sk ore district) Magmatism of the Earth and Related Strategic Metal Deposits. 2019. T. 36. С. 182-184.

3 Marfin A.E., Yakich T.Yu., Abersteiner A., Ivanov A.V., Kamenetsky V.S. Sulfides of Ivakinsky formation basalts, Noril'sk ore district: revisited. В книге: Large igneous provinces through Earth history: mantle plumes, supercontinents, climate change, metallogeny and oil-gas, planetary analogues (LIP - 2019). Тезисы VII Международной конференции. 2019. С. 85-86.

4 Иванов А.В., Демонтерова Е.И., Марфин А.Е., Фиорентини М.Л. Поведение элементов платиновой группы (эпг) и золота в безрудных трапповых силлах юга сибирской платформы. В сборнике: Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту). Материалы совещания. 2018. С. 109-110.

5 Иванов А.В., Марфин А.Е., Демонтерова Е.И., Дудкин Т.В., Каменецкий В.С., Фиорентини М.Л. Дисбаланс Pd/Pt отношений между сульфидными рудами, интрузиями и лавами сибирских траппов: потерянная платина или ошибочная концепция формирования месторождений? В книге: Геодинамическая эволюция литосферы центральноазиатского подвижного пояса (от океана к континенту). Материалы научного совещания. Иркутск, 2020. С. 130-131.

6 Марфин А.Е. In-situ LA-ICP-MS U-Pb датирование и геохимическая характеристика титанита из контактовых роговиков Хараелахской интрузии: ограничение на время и условия

формирования Октябрьского месторождения, Талнахское рудное поле. В сборнике: Строение литосферы и геодинамика. Материалы XXVIII Всероссийской молодежной конференции земной коры. 2019. С. 101-103.

7 Марфин А.Е. Минеральные ассоциации в массивных и "медистых" сульфидных рудах Октябрьского месторождения, Талнах В книге: Новое в познании процессов рудообразования. Сборник материалов. 2018. С. 239-241.

1. 8 Марфин А.Е., Бровченко В.Д., Иванов А.В., Пашкова Г.В., Чубаров В.М., Радомская Т.А. Отношение S/Se в рудах Октябрьского месторождения (Норильск, Талнах) как показатель контаминации осадочным веществом. В книге: Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (От океана к континенту). Материалы научного совещания. Иркутск, 2020. С. 234-235. 0

8 Марфин А.Е., Иванов А.В., Каменецкий В.С. Минералогия включений в сульфидных обособлениях базальтов ивакинской свиты под интрузией Норильск-1 / В книге: Минерально-сырьевая база алмазов, благородных и цветных металлов - от прогноза к добыче. сборник тезисов докладов I молодежной научно-образовательной конференции ЦНИГРИ. Москва, 2020. С. 121-123.

9 Марфин А.Е., Иванов А.В., Каменецкий В.С. Новые данные LA-ICP-MS датирования минералов Октябрьского месторождения, Талнахское рудное поле. В сборнике: Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту). Материалы совещания. 2018. С. 180-182.

10 Марфин А.Е., Каменецкий В.С., Иванов А.В. Датирование контактовых пород Верхнеталнахской интрузии (Октябрьское месторождение) В сборнике: Петрология магматических и метаморфических комплексов. Материалы X Всероссийской петрографической конференции с международным участием. 2018. С. 245-250.

11 Марфин А.Е., Якич Т.Ю., Демонтерова Е.И., Иванов А.В., Каменецкий В.С. Сульфидные обособления в базальтах ивакинской свиты (норильск-1): ликвация или вторичное замещение пустот? В сборнике: Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту). Материалы научного совещания. 2019. С. 166-167.