

На правах рукописи

КРИВОЛУЦКАЯ Надежда Александровна

**ЭВОЛЮЦИЯ ТРАППОВОГО МАГМАТИЗМА И Pt-Cu-Ni
РУДООБРАЗОВАНИЕ В НОРИЛЬСКОМ РАЙОНЕ**

Специальность

25.00.11 - геология, поиски и разведка твердых
полезных ископаемых; минерагения

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
доктора геолого-минералогических наук

Москва – 2012 г.

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Ордена Ленина и Ордена Октябрьской революции Институте геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН (ГЕОХИ РАН)

Научный консультант: член-корреспондент РАН
Соболев Александр Владимирович

Официальные оппоненты: академик
Когарко Лия Николаевна

доктор геолого-минералогических наук
Шарков Евгений Витальевич

доктор геолого-минералогических наук
Терехов Евгений Николаевич

Ведущая организация: Кафедра геологии полезных ископаемых
геологоразведочного факультета
МГРИ-РГГРУ

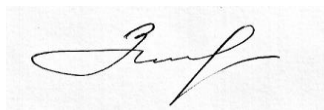
Защита состоится 30 марта 2012 г. в 14-30 в ауд. 415 на заседании диссертационного совета Д.501.001.62 при Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, МГУ, геологический факультет.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке геологического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (главное здание, 6 этаж).

Автореферат разослан 28 февраля 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 501.001.62

доктор геолого-минералогических наук



Н.Г.Зиновьева

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проводимых исследований

Проблема формирования суперкрупных месторождений - уникальных геохимических аномалий в земной коре - является одной из ведущих в современной геологии. Это обусловлено как важнейшей ролью месторождений-гигантов в мировой экономике, так и их особым значением для решения ряда теоретических вопросов, в частности, разработки механизмов накопления металлов. Среди обширного класса платиновых и медно-никелевых месторождений, обычно разбросанных в пространстве, норильские объекты занимают особое место благодаря сочетанию в них обоих типов руд.

Открытие уникальных талнахских месторождений не только изменило расстановку сил на сырьевом рынке в 60-ые годы XX столетия (Россия вышла на первое место по добыче никеля и второе – платиновых металлов в мире), но и существенно сказалось на теории развития магматического рудообразования. Впервые в мире были обнаружены жильные тела, связанные не с крупными протерозойскими плутонами, а с маломощными триасовыми интрузивами, локализованными на СЗ Сибирской трапповой провинции. Такая позиция и близость составов интрузивов и лав поставили вопрос о связи магматизма с рудообразованием в этом регионе особенно остро: является ли формирование месторождений закономерным итогом развития системы в целом и можно ли ожидать открытие подобных уникальных объектов в других трапповых провинциях мира? Ответы на эти вопросы тесно связаны с решением проблемы генезиса норильских руд.

В гипотезах образования норильских месторождений доминируют либо представления о решающей роли в привносе и отложении металлов магматического расплава (Годлевский, 1959; Лихачев, 1972; Naldrett, 1992), либо флюидных компонентов (Золотухин, 1997; Зотов, 1989). Концепции первого типа существенно отличаются между собой по отношению к роли той магматической системы, в продуктах которой локализованы руды. Часть исследователей придает ей решающее значение, предполагая образование руд из самостоятельной порции пикритоидного расплава, обогащенного летучими и рудными компонентами в условиях закрытой магматической системы (Годлевский, 1959; Дюжиков и др., 1988; Дистлер и др., 1988, Лихачев, 2006). Другие авторы рассматривают интрузивы как подводящие каналы для лав, отводя ведущую роль в рудообразовании длительности протекания расплава к поверхности в условиях открытой системы и его взаимодействию с вещающими породами (Радько, 1991; Naldrett, 1992, 2009; Li et al., 2009, 2011).

Оценка достоверности высказанных гипотез, влияющих на поиски новых месторождений, осложняется ограниченностью геолого-геохимических данных о связи интрузивов с лавами и данных о составах исходных магм, чему и посвящена данная работа.

Главная цель работы -

уточнить закономерности развития траппового магматизма в Норильском районе и определить место в нем рудообразующего процесса, опираясь на большой объем новых геологических и геохимических данных по вулканическим и интрузивным породам.

Задачи исследования включали:

I. Определение взаимоотношений рудоносных интрузивов с лавами, предполагающее: а) детальное изучение строения туфо-лавовой толщи и ее геохимических особенностей в разных тектонических структурах района для установления эволюции вулканизма в пространстве и во времени; б) выделение основных геохимических типов ультрабазит-базитовых интрузивов разной степени рудоносности; с) сопоставление геохимических особенностей лав и интрузивов, образованных на одних и тех же этапах развития трапповой магматической системы.

II. Определение составов исходных магм: 1) с помощью изучения расплавных включений в оливинах и пироксенах; 2) методом геохимической термометрии с помощью ЭВМ-модели «КОМАГМАТ».

III. Сопоставление химического и минерального состава руд разных месторождений с составом вмещающих их интрузивных пород.

IV. Выяснение масштабов процессов ассимиляции вмещающих пород базитовыми расплавами на уровне интрузивных камер и их роли в рудообразовании.

V. Сравнительный анализ минералого-геохимических особенностей интрузивов норильского комплекса с рудоносными массивами других районов России (Таймыра, Северного Забайкалья, Карело-Кольского региона, В. Саяна)

Фактический материал

Для решения поставленной проблемы региональные геолого-структурные исследования трапповых пород сочетались с их детальным аналитическим изучением (определение валового состава пород и микроанализ минеральных фаз, в том числе магматических включений в них).

Работа основывается на многолетнем (1982-2011 гг.) изучении автором геологического строения, петрографии, геохимии и минералогии платино-медно-никелевых месторождений различных регионов России, главным из

которых стал Норильский район, где автором был собран каменный материал в ходе полевых работ в 1997 – 2011 гг. (составлено 11 км детальных разрезов вулканитов и 13 км разрезов интрузивных пород по коренным обнажениям и скважинам). Изучение массивов Северного Забайкалья (Чинейский, Луктурский) осуществлялось в 1982-1986 и 1993 гг., Кингашского массива (Восточные Саяны) - во время полевой экскурсии 2000 г. Часть образцов для проведения сравнительных исследований по ультрабазит-базитовым комплексам в рамках договорных работ предоставлена В.П. Мамонтовым, Ю.Н. Киселевым, Г.Р. Ломаевой (Южно-Ковдорская площадь и Кингашский рудный район).

Аналитические работы включали: 1. *Рентгенофлуоресцентный анализ* – 780 анализов - ГЕОХИ РАН, аналитики И.А. Рощина, Т.В. Ромашова; 208 анализов - ЧИПР СО РАН, аналитик Н.С. Балугев. 2. *Метод индуктивно-связанной плазмы*: 1) ICP-MS - 480 анализов пород - ИМГРЭ, аналитик Д.З. Журавлев; ИЭМ РАН, аналитик В.К. Карандашев; 2) LA ICP-MS – 650 анализов стекол пород, 470 – пироксенов, 1580 оливинов., Германия, г. Майнц, аналитики Н.А. Криволуцкая, Д.В. Кузьмин; 3. *Электронно-зондовый микроанализ* («Самес» SX 50 и SX 100–ГЕОХИ РАН, Москва – аналитик Н.Н. Кононкова; JXA 8200 – Институт Химии им. Макса Планка, г. Майнц, аналитики Н.А. Криволуцкая, Д.В. Кузьмин) – 12 150 анализов оливинов, 8 100 пироксенов, 1350 плагиоклазов, 310 шпинелидов, 560 - сульфидных минералов, 85 анализов минералов ЭПГ, 680 стекол; 4. *Ионно-зондовый микроанализ* («Самес» ims-4f – ИМИ РАН, Ярославль, аналитики С.Г. Симакин, Е.В. Потапов) – 175 расплавных включений и 210 оливинов; 5. *Рамановская спектроскопия* (Франция, г. Нанси, аналитик Ж.Дебюсси) – 12 анализов флюидных включений; 6. *Исследование стабильных изотопов в породах (O, H, C, S)* - 145 анализов, ГИН РАН, аналитик Б.Г. Покровский и ЦНИГРИ, аналитик С.Г. Кряжев; 7. *Исследование радиогенных изотопов в породах (Sr, Pb, Sm-Nd, U-Pb)* - ВНИИОкеангеология, аналитик Б.В. Беляцкий - 55 анализов; ГЕОХИ РАН, аналитик А. А. Плечова – 18 анализов, Институт Химии им. Макса Планка – аналитик З.Фекиасова – 15 анализов; 8. *Определение ЭПГ и Au в породах и рудах*: а) 78 анализов - Институт рудообразования, минералогии и геохимии НАНУ (пробирный метод, аналитик А.А. Юшин), б) 32 анализа - ГЕОХИ РАН, атомно-абсорбционный метод, аналитики И.В. Кубракова, О. А.Тютюник, Н.Д. Чхетия).

Экспериментальные исследования по гомогенизации расплавных включений проводились автором в муфеле (ИГЕМ РАН) и камере системы

Соболева-Слудского (ГЕОХИ РАН, 160 экспериментов), а также в печи с регулируемой фугитивностью кислорода (ГЕОХИ РАН). Компьютерное моделирование кристаллизации базальтовых магм осуществлялось с помощью ЭВМ-модели «КОМАГМАТ-3.5» и «ПЕТРОЛОГ-2.0»). Статистическая обработка данных выполнялась автором по программам «Статистика» и «Петротип»).

Научная новизна

I. Норильский район. Базальты:

1. Впервые установлены существенные вариации в строении и составе гудчихинской свиты (главные, редкие и летучие компоненты) – примитивной на востоке территории и контаминированной – на западе.
2. Впервые детально изучено строение и геохимические особенности пород хаканчанской свиты в разных тектонических структурах района. Установлено, что включавшиеся в ее состав толеитовые и пойкилоофитовые базальты относятся к туклонской свите, а туфы и туффиты обладают геохимическими характеристиками надеждинской свиты.
3. Проведенное в разных частях района детальное изучение толеитовых базальтов хаканчанской, надеждинской и туклонской свит позволило уточнить ареалы их распространения и выделить 2 одновременно существующих независимых магматических очага на западе и востоке территории (надеждинский и туклонский).
4. Продемонстрировано, что расслоенные покровы, рассматриваемые ранее в качестве маркирующих горизонтов туклонской свиты, входят в состав разных свит – туклонской и надеждинской.
5. Впервые обнаружены высоко-Mg породы в составе надеждинской свиты.
6. В разных частях района изучены геохимические особенности верхней части надеждинской свиты и нижние – моронговской. Показано, что исследованные вулканы только в единичных случаях имеют промежуточные характеристики и выделение «транзитных серий» представляется необоснованным.
7. Полученный большой объем новых геохимических данных для базальтов разных тектонических структур позволил выделить 2 этапа и 4 цикла в развитии вулканизма.

II. Норильский район. Интрузивы

1. Впервые на представительном материале проведена геохимическая типизация ультрабазит-базитовых интрузивных пород нормальной щелочности, выделены 3 типа (дюмталейский, нижнеталнахский и норильский), близкие по геохимии к базальтам гудчихинской, надеждинской и моронговской свит.

2. Аргументированно доказано существование интрузивных пород гудчихинского типа.
3. Показано, что разные по степени рудоносности интрузивы характеризуются одинаковыми геохимическими особенностями пород, а химический и минеральный состав руд не коррелирует с составом силикатной части вмещающих их интрузивов.
5. Впервые в рудах норильских месторождений диагностирован самородный Pd и ряд новых фаз ЭПГ, а также получены карты распределения элементов-примесей (Co, As, Se, Au, Pt, Pd, Rh, Ir, Ru, Os, Re) методом LA-ICP-MS в главных рудообразующих сульфидах.
6. Доказан посленижненеадежинский возраст интрузивов норильского комплекса (по геолого-геохимическим данным).
7. Установлены аномально высокие (до 12 ppm) содержания тяжелых редкоземельных элементов (Yb, Dy, Er) и Y в оливинах.
8. Обнаружены уникальные зональные оливины (Fo₈₂-Fo₅₉) в Микчангдинском интрузиве, свидетельствующие о высокой скорости остывания массивов норильского комплекса.
9. Впервые определен состав исходных расплавов и летучих компонентов в них для ряда интрузивов норильского района прямыми методами (по расплавному включению в оливинах и пироксенах).

III. Сравнительное изучение норильских интрузивов с массивами других районов

1. Продемонстрировано сходство геохимических характеристик для рудоносных массивов разных регионов: Карело-Кольского региона, Норильского района, южного обрамления Сибирской платформы.
2. Показано, что различные по геохимическим особенностям интрузивы характеризуются одинаковым типом оруденения (Дюмталейский и Чинейский).

Практическая значимость работы

Часть использованных в работе материалов получена в ходе выполнения хозяйственных работ, в которых автор являлся ответственным исполнителем.

1. Результаты петрографического и минералого-геохимического изучения базальтов Микчангдинской площади вошли в отчет ООО «Норильскгеология» по «Геологической групповой съемке 1:50000 м-ба на Микчангдинской площади» (авторы В.Н. Михайлов, Л.И. Трофимова и др., 2003 г).
2. Изучение породообразующих минералов легло в основу хозяйственных работ ГЕОХИ РАН с «ГМК «Норильский никель» и ООО «Норильскгеология» и

отражено в отчете «Разработка минералого-геохимических поисковых признаков на сплошные сульфидные руды в Норильском районе», 2008 г.

3. Результаты исследований геохимии (в том числе и радиогенных изотопов), минералогии массивов Южно-Ковдорской площади Кольского полуострова, выполненные по договору с ОАО «Мурманская ГРЭ», вошли в отчеты 2006-2007 гг. и опубликованы в журнале «Геохимия».

4. Исследование геохимических особенностей пород и минералогии Верхнекингашского массива выполнено по договору с ООО «Геологическая компания», результаты отражены в отчете 2007 г.

Защищаемые положения

1. Исходя из полученных закономерностей распространения вулканогенных пород в разных тектонических структурах района и особенностей их петро-и геохимического состава (главные, редкие и радиогенные элементы), показано, что породы туфо-лавовой толщи Норильского района были сформированы в течение двух стадий – рифтогенной (iv-sv -gd- nd) и собственно трапповой (tk - mr-sm) которые не просто сменяли друг друга во времени, а существовали одновременно в ранненадеждинский период. Развитие вулканизма осуществлялось в течение четырех циклов (iv-sv, gd, nd-tk, mr-sm).

2. По геохимическим особенностям пород ультрабазит-базитовые интрузивы нормальной щелочности подразделяются на 3 геохимических типа: дюмталейский (средневзвешенное содержание $MgO=19-23$ и $TiO_2 >1$ мас.%, $^{87}Sr/^{86}Sr=0.703$, $\epsilon Nd = +6-8$; отсутствие Ta-Nb и Pb аномалий), нижнеталнахский ($MgO=13-16$, $TiO_2 <1$, $^{87}Sr/^{86}Sr=0.710$, $\epsilon Nd = -8--10$; присутствие отрицательной Ta-Nb и положительной Pb аномалий, существенное обогащение крупноионными литофильными элементами) и норильский ($MgO=10-12$ и $TiO_2 <1$ мас.%, $^{87}Sr/^{86}Sr=0.706$, $\epsilon Nd = -0.5$; отрицательная Ta-Nb и положительная Pb аномалии), соответствующие лавам 2, 3 и 4 циклов (гудчихинской, надеждинской и моронговской свитам).

3. По данным изучения валового состава пород и расплавных включений в ранних ликвидусных фазах (оливинах и пироксенах) установлено, что исходные магмы, сформировавшие рудоносные интрузивы, имели толеитовый состав расплава с содержанием $MgO = 8$ мас.%, характеризовались коровыми спектрами распределения редких элементов (тантал-ниобиевая и свинцовая аномалии), повышенными концентрациями редких элементов и водно-углекислым составом флюида (0.5 мас. % воды, 0.2 хлора и 0.02 фтора) и не содержали повышенных концентраций цветных металлов.

4. Богатые Pt-Cu-Ni сульфидные руды района связаны с массивами норильского типа, образованными в посленадеждинское время в результате самостоятельного магматического импульса. Степень рудоносности массива (рудопроявление, бедное, богатое или уникальное месторождение) не отражается на петро-геохимических особенностях интрузивных пород: средневзвешенной магнезиальности, содержаниях и распределении редких элементов и их изотопном составе (Sr, Nd, Pb).

5. Отсутствие корреляции между химическим (Cu/Ni, Pd/Pt, Cu+Ni/PGE, PGE/S), минеральным составом руд (соотношение главных рудообразующих, второстепенных и редких сульфидов, минералов платиновой группы) и составом силикатной составляющей интрузивов (Mg#), а также проявление процессов ассимиляции только в узких приконтактных зонах *in situ*, свидетельствует о том, что магмы при образовании норильских месторождений выполняли, главным образом, транспортирующую роль по отношению к сульфидам, сконцентрированным на предыдущих этапах развития региона в пределах нижней коры.

Апробация работы

Результаты исследований опубликованы в 175 работах: 1 монографии, 29 статьях в реферируемых журналах, в 31 статье в журналах и сборниках, а также 114 тезисах (из них 26 расширенных), главные из которых приведены в конце автореферата. Они систематически обсуждались на заседаниях лаборатории геохимии магматических и метаморфических пород и Ученых Советах ГЕОХИ РАН, в МГУ, ВСЕГЕИ, МГРИ, в Институте минералогии и рудообразования НАНУ (г. Киев), а также на НТС «ГМК «Норильский никель» и ООО «Норильскгеология», в других научных и производственных организациях. Полученные данные и их интерпретация докладывались на многочисленных международных и российских конференциях (более 30 раз), в том числе на Всероссийских платиновых совещаниях (Москва, 1992, 2002; Красноярск, 2000), Международных платиновых конгрессах (Москва, 1994; Садбери, 2010), на Международном Европейском союзе геонаук (EGU IX, X, XI, XII в г. Страсбурге, Ницце и Вене с 1999 по 2007 г.), на Российских и международных конференциях по флюидным и расплавленным включениям (г. Александров, 1999, 2000, 2001; г. Гренобль, Франция, 2001; Ринберг, Германия, 2005; Москва, ИГЕМ, 2008; на ECROFI – г. Сиена, Италия, 2005), на конференции Societies of Economic Geologists and GSA (г. Йоганнесбург, ЮАР, 2008), на Cu-Ni симпозиуме в Китае (2009 г), на совещаниях «Новые идеи в науках о Земле» (Москва, 1999, 2002, 2004, 2009), совещаниях памяти А.Н.Заварицкого,

А.Г.Бетехтина, Ф.И.Чухрова, 80-летия ИГЕМ (Москва, ИГЕМ, 2007-2010), на Смирновских Чтениях (МГУ, Москва, 2009, 2010), на семинаре по Геохимии магматических пород (ГЕОХИ, 2010), на Чтениях памяти В.Е Хаина (МГУ, 2011), а также региональных совещаниях в Чите (2001, 2005), Сыктывкаре (2005), Петропавловске-Камчатском (2009), Петрозаводске (2004, 2009).

Благодарности

Любовь к геологии рудных месторождений была привита автору на кафедре полезных ископаемых МГУ академиком В.И. Смирновым и его сподвижниками: Ю.С. Бородаевым, Г.Ф. Яковлевым, Н.И. Ереминым, В.В. Авдониным, Ф.П. Мельниковым, В.И. Старостиным, Нат. Е. Сергеевой, Т.А. Филицыной, Е.М. Захаровой, Г.И. Бочаровой, др. Автор выражает признательность коллегам, оказавшим содействие в осуществлении полевых работ: геологам «ГМК «Норильский никель» О.Н. Симонову, А.В.Поспелову, А.А. Шашкову; ООО «Норильскгеология» - В.В.Кургину, Ю.К. Краковецкому, Л.И. Трофимовой, И.Н. Тушенцовой, Е.А.Аршиновой, В. Ю. Ван-Чану, К.В. Краденову, И.А. Матвееву, В.П. Стрельникову, В.А. Тетерюку, А. А. Даньченко, С.Г. Снисару, В.А.Радько, К.К. Ковальчуку, К.В. Шишаеву, С. А. Виленскому, О.П. Легезиной, Г. И. Легезину, Е.В.Середе и др., а также А.Г. Тарасову, С.В. Нистратову, И.В. Храмову, А.В. Рудаковой, К.В. Бычкову. Особую благодарность автор выражает В.Н. Михайлову за многолетнюю помощь в изучении вулканитов Норильского района в полевых условиях и плодотворные дискуссии об их происхождении. Успешному проведению аналитических работ способствовали И.А. Рощина, Н.Н. Кононкова, Д.В. Кузьмин, О.Б. Кузьмина, Некрасов А.Н., Т.Б. Шлычкова, С.Г. Симакин, Е.В. Потапов, А.А. Плечова, Б.В. Беляцкий, А.А. Юшин, И.В. Кубракова, О.А. Тютюник, Д.Н.Чхетия, В.А. Турков, С.В. Луткова. Помощь в экспериментальных работах по изучению расплавных включений оказали А.А. Кадик, А.А. Каргальцев, М.В. Воловецкий, А.Д. Бабанский, И.П. Соловова, А.В. Гирнис, Т.Л.Крылова. Автор благодарен А.А. Аriskину за обсуждение и помощь в моделировании процессов кристаллизации магм рудоносных массивов, а также всем сотрудникам лаборатории геохимии магматических и метаморфических пород ГЕОХИ РАН за дружескую и творческую атмосферу, особенно Н.М.Свирской и О.П. Цамерян. Глубокую признательность автор выражает Б.И. Гонгальскому за тридцатилетнее сотрудничество в изучении базитовых рудоносных комплексов в полевых и камеральных условиях и интерпретации результатов. Неоценимую роль в проведении исследований сыграла многолетняя всесторонняя поддержка чл.-корр. РАН А.В.Соболева,

которому автор искренне благодарен за постоянный интерес к изучению Сибирского траппового магматизма.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 00-05-64507-а, 00-05-74508-з, 01-05-74552-з, 03-05-79123-к, 03-05-64578-а, 05-05-74622-з, 07-05-01007-а, 08-05-100092-к, 09-05-01193-а, 10-05-08173-з), программ Президента РФ «Ведущие научные школы России» НШ-150.2008.5, НШ-3919.2010.5; программ ОНЗ РАН № 4, 8 и проекта Вольфганга Пауля (Германия).

Структура и объем работы

Диссертация объемом 355 стр. состоит из введения, 6 глав и заключения, содержит 65 рисунков, 5 таблиц, 3 приложения, список литературы из 328 наименований.

ГЛАВА 1. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О ГЕОЛОГИИ НОРИЛЬСКОГО РАЙОНА И ПРОБЛЕМЫ ГЕНЕЗИСА РУД

Норильский район, расположенный на СЗ Сибирской платформы, характеризуется большой мощностью вулканогенных образований (3,5 км) и наличием уникальных Pt-Cu-Ni месторождений. Это создает предпосылки для успешного решения проблем происхождения огромных объемов магматических пород и суперкрупных месторождений, не имеющих аналогов в мире по запасам и ценности сульфидных руд. Район детально охарактеризован в ряде фундаментальных работ (Дюжиков и др., 1988; Додин, 1996; Геологическая карта..., 1994; Sudbury-Noril'sk, 1994; Рябов и др., 2001, Налдретт, 2003; Лихачев, 2006). На западе и севере он ограничивается Енисейским и Енисей-Хатангским прогибами, а на востоке – Тунгусской синеклизой. Представления о строении территории базируются на глубинных сейсмических профилях «Горизонт» (Воркута-Тикси) и «Метеорит» (Дюпкун-Диксон), свидетельствующих о наличии в ее пределах Игарско-Норильской погребенной палеорифтовой структуры (Восточная Сибирь, 2002), отделенной мантийными разломами от Тунгусского и Таймырского блоков с обычным платформенным строением. Для этой территории характерны высокоградиентные прогибы в фундаменте, выполнение мощными (до 15 км) осадочно-вулканогенными толщами; большая плотность разломов; повышенная мощность «базальтового» слоя; присутствие промежуточного слоя между корой и мантией глубине 35 км ($V_p = 7,3$ км/с). На современной поверхности обнажаются терригенно-осадочные отложения $E-C_1$ с прослоями ангидритов и солей, угленосные отложения тунгусской серии (C_2-P_1) и вулканогенные породы (P_2-T_1) трапповой формации. Главными пикативными структурами района являются (рис.1) Норильско-Хараелакский прогиб, Тунгусская синеклиза, Хантайско-

Рыбнинский и Дудинский валы, а дизъюнктивными – Норильско-Хараелахский и Ламско-Летнинский разломы.

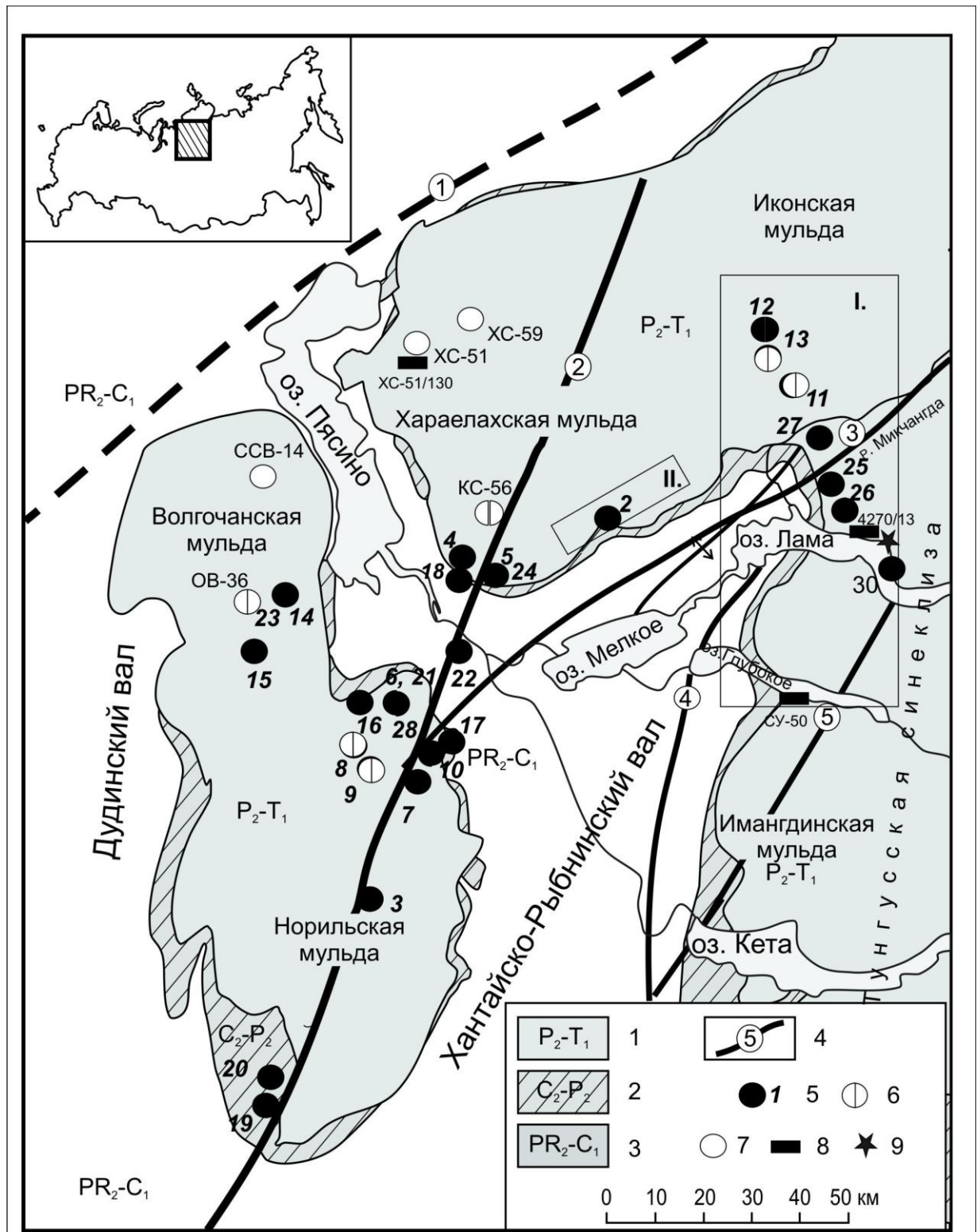


Рис.1. Карта фактического материала для Норильского района

Условные обозначения: 1 – вулканиты трапповой формации, 2 – отложения тунгусской серии, 3 – терригенно-карбонатные породы, 4 – разломы (1 –

Енисей-Хатангский, 2- Норильско-Хараелахский, 3 – Микчангдинский, 4- Имангдинский, 5 – Ламско-Летнинский), 5 – интрузивы и их номера (см. табл.1), 6-7 – скважины, в которых изучены: 6 - вулканиты и интрузивы; 7 – вулканиты. Прямоугольниками обозначены районы детальных исследований эффузивов. 8 - положение образцов *gd* пикритов с изученными расплавленными включениями, их номера, 9 –положение разреза, показанного на рис. 5.

Многочисленные ультрабазит-базитовые интрузивы локализованы преимущественно в терригенно-осадочных породах и редко выходят на поверхность. Три из них (до 12 км протяженностью, шириной до 2–4 км и мощностью до 350 м) – Норильск 1, Талнахский и Хараелахский – содержат уникальные по запасам руды, приуроченные к контакту массивов с вмещающими породами (Годлевский, 1959; Лихачев, 1996, 2006; Likhachev, 1994; Генкин и др., 1981; Дистлер и др., 1988 и т.д.). Экстраординарной особенностью месторождений Норильского района является несоответствие мощности интрузивов и связанных с ними руд, составляющих до 15 об. % (Лихачев, 1996). При низкой растворимости серы в базальтовых расплавах в близповерхностных условиях, соответствующих кристаллизации интрузивов норильского комплекса, трудно представить ее извлечение только из исходной магмы, сформировавшей конкретное интрузивное тело. Создание реалистичной модели образования норильских месторождений требует интерпретации указанных выше особенностей их геологического строения.

ГЛАВА 2. ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ ТУФО-ЛАВОВОЙ ТОЛЩИ ПО ГЕОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИМ ДАННЫМ

2.1.История и проблемы изучения вулканитов в Норильском районе

Основы расчленения пород вулканогенной толщи были заложены в начале 60-ых годов XX в. во время региональных геолого-съемочных работ Г.Д. Масловым, Д.А. Додиним, Я.С. Полькиным и др. В “Опорной легенде геологической карты масштаба 1:50000, серия Норильская” (1993) выделяются 11 свит, представленных (снизу вверх): высокотитанистыми ($\text{TiO}_2 > 2\text{--}3 \text{ мас.}\%$) субщелочными и пикритовыми базальтами – ивакинская *iv*, сыверминская *sv*, гудчихинская *gd* – и низкотитанистыми ($\text{TiO}_2 \leq 1 \text{ мас.}\%$) толеитовыми базальтами – хаканчанская *hk*, туклонская *tk*, надеждинская *nd*, моронговская *mr*, мокулаевская *mk*, хараелахская *hr*, кумгинская *km* и самоедская *sm*. Их характеристика (петрография, петрохимия, минеральный состав) дана работах (Додин, 1964, 1971; Золотухин и др., 1984; Рябов и др., 2001).

Новый этап исследований магматических пород связан с изучением редких (Нестеренко, 1975; Lightfoot et al., 1990, 1993, 1994, 2005, 2010; Wooden et al., 1993) и радиогенных элементов (Kamo et al. 1996, 2003; Renne et al., 1991, 1995;

Sharma et al., 1992), стабильных изотопов S, O, H, C (Гриненко, Годлевский, 1965; Grinenko, 1985; Покровский и др., 2002, 2005). В результате было показано, что высоко-Ti базальты характеризуются повышенным (>2) Gd/Yb отношением, а низко-Ti – пониженным (<1.2), что отражает присутствие граната в источнике первых из них. Важным оказалось установление пониженных в 3 раза содержаний Cu и Ni в лавах нижней части надеждинской свиты по сравнению с остальными базальтами, что легло в основу модели формирования руд в открытой системе (Naldrett, 1992), где обогащенность крупноионными литофильными элементами надеждинской свиты рассматривается как признак контаминации расплава коровым материалом, приведшей к выпадению сульфидов. Промежуточные между ними и основным объемов базальтов по геохимии породы были установлены в нижней части моронговской свиты получили название «транзитных» серий – переходных к типичным траппам. Главные типы спектров для пород разных свит показаны на рис. 2.

Несмотря на большой объем полученного материала, многие вопросы образования вулканических пород остаются нерешенными, поскольку детальные геохимические исследования базировались только на одном сводном

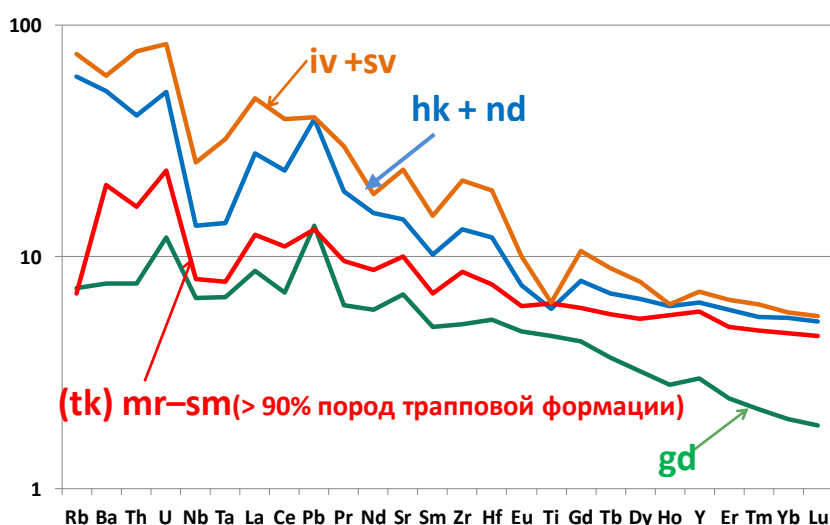


Рис. 2. Спайдер-диаграммы главных типов вулканических пород района (по данным автора; здесь и на рис. 3, 6, 7, 9, 10, 14, 17 содержания элементов нормированы к примитивной мантии по (Hofmann, 1988))

разрезе вулканитов Хараелахской мульды (скв. СГ-9 и СГ-32, дополненном данными по эффузивам г. Сундук), исходя из предположения о наложенном характере пликативных структур в районе. Однако хорошо известно из работ предыдущих авторов (Маслов, 1964; Золотухин и др., 1976), что строение туфолоавовой толщи существенно отличается в них.

Отсутствие надежных маркирующих горизонтов, близость текстурно-структурных особенностей и петрохимии лав часто не позволяют надежно диагностировать породы разных свит, особенно представленных толеитовыми

базальтами. Поэтому предложенные схемы развития магматизма в районе существенно различаются (Годлевский, 1959; Lightfoot et al., 1994; Fedorenko et al., 1996; Альмухамедов и др., 1999; Медведев, 2004, Иванов, 2011). Только сочетание региональных исследований в совокупности с детальным геохимическим изучением во многом помогает провести границы между свитами, очертить ареалы их распространения и восстановить историю развития вулканизма. Именно такой подход был использован в данной работе. Ниже излагаются только принципиально новые данные, полученные для трапповых пород в ходе исследований.

2.2. Результаты изучения вулканических пород

2.2.1. Гудчихинская свита распространена крайне неравномерно и только в пределах Норильско-Хараелахского прогиба: ее максимальная мощность (> 400 м) установлена на западе территории, в то время как на востоке она составляет 10-12 м, а местами (северный берег оз. Глубокого) полностью выклинивается. В ее строении выделяются три подсвиты, наибольший интерес из которых представляет средняя, сложенная пикритами. Состав этих пород, а также состав оливинов и расплавных включений из них был изучен нами (Соболев и др., 2009) в образцах: ХС-51-130 – из западной и 4270/13, СУ-50 – из восточной частей района (рис.1). Наиболее примитивными являются расплавы, сформировавшие пикриты восточной части района (рис.3), в то время как таковые на западе территории претерпели некоторую (до 10%) контаминацию коровым материалом – в соответствующих спектрах появляются слабые положительная Pb и отрицательные Ta-Nb и Ti аномалии, типичные для пород континентальной коры (в них же установлены и повышенные содержания хлора – до 0.2 мас. %). Содержания воды очень низкие – 0 - 0.2 мас.%. Исходные расплавы (например, обр. СУ-50, мас. %: SiO_2 -50.28, TiO_2 -2.31, Al_2O_3 -13.21, FeO -9.26, MnO -0.13, MgO -9.30, CaO -11.21, Na_2O -2.27, K_2O -0.33, P_2O_5 - 0.22, S- 0.02) кристаллизовались в приповерхностных условиях при температурах 1250-1170°C, летучести кислорода на 2.5-3 порядка ниже буфера Ni-NiO. Родоначальные расплавы гудчихинских пород отвечали пикробазальтам с концентрациями $\text{MgO} = 11\text{-}14$ мас. %, были резко недосыщены серой, содержали менее 0.25 мас. % воды и углекислоты и образовались на глубине 120 км (Соболев и др., 2009).

Пикриты восточной части района (обр. 4270/13 и СУ-50) характеризуются самыми низкими значениями $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.703$ и высокими $\epsilon_{\text{Nd}} = +5.1$ (Krivolutskaya et al., 2011) по сравнению с gd вулканитами западной части (обр. ХС-51/130). Эти различия, вероятно, связаны со структурными особенностями

территории: в ее восточной части (Хантайско-Рыбнинский вал, рис. 1) наряду с потоками появляются многочисленные вулканы центрального типа, свидетельствующие о преобладании вертикальных

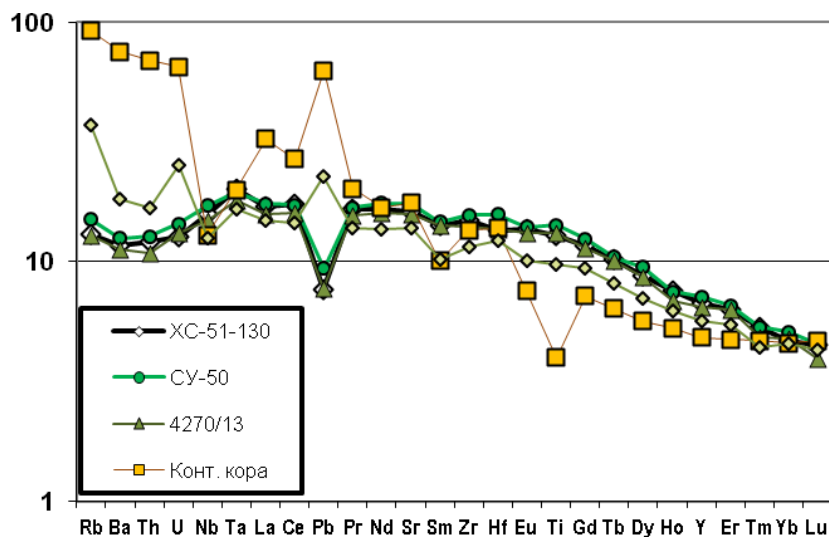


Рис.3. Спайдер-диаграммы расплавных включений из оливинов пикритов гудчихинской свиты.

Су-50 и 4270/13 – из восточной и XC-51-130 из западной частей территории. Желтые квадраты – континентальная кора

каналов, по которым происходило более быстрое извержение магм на поверхность, чем в соседней Хараелахской мульде.

2.2.2. Хаканчанская и туклонская свиты. Хаканчанская свита выделяется в качестве одного из немногих маркирующих горизонтов в районе, поскольку она сложена туфами и туффитами, незначительно варьирующими по мощности. Иногда в ней описываются редкие прослои толеитовых базальтов, однако до сих пор слагающие ее породы не были изучены современными методами (кроме 1 образца туфа, Fedorenko et al., 1996). Учитывая важное значение этих пород для понимания общей эволюции вулканизма, мы исследовали строение 8 разрезов средней части туфо-лавовой толщи: в северном периклинальном замыкании Хантайско-Рыбнинского вала, в северо-западной части Хараелахской мульды, на севере Норильской мульды, на западе Тунгусской синеклизы. В результате было установлено, что отмечавшиеся предыдущими исследователями прослои толеитовых базальтов в составе хаканчанской свиты присутствуют только в центральной части Норильского района (в районе Хантайско-Рыбнинского вала), и они резко отличаются по составу от чередующихся с ними в разрезе туфов.

Это проиллюстрировано на рис. 4, где выше пикритовых базальтов gd свиты установлена перемежаемость туфов и туффитов с толеитовыми базальтами, отнесенными в полевых условиях предположительно к хаканчанской свите. Однако данные по распределению редких элементов в них показали, что базальты и туфы обладают принципиально разными

геохимическими особенностями: например, La/Sm отношение в первых не превышает 2.7, в то время как во вторых достигает 5.7. Таким образом, базальты идентичны породам туклонской, а туфы и туффиты- надеждинской свитам.

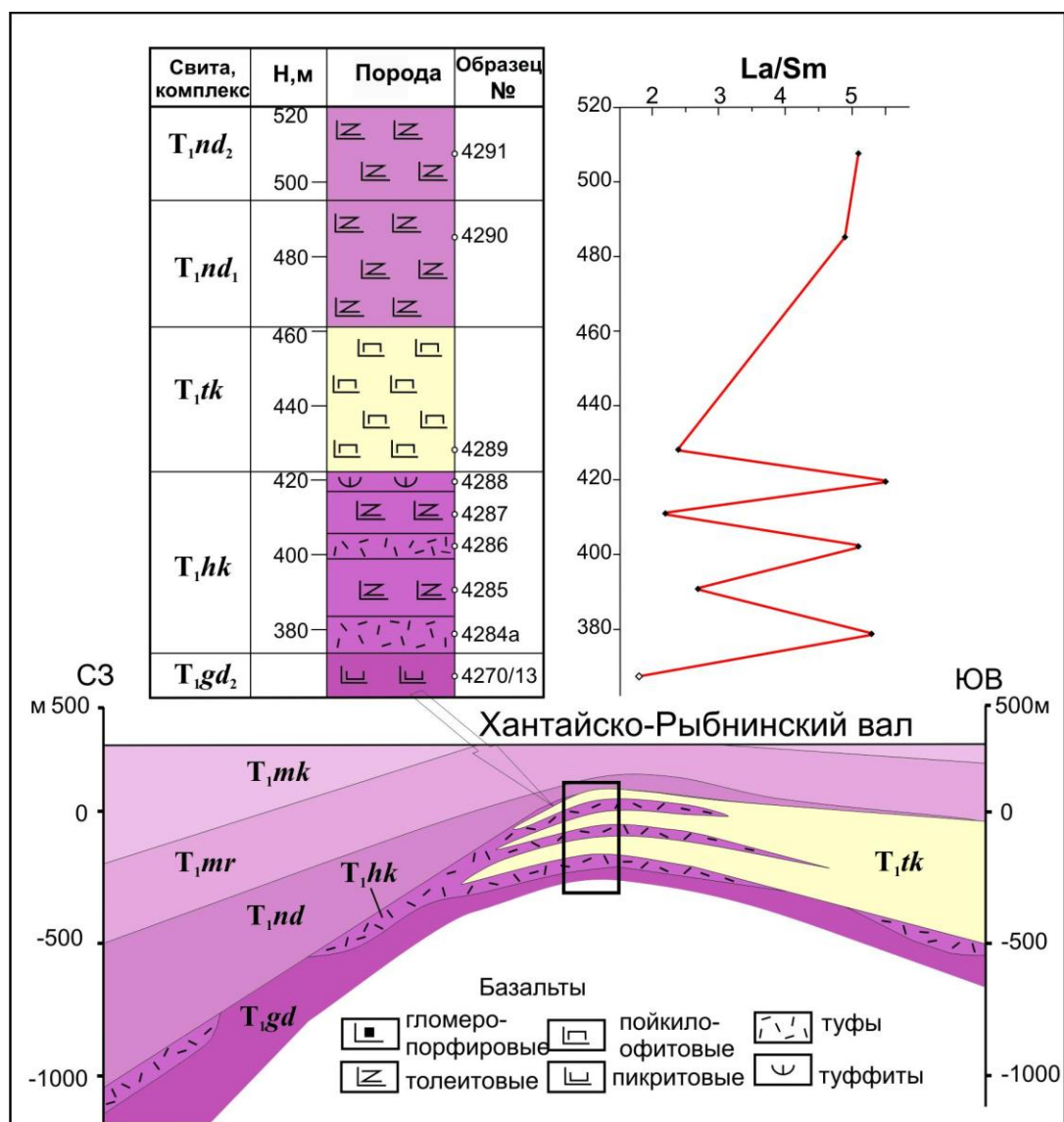


Рис. 4. Строение туфо-лавовой толщи в северном борту оз. Лама (положение разреза см. на рис.1)

Региональные исследования показали, что в западной части района туклонские породы исчезают вообще, в то время как мощность надеждинских вулканитов резко увеличивается к Енисей-Хатангскому прогибу. Обратная закономерность типична для восточной части территории, где существенно возрастают количество потоков и мощность пород туклонской свиты, а разрез надеждинской свиты резко сокращается. Из составленной нами схемы изопакит (рис. 5) отчетливо видно, что в постгудчихинское время существовали одновременно два магматических центра, продукты извержения которых одновременно отлагались в центральной части района, создавая прослои туфов

хаканчанской и базальтов туклонской свит. Фактически хаканчанская свита представляет собой нижнюю часть надеждинской свиты, сформировавшуюся в эксплозивный период.

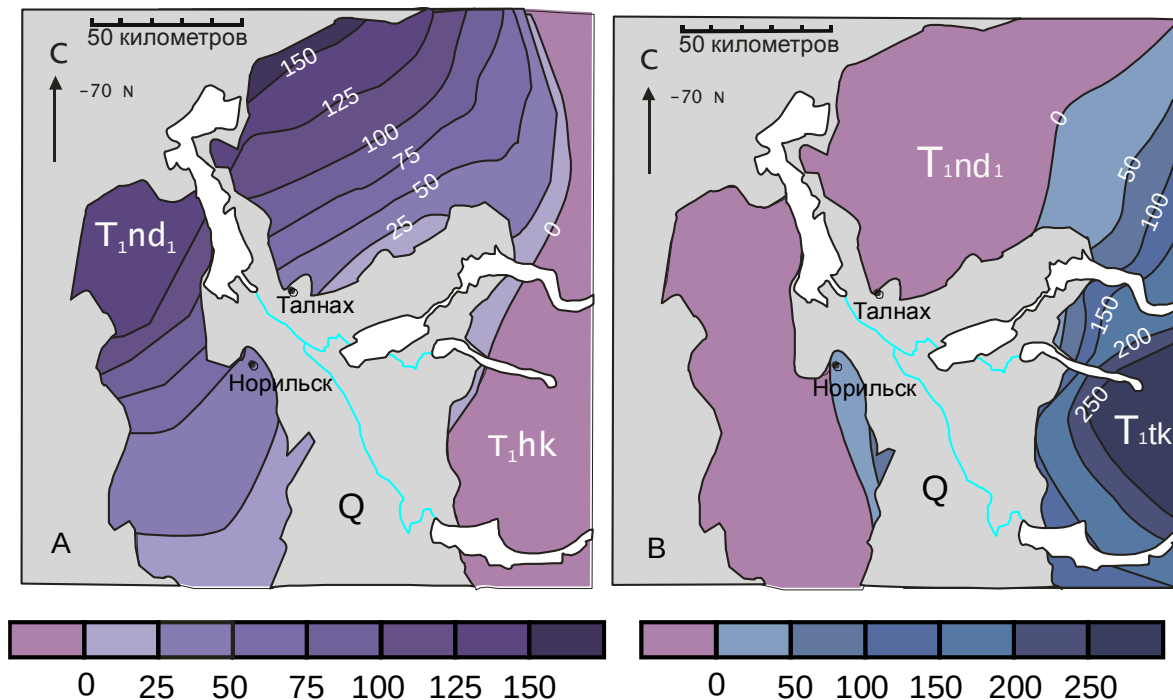


Рис.5. Схемы изопакт для вулканитов нижней части надеждинской (А) и туклонской (Б) свит

Ареал распространения нижненадеждинских вулканитов немного превышает ареал развития пород гудчихинской свиты, но по морфологии они очень близки. Это свидетельствует об унаследованности магматизма в различные периоды развития рифтовой структуры, выделяемой на севере Норильского района (Енисей-Хатангский и Игарско-Норильский прогибы).

2.2.3. Надеждинская свита (толеитовые, афировые и гломеропорфировые базальты) выделяется на фоне остальных свит повышенным содержанием SiO_2 (52-54 мас.%). Нами впервые доказано существование в ней пикритов. Ранее в Норильском районе пикриты и пикробазальты были обнаружены только в двух из них - гудчихинской и туклонской. В последней они образуют прослой, чередующиеся с пироксенофировыми базальтами в центральной части расслоенного покрова на г. Сундук. Сходные образования были описаны в районе правого притока р. Микчангда, где они предварительно отнесены к nd свите (Додин, Голубков, 1971), но позже охарактеризованы как гудчихинские (Рябов и др., 2001). По аналогии с Сундукским покровом эти породы стали рассматриваться как маркирующие горизонты туклонской свиты (Геологическая карта..., 1994). Полученные нами данные по содержаниям редких, RRE ($\text{La}/\text{Sm} = 5.6$) элементов и радиогенным изотопам ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} =$

0.7084 $\epsilon_{Nd} = -8.1$) Микчангдинского покрова позволяют с высокой степенью достоверности сопоставить их с нижненадеждинскими лавами, характеризующимися очень низкими содержаниями цветных металлов, особенно меди. Это касается даже высокомагнезиальных пород покрова, сложенных оливиновыми базальтами и пикритами. Все эти образования резко отличаются от близких по структурно-текстурным особенностям туконских базальтов (рис. 6, обр. СУ-33).

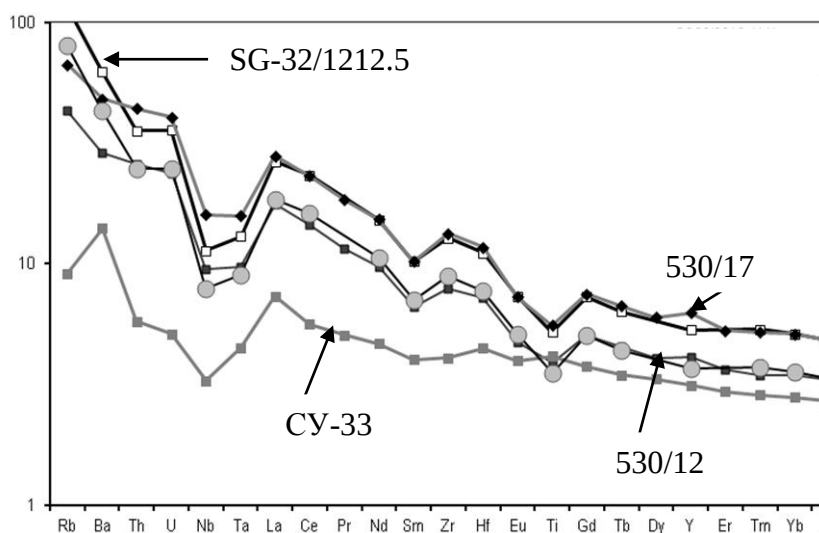


Рис. 6. Спайдер-диаграммы пород Микчангдинского и Сундукского покровов. обр. 530/12 – пикрит 530/17–базальт Микчангдинского покрова (nd_1), SG-32/2212.5 – эталонный образец надеждинской свиты по (Lightfoot et al., 1993), СУ-33 – пикрит Сундукского покрова (tk) и мод – модельный расплав (серые кружки)

Генетическая однородность рассмотренных нами высоко- и низкомагнезиальных пород может быть проверена путем получения последних простой кумуляцией оливина в толеитовых магмах с помощью математического моделирования, выполненного с помощью метода наименьших квадратов. Пикритовые разновидности получают прямым дополнением 30,5 % оливина ($Fo_{75.58}$ – среднее из 61 анализа) к надеждинским базальтам (взятым в качестве эталонного обр. SG32-2212.5 из работы (Fedorenko et al., 1996). Состав модельного расплава приведен на рис.6. Таким образом, изученные пикриты Микчангдинского покрова могут считаться впервые установленными продуктами наиболее примитивных расплавов в надеждинской свите. Несмотря на предположение о решающей роли этих пород в рудообразовании (Li et al., 2009), их значение в формировании месторождений до сих пор окончательно не установлено (Krivolutskaya et al., 2011a).

2.2.4. Моронговская, кумгинская свиты. При изучении геохимических особенностей эффузивов Хараелахской мульды были выделены «транзитные» серии (Wooden et al., 1993; Fedorenko et al., 1996), включающие верхнюю часть надеждинской и нижнюю часть моронговской серий, характеризующиеся

промежуточными геохимическими параметрами между типичными представителями этих свит (nd_1 и mr_2). На основании этого факта ко второй, главной, фазе траппового магматизма отнесены породы, начиная с верхней части моронговской по самоедскую свиты.

Проведенные нами исследования ряда опорных разрезов разных тектонических структур района показали, что в действительности наличие пород промежуточного состава является редкостью, обычно представители указанных свит обладают свойствами, типичными для этих стратиграфических подразделений (рис.7). Кроме того, иногда породы с «аномальными»

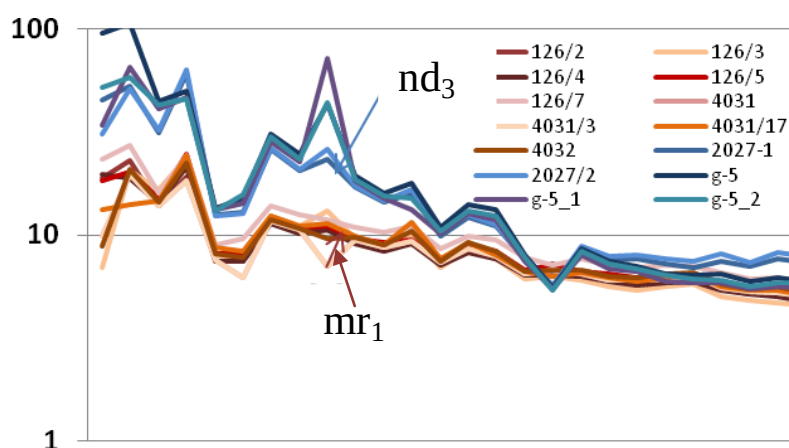


Рис.7. Спайдер-диаграммы гломеропорфировых базальтов верхней части надеждинской свиты (nd_3) и афировых базальтов нижней части моронговской (mr) свит по разрезам в правом борту р.Ю.Икэн и на южном берегу оз. Глубокого

свойствами (обогащенными спектрами) появляются и в центральных частях других свит (например, самоедской), которые никак нельзя отнести к «транзитным». Следовательно, выделение промежуточных свит представляется недостаточно аргументированным, и к основному трапповому этапу должны быть отнесены базальтоиды, начиная с туклонской свиты.

2. 3. Образование туфо-лавовой толщи

Периодичность в истории развития магматизма подчеркивалась всеми исследователями региона (рис. 8). Годлевский (1959) выделял 4 этапа, во время которых формировались либо только лавы, либо лавы и интрузивы. Р. Lightfoot et co-authors (1993) полагали, что формирование базальтов Норильского района происходило в два главных этапа, во время которых изливались базальты, соответствующие таковым океанических островов, а затем – внутриплитные, между которыми формировались в промежуточную стадию существенно отличающиеся от них вулканиты. А.И Альмухамедов и др. (1999) выделили образования рифтогенного и платформенного этапов на основании сравнения строения и составов вулканических образований Западной и Восточной Сибири. Представляемая в работе схема наиболее близка к данным этих исследователей, но принципиальные ее отличия заключаются в том, что

главные этапы не сменяли четко во времени один другой, а в определенный период времени сосуществовали вместе на соседних территориях. В выделении конкретных циклов различия еще более существенны (рис.8).

На основании полученных данных история вулканизма в районе представляется следующим образом. Первый этап развития магматизма связан с континентальным рифтогенезом, во время которого преимущественно изливались расплавы глубинного происхождения (с высоким Gd/Yb отношением, свидетельствующим о наличии граната в источнике). Активная магматическая деятельность была сосредоточена в Норильско-Игарской

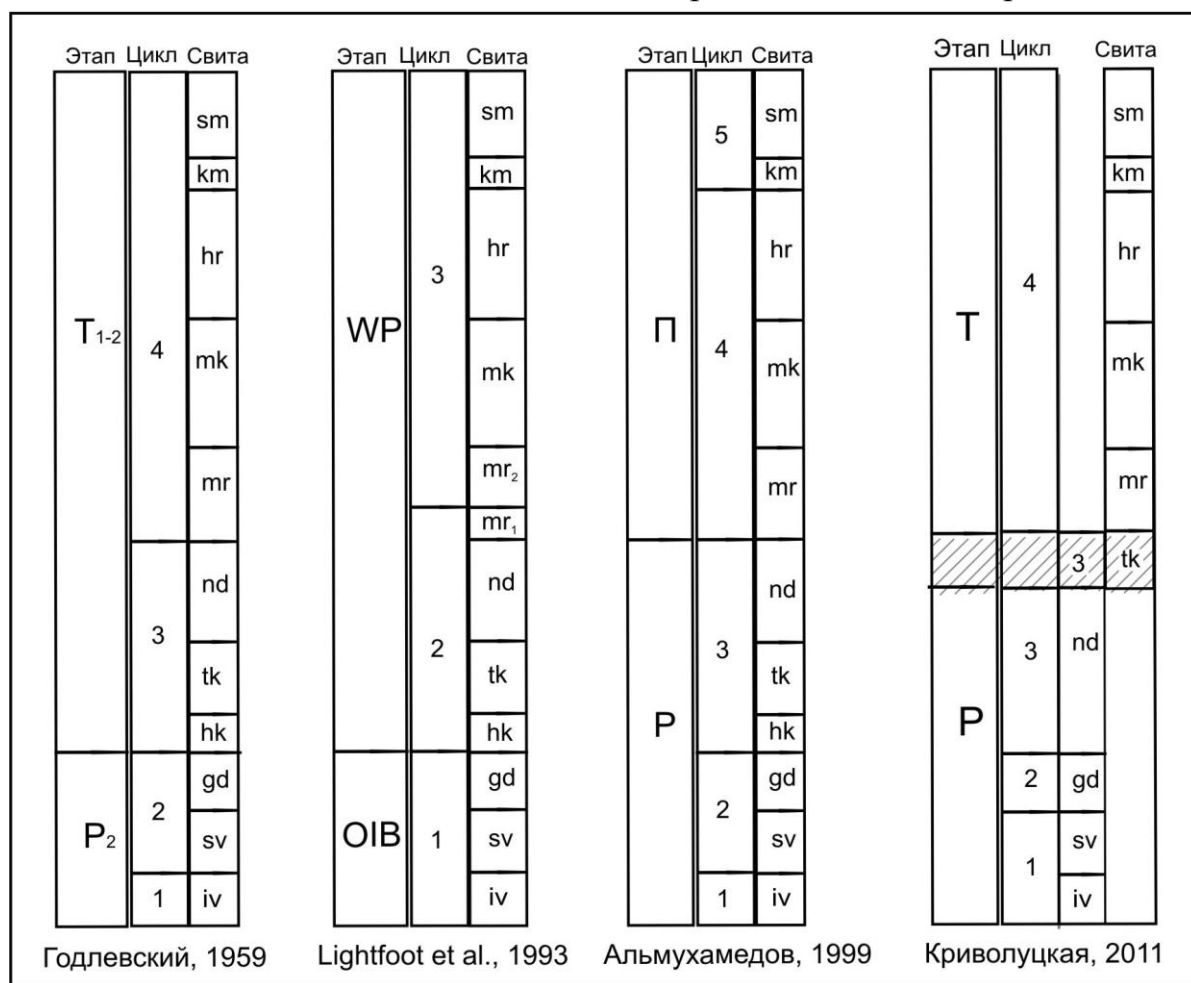


Рис.8. Схемы развития вулканизма по данным разных авторов

Обстановки: OIB – океанических островов, WP – внутриплитная; этапы: P – рифтовый, П – платформенный, Т – трапповый.

структуре (ивакинская и сыверминская свиты) и контролировалась Енисей-Хантагским разломом. Это наиболее отчетливо видно на примере базальтов гудчихинской и надеждинской свит. Аналогичное развитие прошли подобные структуры Западно-Сибирской платформы, где установлены субщелочные породы и базальты, близкие по составу к надеждинской свите (Saunders et al.,

2005). Одновременно с началом надеждинского эксплозивного цикла (туфы хаканчанской свиты) на востоке территории возник новый центр магматизма, и началось внедрение толеитовых, иногда пикритовых, базальтов туклонской свиты, близких к собственно трапповому этапу магматизма (моронговская–самоедская свиты). Продукты извержения последнего, в отличие от первого этапа, занимают огромные площади (сотни тыс. км²). Вероятно, центр извержения второго этапа располагался в районе плато Путорана, или в центральной части Тунгусской синеклизы, судя по увеличению мощности в этом направлении tk базальтов. Однако верхняя часть эффузивов этого этапа здесь существенно сэродирована. Магматическая деятельность по глубинным разломам (в частности, Енисей-Хатангскому) продолжалась и после основного этапа, о чем свидетельствуют щелочные породы Маймечя-Котуйской провинции.

ГЛАВА 3. ИНТРУЗИВНЫЕ ПОРОДЫ

3.1. Проблемы выделения интрузивных комплексов в Норильском районе

Проблема связи магматизма с рудообразованием особенно остро стоит для магматических месторождений, в которых руды являются составной частью интрузивных ультрабазит-базитовых комплексов. Норильский рудный район является исключительным местом для решения этой проблемы, благодаря широкому распространению интрузивов разной степени рудоносности: от содержащих суперкрупные платино-медно-никелевые месторождения до бедных и безрудных тел. Сравнительный анализ петро-геохимических особенностей, а также минерального состава пород и руд разных массивов позволяет оценить роль различных факторов в образовании оруденения.

Интрузивные породы района подразделены на комплексы (Геологическая карта..., 1994; табл.1) в зависимости от их внутреннего строения. Отчетливо дифференцированные интрузивы отнесены к норильскому (с выделением типов, отличающиеся по характеру дифференциации), а слабо дифференцированные - к огонерскому и далдыканскому комплексам. Однако такое разделение отражает скорее условия кристаллизации магм, чем свидетельствует об их происхождении.

3.2. Геохимическая типизация интрузивных пород Норильского района

Нами были изучены 35 массивов в Норильском районе, главные из них приведены в табл.1. По петрохимическим особенностям все они близки, за исключением пород ергалахского комплекса, выделяющегося своим субщелочным составом (ниже они не рассматриваются). Все ультрабазит-базитовые массивы нормальной щелочности разбиваются на три группы по

содержаниям редких элементов и их соотношениям (Gd/Yb-La/Sm - рис.9, 10А): дюмталейский, нижнеталнахский и норильский, их геохимические особенности (в том числе и изотопные) совпадают с таковыми гудчихинской, надеждинской и моронговской свит соответственно. И хотя по магнезиальности и титанистости породы норильского и нижнеталнахского комплексов отличаются от базальтов аналогичных свит ($10-16 \text{ MgO}$ и $\text{TiO}_2 < 1 \text{ мас. \%}$), подразделение интрузивов на соответствующие группы, вероятно, должно проводиться по спектрам распределения редких элементов, близким к этим типам магм (рис.9). Интрузивы, относимые по особенностям строения к разным типам норильского комплекса (зубовский, круглогорский, норильский), не отличаются между собой по геохимии пород и объединяются в одну группу. Интрузивы же далдыканского комплекса за счет повышенных содержаний TiO_2 (до 1.8 мас.%) могут быть выделены в самостоятельный тип в пределах норильского комплекса.

Наиболее важным заключением из проведенных исследований следует независимость геохимического состава пород от наличия или отсутствия в них сульфидной минерализации, что отчетливо видно на рис. 10Б и 10В, где показаны массивы разной степени рудоносности: точки составов их пород образуют единое поле на всех диаграммах.

3.3. Сопоставление геохимических особенностей рудоносных интрузивов разных регионов

Сравнение геохимических особенностей рудоносных интрузивов различных регионов России (Карело-Кольского, Северного Забайкалья, Восточного Саяна, всего 23 массива) свидетельствует об их сходстве: все они обладают типичными коровыми спектрами распределения редких элементов в породах. Между тем, ультрабазит-базитовые массивы с достаточной редким сочетанием титаномагнетитового и сульфидного оруденения, такие как Дюмталейский на Таймыре и Чинейский в С.Забайкалье, различаются принципиально по геохимическому составу пород: первый кристаллизовался из примитивной магмы, близкой к гудчихинской по распределению редких и радиоактивных элементов, в то время как второй был сформирован из обогащенного расплава, аналогичного по своим характеристикам к нижнеталнахскому типу.

ГЛАВА 4. ВЗАИМООТНОШЕНИЯ ЛАВ И РУДОНОСНЫХ МАССИВОВ

Вопрос о комагматичности интрузивных пород и вулканитов в Норильском районе поднимался неоднократно, но до сих пор не получил окончательного решения. Одни исследователи продолжают выделять вулcano-плутонические

формации (Duzhikov et al., 1992; Радько, 2009; Keays, Lightfoot, 2010), другие рассматривают массивы норильского комплекса в качестве производной самостоятельной магмы (Лихачев, 2006; Малич, 2010).

4.1. Геологические взаимоотношения между лавами и интрузивами норильского комплекса

Для решения этого вопроса в качестве главного объекта изучения была выбрана Норильская мульда, в пределах которой интрузивные образования с вкрапленными или сплошными рудами (месторождения Норильск-1, Масловское, Черногорский, Норильск-2), локализованы максимально высоко среди вулканогенных пород – в средней части разреза туфо-лавовой толщи. В других пикативных структурах района подобные массивы сосредоточены преимущественно в осадочных отложениях девона, подстилающих вулканиты (Хараелахский и Талнахский интрузивы в Хараелахской мульде; Вологочано-Пясинский интрузив в Вологочанской мульде), поэтому проводить их сопоставление с лавами значительно труднее. Важное значение имеет и тот факт, что в строении Норильской мульды принимают участие породы всех свит, используемых в модельных построениях разных авторов (гудчихинской, туклонской, надеждинской и моронговской), что позволяет детально рассмотреть вопрос об их роли в образовании руд.

В качестве опорных были выбраны скважины ОМ-6 и ОМ-25, в последней из них среди вулканитов присутствует силл норильского комплекса – апофиза Масловского интрузива, содержащего богатое прожилково-вкрапленное Cu-Ni оруденение. Несмотря на небольшую мощность (12 м), силл отчетливо дифференцирован от оливиновых габбро-долеритов до лейкогаббро. Для аргументированного отнесения его к норильскому комплексу были изучены составы пород, которые оказались идентичны таковым массива Норильск 1.

В разрезе вмещающих силл вулканитов были идентифицированы 8 свит (Криволуцкая, Рудакова, 2009), и установлено, что данная апофиза прорывает породы нижней части надеждинской свиты, отличающиеся высоким La/Sm отношением, и низкими концентрациями Cu и Ni (Lightfoot et al., 1990; рис.11). Таким образом, Масловский интрузив, а следовательно, и сопоставимые с ним остальные рудоносные интрузивы, внедрились после излияния ранних потоков базальтов пд свиты. Вполне вероятно, что они формировались и в более позднее время – постморонговское, поскольку нами на п-ве Каменном (оз. Лама) обнаружена дайка (безрудная), по всем геохимическим особенностям (содержанию $MgO = 8,92$, $TiO_2 = 0.81$ мас.% и редких элементов) близкая к породам норильского комплекса и прорывающая базальты тг свиты.

Таблица 1. Изученные интрузивы Норильского района (см. рис.1)

<i>Комплекс</i>	<i>Тип</i>	<i>Рудоносность</i>	<i>Интрузив (скв.)</i>
Далдыкан-ский		Безрудные	1. Далдыканский (кор. обн.) 2. Массив р. Валек (кор. обн.)
Моронгов-ский		Слабо оруденелые	3. Моронговский (кор. обн.)
Норильский	Нориль-ский	1. Уникальные месторождения	4. Хараелахский (ТГ-21, КЗ-456, КС-56) 5. Талнахский (ОУГ-2, 3Ф-12) 6. Норильск 1 (Г-22, МС-31, МН-7, карьер Медвежий Ручей)
		2. Средние и мелкие месторождения	7. Черногорский (Ч-55, МП-26) 8. Северо-Масловский (ОМ-4), 9. Южно-Масловский (ОМ-24) 10. Норильск 2 (МН-18, кор.обн.)
		3. Слабо оруденелые или безрудные массивы	11. Микчангдинский (МД-48/1200) 12. Массив скв. МД-57/1200 13. Массив скв. МД-50/1000
	Зубов-ский	1. Крупные месторождения	14. Южно-Пясинский (ОВ-36, НВ-12) 15. Вологочанский (ОВ-29)
		2. Мелкие месторождения	16. Зуб-Маркшейдерский (МП-34) 17. г. Большая Барьерная (МП-38)
	Нижне-талнах-ский	Рудопроявления или безрудные массивы	18. Нижне-Талнахский (ТГ-31, 3Ф-15. 19. Зеленогровский (Ф-233) 20. Массивы Фокинской площади (Ф-230/790; Ф-225)
	Кругло-горский	Слабо руденелые, безрудные	21. Нижний силл Норильск 1 (рудник МР), массив скв. ВТ-4
Огонерский		Безрудные	22. Огонерский (кор.обн.) 23. Массив скв. ОВ-36/466
Ергалахский		Безрудные	24. ВТ-2
		Оруденелый	Дюмталейский (ЛП-1)
?		Безрудные	25 -27 т.н. 4180, 2309, 490 28 - МЖК-1, 2 29. МД-57/300 30. Дайки оз. Лама (п-ов Каменный.)

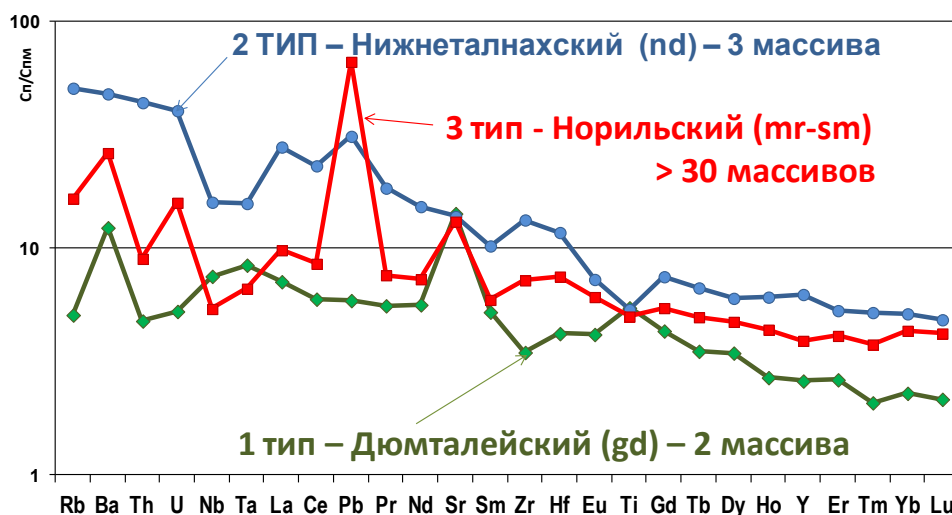


Рис. 9. Спайдер-диаграммы главных типов интрузивных пород

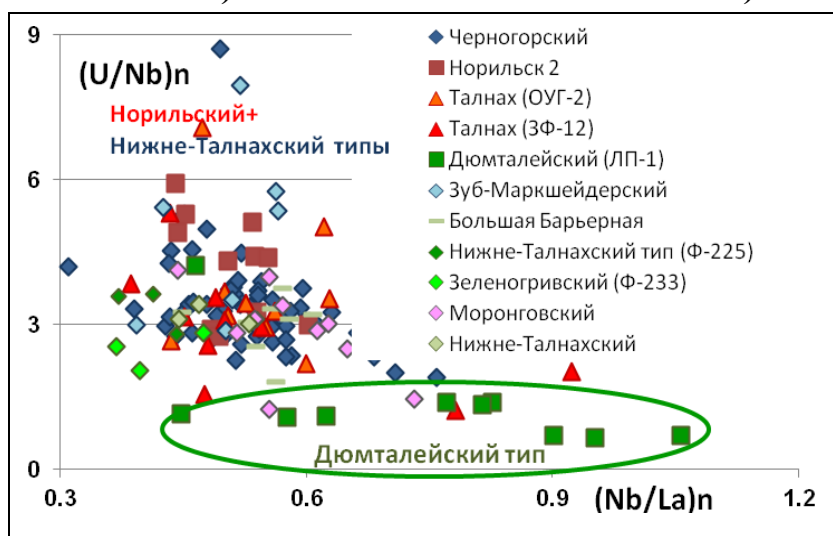
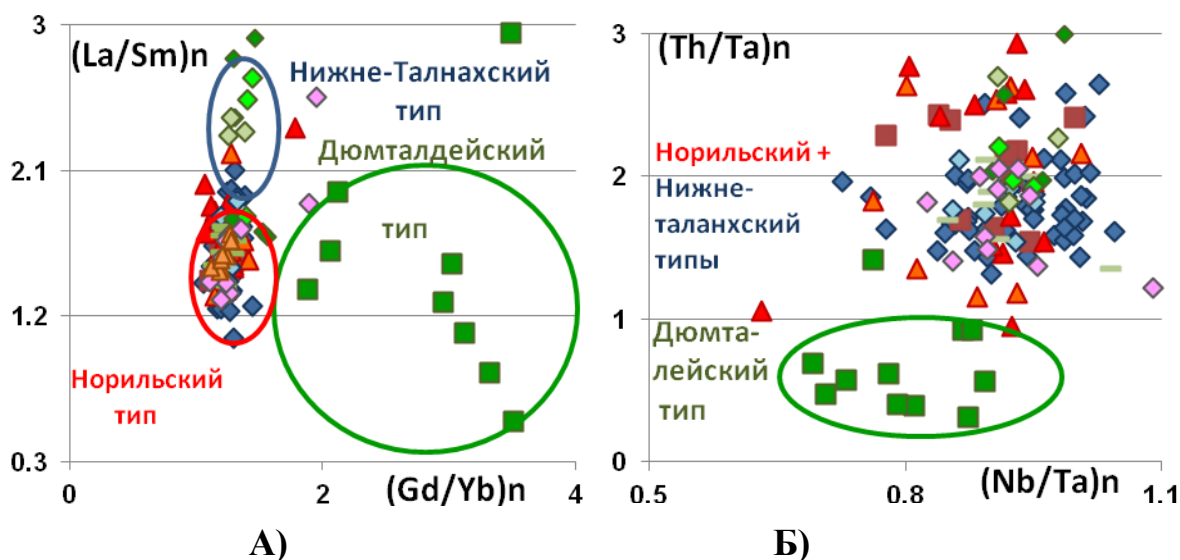
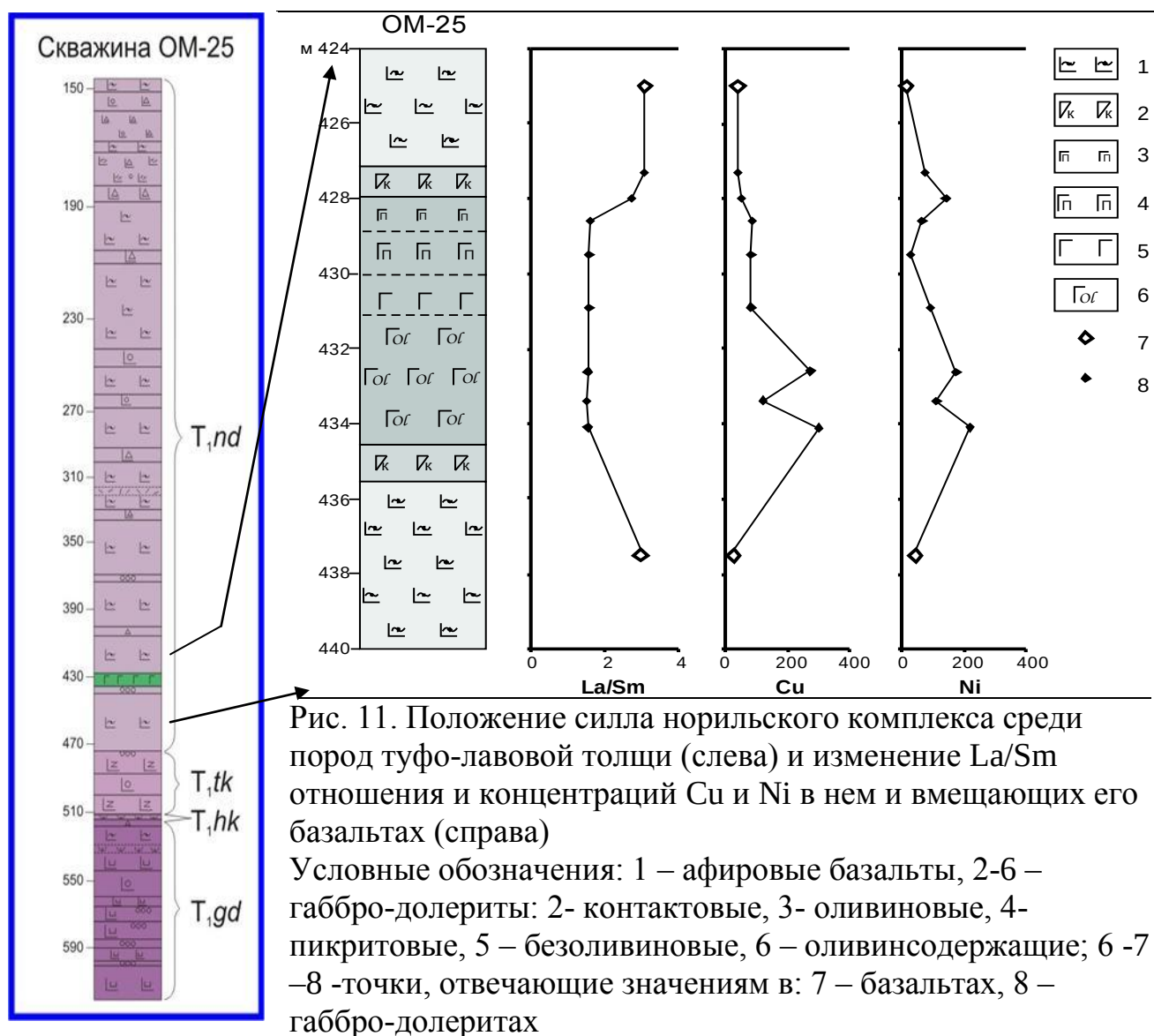


Рис. 10.
Диаграммы для
интрузивных
пород
(красные значки –
массивы
с богатыми
месторождениями,
синие и зеленые –
слабо оруденелые)
В)

Возможно, что рудоносные интрузивы внедрились даже после формирования всей туфо-лавовой толщи, поскольку часть изотопных данных по цирконам из Хараелахского массива дает возраст 220 млн. лет (Malich et al., 2010).



4.2. Сопоставление геохимических особенностей лав и интрузивов норильского комплекса

Отсутствие комагматичности между рудоносными массивами и породами гудчихинской, туклонской и надеждинской свит однозначно определяется, во-первых, прорыванием интрузивами Масловским и Норильск 2 вулканитов указанных свит, а во-вторых, различиями в их геохимическом и минеральном составе, что отражено на рис. 12. Остается предположение о связи интрузивов с породами моронговской свиты (Радько, 1991; Li et al., 2009). Главным контраргументом против этого положения является существенно более высокая

средневзвешенная магнезиальность интрузивов норильского комплекса по сравнению с лавами (10-12 по сравнению с 6-7 мас. % MgO, рис.13), не позволяющая напрямую сопоставить эти образования. В качестве решения

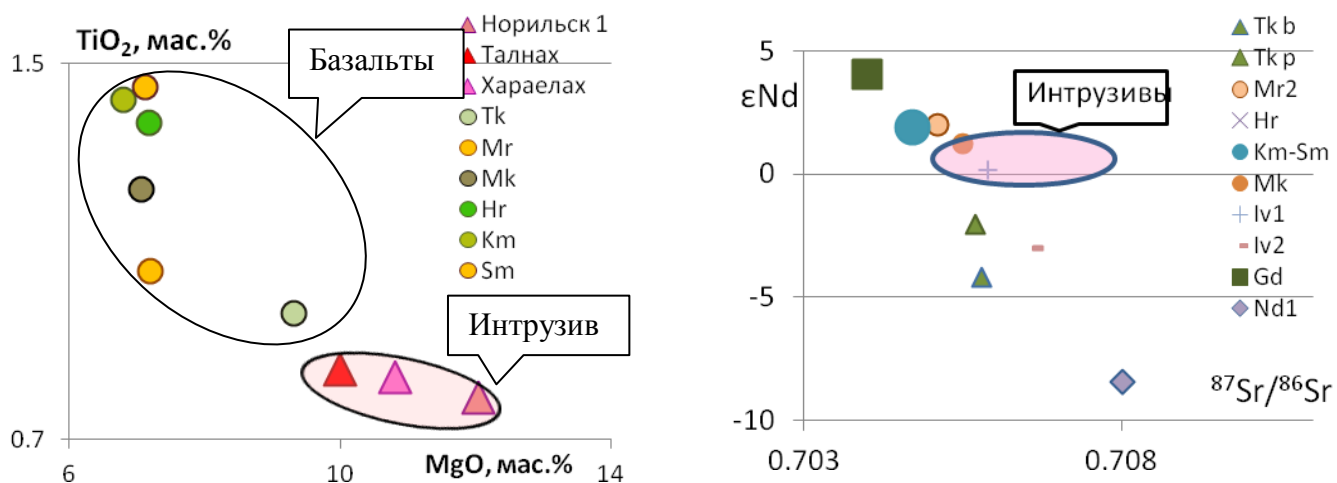


Рис. 12 Диаграммы $TiO_2 - MgO$ и ϵ_{Nd} для магматических пород района (по данным автора)

этого противоречия возникло предположение о полной отсадке оливина из моронговской магмы при ее движении к поверхности в коленообразных изгибах подводящих каналов (в современных интрузивных камерах). Однако в природе существуют и субвертикальные трещины, представляющие собой жерловые части вулканов, где этот процесс не должен иметь место (например, в верховьях р. Ю. Икэн и др.), но породы повышенной магнезиальности там также отсутствуют. И, наконец, геохимические характеристики mg и вышележащих свит – ϵ_{Nd} (Fedorenko et al., 1996; Lightfoot et al., 1993; Wooden et al., 1993) и, особенно, изотопный состав серы (Grinenko, 1985; Ripley et al., 2003, 2010; - $\delta^{34}S = 1-5$ в базальтах и до 18 ‰ в интрузивах) - существенно отличаются от аналогичных параметров для рудоносных интрузивов. Все сказанное выше позволяет сделать вывод о том, что рудоносные интрузивы напрямую не связаны с лавами, а были образованы в результате самостоятельного магматического импульса в посленадеждинское время.

ГЛАВА 5. СОСТАВЫ ИСХОДНЫХ РАСПЛАВОВ ИНТРУЗИВОВ

Различия в оценке роли магм в рудообразовании во многом обусловлены методическими подходами, применяемыми для определения исходных составов расплавов интрузивов и лав. До сих пор в Норильском районе они рассчитывались как средневзвешенные для отдельных интрузивных тел (Днепровская и др., 1987), либо же параллелизовались с: 1) пикритовыми базальтами и пикритовыми габбро-долеритами или 2) габбро-долеритами

боковых силлов рудоносных массивов (Золотухин и др., 1986; Рябов и др., 2000; Naldrett, 1992). Однако первые являются кумулятивными образованиями, а связь последних с интрузивами не всегда надежно установлена.

Нами для определения составов расплавов ряда массивов Норильского рудного района были использованы другие методы: 1) непосредственное измерение составов природно или экспериментально закаленных стекол в оливинах и пироксенах габбро-долеритов; 2) по результатам геохимической термометрии с использованием ЭВМ-модели «КОМАГМАТ-3.5».

5.1. Расплавные включения

Первые данные по магматическим включениям в норильских интрузивах были получены в 70-ые годы 20 века (Булгакова, 1971; Булгакова, Рябов, 1972; Ворцепнев, 1978), однако аппаратные возможности не позволили тогда определить составы стекол в ранних ликвидусных фазах. Современные исследования Сибирских траппов касаются преимущественно щелочных и субщелочных пород провинции (Соболев, Слущкий, 1984; Ryabchikov et al., 2001, Рябчиков и др., 2009; Соболев и др., 2009). Нами были впервые исследованы составы магматических включений в оливинах из пород главного этапа траппового магматизма: рудоносных (Талнахский, Хараелахский, Северо-Масловский и Норильск 1) и безрудных (Нижне-Талнахский, Зеленогровский) массивов (Криволицкая, Соболев, 2001). В оливинах обнаружены следующие типы магматических включений (фиг. 13):

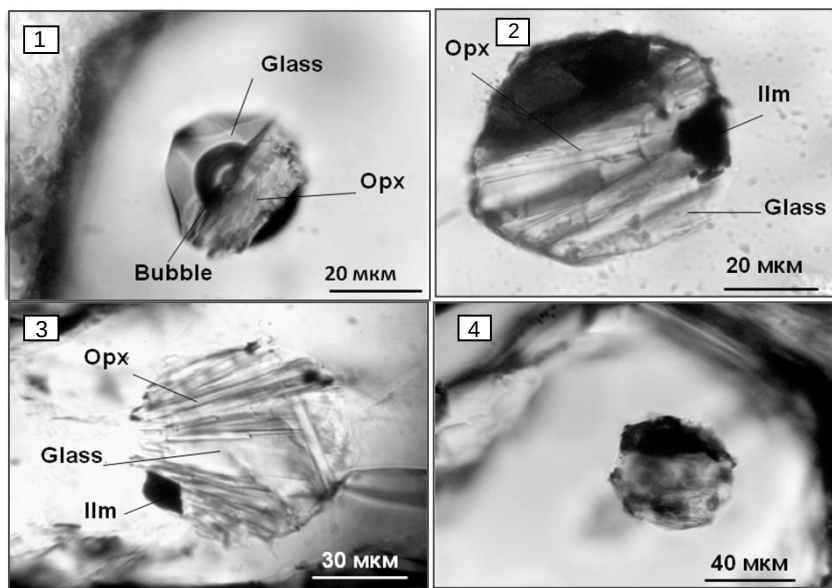


Рис. 13. Расплавные включения в оливинах пикритовых габбро-долеритов норильского комплекса: 1-3 – частично раскристаллизованные, 4 – полностью раскристаллизованное. Условные обозначения: Glass – стекло, Opх – ортопироксен, Ilm – ильменит, Bubble – пузырь

1) расплавные: стекловатые (газ + стекло) и раскристаллизованные – частично (стекло + газ + твердая фаза – ортопироксен, амфибол, ильменит, апатит) и полностью; 2) кристаллические (плагноклаз, пироксены, хромшпинелиды, апатит); 3) флюидные и 4) комбинированные (твердая фаза + расплав или

флюид). Разные типы включений использовались нами для оценки составов магм и условий их кристаллизации: расплавные раскристаллизованные – для определения составов исходных расплавов; стекловатые и флюидные – для установления содержания летучих компонентов; кристаллические – для определения f_{O_2} .

Раскристаллизованные включения нагревались до $T_{пл}$ последнего минерала-узника и закачивались. В большинстве опытов достигнута частичная гомогенизация (расплав + флюид). Однородность полученных экспериментально стекол проверялась путем определения их составов в нескольких точках. Измеренные составы (например, для типичного оливина $Fe_{0.78}$ из пикритовых габбро-долеритов содержания главных компонентов составляли, мас. %: SiO_2 -51.98, TiO_2 -1.19, Al_2O_3 -16.93, FeO -8.83, MnO -0.28, MgO -7.00, CaO -10.07, Na_2O -1.79, K_2O -0.68, P_2O_5 -0.02) пересчитывались до равновесия с оливином-хозяином по программе “ПЕТРОЛОГ-2” (Danashevsky, 2000). Согласно расчетам, летучесть кислорода при кристаллизации магм составляла $lgf_{O_2} = -7.4 \dots -7.5$, т.е. варьировала около буфера $NNO \pm 0.5$ (при $T_{гом} = 1210-1260^\circ C$).

Для включений из оливинов пикритовых габбро-долеритов установлен существенный разброс содержаний MgO (от 3 до 11 мас. %), отражающий фракционирование расплава при кристаллизации. Следует отметить, что концентрации хлора во включениях низкие и зависят от содержаний калия, они близки для рудоносных и безрудных массивов и достигают 0.2 мас. %. Это же можно сказать и о содержаниях воды, которые не превышают 1 мас. % в оливинах состава $Fe_{0.76}$ (в исходном расплаве они составляли 0.5-0.8 мас. %). Повышенные содержания цветных металлов в расплавах не обнаружены.

Кривые распределения элементов-примесей из включений в оливинах, нормализованные по отношению к примитивной мантии, разделяются на два типа: 1) близкие по характеру к кривым, полученным по породам (массивы Зеленогривский и Нижне-Талнахский) и 2) отличающиеся от них более высокими концентрациями всех редких элементов (интрузивы Талнахский, Хараелахский, Масловский и Норильск 1, т.е. рудоносные – рис. 14). Аналогичная картина наблюдается и при рассмотрении спектров распределения редких элементов, полученных для расплавных включений в пироксенах Южно-Масловского интрузива, в породах которого этот минерал является также ранней ликвидусной фазой (рис. 15).

Наибольший интерес из кристаллических включений представляют хромшпинелиды, состав которых (в равновесии с оливином и ортопироксеном)

позволяет судить о fO_2 кислорода в расплаве. Среди оксидов преобладает

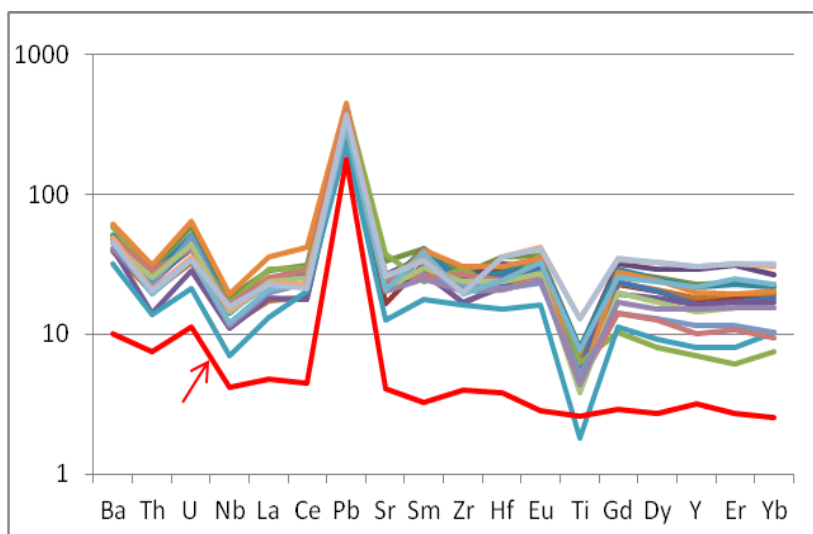


Рис. 14. Спектры распределения редких элементов в расплавных включениях в оливинах из пикритовых габбро-долеритов месторождения Норильск 1
Красная линия – спектр породы

хроммагнетит, причем по составу сильно отличаются минералы из различных интрузивов. Хромшпинелиды из пикритовых габбро-долеритов Талнахского, Имангдинского, Норильск 1 массивов являются наиболее хромистыми: $Cr\#Cr/(Al+Cr) = 0.77-0.81$, в то время как нижнеталнахские оксиды обладают

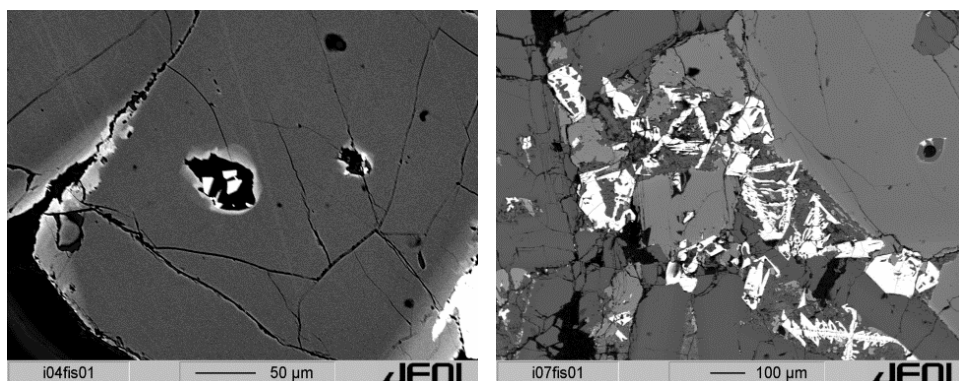


Рис. 15. Расплавные включения в пироксенах Южно-Масловского интрузива (фото в BSE)

(белое – скелетные кристаллы магнетита, серое – пироксен, темно-серое – плагиоклаз)

значительно более низким показателем: 0.46–0.57. Следует отметить очень высокие содержания титана (до 6.77 мас. %) в шпинелидах Талнахского интрузива, на основании чего их можно отнести к титанохромитам. Рассчитанные значения фугитивности кислорода (Baullhous, 1991) при кристаллизации магм, сформировавших разные интрузивы, составляют ($\lg fO_2$): Талнахский -7.5, Норильск 1 -7.8, Черногорский -6.3, Нижне-Талнахский - 4.2, т.е. рудоносные интрузивы характеризуются более восстановительными условиями формирования.

5.2. Оценка составов расплавов по результатам геохимической термометрии с использованием ЭВМ-модели КОМАГМАТ-3,5

была выполнена для Талнахского массива. Определение фазового состава и температуры исходной магмы методом геохимической термометрии основано на предположении о внедрении в камеру кристаллизации расплава с долей взвешенных кристаллов (Арискин, Бармина, 2000). В рамках этой модели впервые продемонстрирована возможность формирования внутренней структуры интрузива в результате кристаллизационной дифференциации (Криволуцкая и др., 2001). Ранее в качестве главного аргумента против этой гипотезы приводился факт несоответствия состава зон закалки и средневзвешенного состава интрузива (отличающегося повышенной магнезиальностью по сравнению с контактовыми габбро-долеритами – $\text{MgO} = 10\text{--}12$ и $7\text{--}8$ мас. % соответственно). Проведенные расчеты продемонстрировали сходство вычисленного химического состава расплава и состава контактовых габбро-долеритов, учитывая наличие вкрапленников оливина (и плагиоклаза) в исходной магме. Состав расплава отвечал толеитовым ферробазальтам с несколько повышенными концентрациями MgO ($7\text{--}8.5$ мас. %) и щелочей, особенно K_2O , и близок к толеитовым базальтам моронговской и мокулаевской свит. Полученные расчетные данные хорошо согласуются с природными данными: составы интрателлурических фаз соответствуют измеренным составам оливинов и плагиоклазов ($\text{Ol} - \text{Fo}_{80} \pm 1.0$; $\text{Pl} - \text{An}_{80} \pm 1.5$), а температура кристаллизации близка к полученным температурам гомогенизации расплавных включений ($1180\text{--}1210^\circ\text{C}$). Следует подчеркнуть, что сходство получено только для расплавов, а в целом состав магмы (расплав + газ + твердая фаза), сформировавшей интрузив, был более магнезиальным, чем состав исходной магмы для вышеназванных свит.

5.3. Флюидный режим

Одним из условий образования суперконцентраций металлов в продуктах гипербазит-базитовых магм нередко признается существование особого флюидного режима. Однако при этом состав флюидов предполагается совершенно разный. Согласно представлениям одних авторов, исходные расплавы были обогащены водой и хлором (Дистлер и др., 1999), а других – метаном, сероводородом и др. (Аплонов, 1995). Идея повышенного содержания воды в расплавах базируется на изучении контактовых ореолов рудоносных интрузивов (Туровцев, 2002), предположительно образованных под воздействием отделившихся флюидов при кристаллизации магм, а хлора – на основании обнаружения Pt-Pd соединений с As, Sb, Te, Se в рудах, перенос

которых возможен хлоридными комплексами даже при низких температурах (Boudreau et al., 1986). Другая точка зрения основана на результатах исследований пород методом валовой хроматографии, согласно которой в процессах рудообразования принимали участие преимущественно восстановленные газы – H_2 , CH_4 , CO , N_2 и др. (Неручев, Прасолов, 1995). Но результаты изучения флюидных включений в минералах трапповой формации (Булгакова, 1971; Ryabchikov et al., 2001; Рябчиков и др., 2004; Соболев и др., 2009₁) свидетельствуют об их водно-углекислом составе.

Наши исследования подтверждают последний вывод (Krivolutskaya et al., 2001; Криволуцкая и др., 2002). Флюидные включения в оливинах пикритовых габбро-долеритов составляют около 1–3 % от общего объема всех включений. Их размер обычно не превышает первых микрон в диаметре (до 40 мкм), они обладают либо формой отрицательных кристаллов оливина, либо сферической. На первом этапе включения были подвергнуты охлаждению в криокамере до $T = -165 \dots -190^\circ\text{C}$, что не привело к видимым изменениям, свидетельствующим о чрезвычайно низкой плотности образующих их флюидов. Выполненные прямые определения составов газов во флюидных включениях с помощью рамановской спектроскопии позволили обнаружить только низкие концентрации H_2O и CO_2 в их составе и подтвердить, что такие газы как водород, азот и метан отсутствуют.

Для проверки другого фактора, выдвигаемого в качестве доказательства повышенной флюидонасыщенности исходных магм, – мощных контактовых ореолов вокруг интрузивов – была проведена оценка состава вод, участвовавших в их формировании. С этой целью выполнено изучение стабильных изотопов (O, H, C) в габбро-долеритах разных массивов и во вмещающих их породах (Покровский и др., 2002, 2005). Центральные части интрузивных тел характеризуются изотопным составом кислорода $\delta^{18}\text{O} = 5.5$ ‰, типичным для вод магматического происхождения, в то время как в области контакта наблюдается утяжеление изотопного состава до 18 ‰. Полученное распределение $\delta^{18}\text{O}$ не подтверждает предположения о гидротермальной переработке окружающих пород под воздействием магматических флюидов, отделившихся при кристаллизации магмы. Это продемонстрировано на примере нескольких интрузивных тел (Талнахского, Зеленогровского, Нижне-Талнахского, Норильска 1). Обогащенность тяжелым изотопом кислорода эндо- и экзоконтактовых зон массивов свидетельствуют об их активной проработке (как наиболее проницаемых участков) метеорными, а не магматическими водами. Вовлечение метеорных вод в процессы, протекающие

на постмагматическом этапе становления интрузивов, представляется вполне естественным, поскольку внедрение таких огромных объемов магматических масс, которые наблюдаются на Сибирской платформе, не могло не вызвать притока флюидов из вмещающих пород и вовлечение их в циркуляцию.

ГЛАВА 6. ХИМИЧЕСКИЙ И МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ РУД МЕСТОРОЖДЕНИЙ НОРИЛЬСКОГО РУДНОГО УЗЛА

6.1. Соотношения полезных компонентов в рудах

Наряду с рассмотренным выше вопросом о связи геохимических особенностей интрузивов с масштабом оруденения (глава 3), возникает естественный вопрос о наличии или отсутствии корреляции между составом пород и химическим и минеральным составом заключенных в них руд. Нередко Pt/Pd, Ni/Cu и другие отношения металлов в рудах рассматриваются как отражение исходного состава магм рудоносных комплексов, особенно их магнезиальности. Сравнительный анализ средневзвешенных составов пород и вкрапленных руд проведен для опорных скважин месторождений Норильского рудного узла (табл.2): ОМ-4 и ОМ-24 Масловского месторождения, вскрывающие интрузивные породы максимальной мощности (380 и 420 м) в северной и южной частях соответственно, и МС-31 месторождения Норильск 1.

Таблица 2. Средневзвешенные составы пород норильского рудного узла

Месторождение	Скв.	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O
С. Масловское	ОМ-4	46.71	0.70	11.82	12.66	0.24	16.68	8.91	1.75
Ю.Масловское	ОМ-24	50.42	1.42	14.09	13.17	0.22	7.65	9.78	2.44
Норильск 1	МС-31	46.99	0.91	16.25	11.67	0.15	11.90	9.46	1.94
Окончание таблицы 2									
Скважина, №	K ₂ O	P ₂ O ₅	Ni	Cu	Co	Zn	V	Cr	Ni:Cu
ОМ-4	0.42	0.09	1173	1135	107	153	248	n/a	1.03
ОМ-24	0.64	0.17	185	184	53	70	216	n/a	1.01
МС-31	0.52	0.15	311	410	59	75	181	3217	0.76

Примечание: содержания окислов даны в мас.%, элементов – в г/т.

В разрезе на севере Масловского месторождения доминируют высокомагнезиальные габбро-долериты, составляя две трети от его мощности. Южное интрузивное тело отличается принципиально иным внутренним строением: пикритовые габбро-долериты обладают очень незначительной мощностью (около 15 м), в то время как мощность такситовых габбро-долеритов в нижней части интрузива составляет 50 м. Это отражается на средневзвешенных составах интрузивов, средневзвешенное содержание MgO в которых отличается более, чем в 2 раза, составляя 16.68 и 7.65 мас.%

соответственно для северного и южного тел (табл.2). Промежуточное значение $MgO=11.90$ мас.% характерно для Норильска 1. Между тем, Ni/Cu отношение близко в рассмотренных породах первых двух массивов, в то время как в последнем медь даже доминирует над никелем. Корреляция между Ni и MgO устанавливается только при низких концентрациях Ni (Ю.Масловский интрузив, $R^2=0.72$), при повышении содержаний сульфидов в рудах эта зависимость ослабевает ($R^2=0.38$ для Норильска 1). Аналогичная картина наблюдается и для Co , поскольку при низких концентрациях он, также как и никель, входит в виде изоморфной примеси в оливин (174-206 ppm, Krivolutskaia et al., 2011). Но для меди, перераспределяющейся в основном в сульфидный расплав при отделении его от силикатного, такие закономерности отсутствуют. Максимальные значения Ni/Cu отношения в рудах Норильска 1 и Северного Масловского месторождения достигают 16, в то время как в большинстве образцов из Южного Масловского месторождения Cu доминирует над Ni ($Ni/Cu < 1$).

Pd/Pt соотношение в рудах обычно колеблется около 3, что типично и для Норильска 1, и для Северного Масловского месторождений (где оно достигает 5-6). В рудах Южно-Масловского интрузива оно снижается почти до 1, хотя при низкой магнетиальности слагающих его пород следовало бы ожидать увеличения Pd/Pt отношения.

6.2. Минеральный состав руд

Химические особенности руд находят свое отражение в их минеральном составе: близкие соотношения цветных металлов свидетельствуют о примерно равных количествах главных рудообразующих сульфидов в них. Наибольший

Таблица 3. Главные минералы благородных металлов месторождений Норильского рудного узла (в порядке распространенности)

Северное Масловское	Южное Масловское	Норильск 1
Звягинцевит	Au-Ag сплавы	Fe-Pt сплавы
Fe-Pt сплавы	Fe-Pt сплавы	Атокит-
	Сперрилит	Рустенбургит
Атокит-		(Pd, Pt) ₅ (Sb, Sn,
Рустенбургит		As, Pb) ₂
Котульскит		Котульскит
Мончеит		Соболевскит
Сперрилит		Сперрилит

интерес вызывают редкие минералы, особенно минералы благородных металлов, поскольку именно по ним наиболее отчетливо выявляются

характерные особенности отдельных месторождений. Отличительная черта северного интрузивного тела Масловского месторождения – обилие минералов платиновой группы во вкрапленных рудах, скопления которых часто видны невооруженным глазом. Среди них преобладают минералы группы атокита-рустенбургита, а среди халькопирита, особенно в прожилках и жилах, доминирует звягинцевит (табл.3). По минеральному составу руды Северного Масловского месторождения близки к таковым Норильска 1, хотя некоторые отличия установлены: более широкое распространение в них звягинцевита,

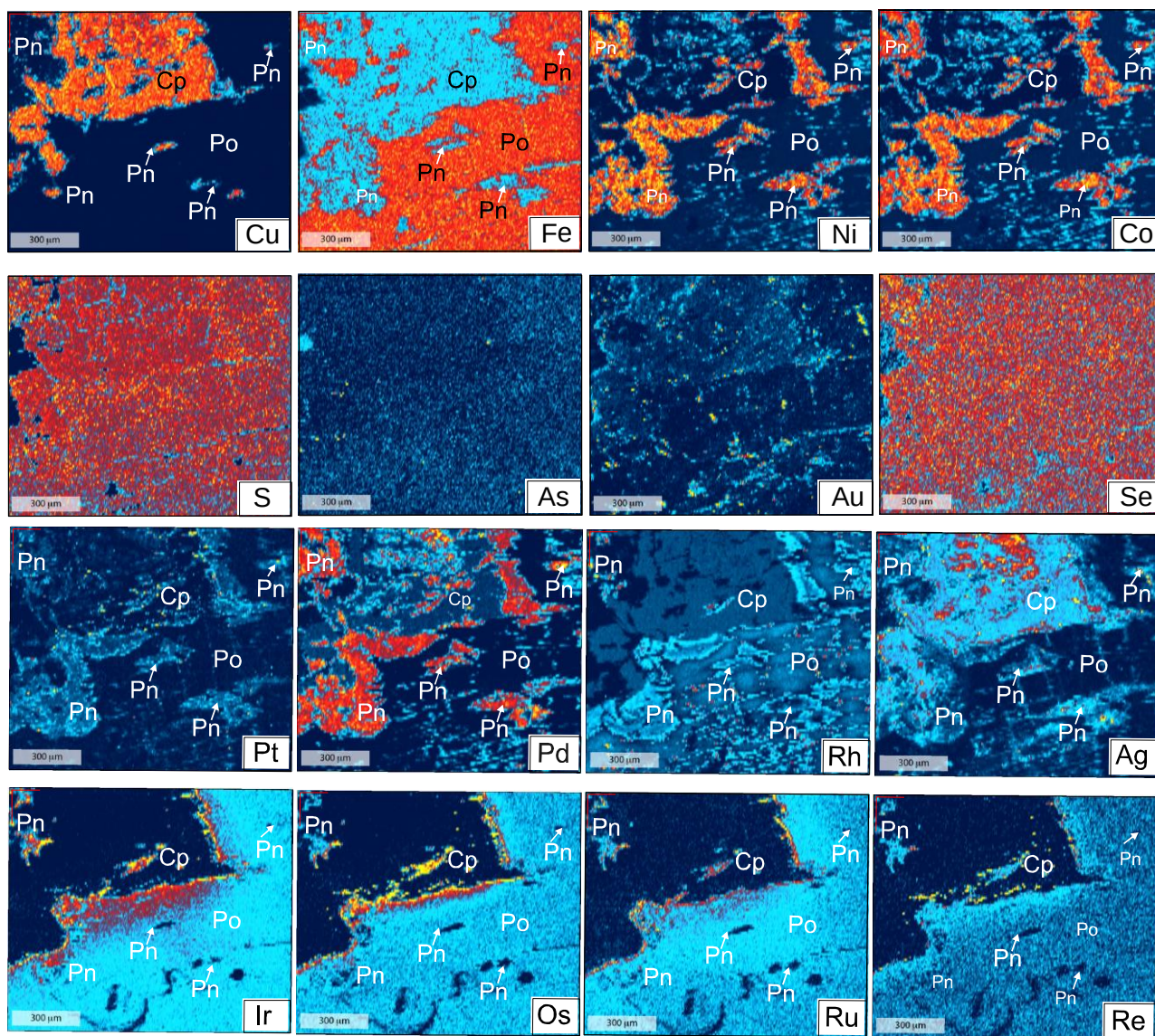


Рис. 16. Карты распределения главных и примесных элементов в рудообразующих сульфидах Северного Масловского месторождения (LA-ICP-MS). Шкала – 300 мкм. Po-пирротин, Cp –халькопирит, Pn-пентландит

наличие самородного палладия и ряда редких Pd фаз, отражающие существенное преобладание Pd над Pt. Иная картина наблюдается в рудах Южного Масловского месторождения, где преимущественно встречаются

сплавы золота с серебром и железа с платиной, подчеркивающие специфику оруденения, выражающуюся в снижении содержаний Pd относительно Pt до 1:2 (а иногда и превалировании платины в рудах).

Помимо собственных минеральных фаз элементы платиновой группы (ЭПГ) в виде примесей присутствуют в рудообразующих сульфидах (рис. 16). Особенно наглядно это видно на картах распределения главных элементов и элементов-примесей, полученных с помощью метода лазерной абляции (LA-ICP-MS) в Laurentian University (Садбери, Канада, аналитик J. A. Petrus) для главных рудообразующих сульфидов вкрапленных руд Северного Масловского месторождения (богатых ЭПГ).

Предел обнаружения для изученных элементов колеблется от 10 до 300 ppb (соответственно для Au и Ru) Интересно отметить, что все редкие платиноиды, содержания которых низки в рудах (Ir, Os, Ru), а также Re входят в пирротин, в то время как Pd, Pt и частично Rh концентрируются преимущественно в пентландите. В более бедных рудах Южного Масловского месторождения эти различия почти незаметны из-за близкого к пределу обнаружений концентраций платиновых металлов в сульфидах.

6.3. Изотопный состав серы

В моделях формирования норильских месторождений большое значение придается процессам ассимиляции вмещающих пород базитовыми расплавами, в качестве главного доказательства которых приводится тяжелый изотопный состав серы норильских сульфидов, полученный предположительно за счет участия в рудообразовании ангидритов вмещающий пород *in situ* (Li et al., 2009; Ripley et al., 2010). Однако полученные нами данные противоречат этому положению. Так, руды Масловского месторождения характеризуются значениями $\delta^{34}\text{S} = 6\text{--}11\text{‰}$, в то время как для вмещающих их базальтов надеждинской свиты типичны значения $\delta^{34}\text{S} < +5 \text{‰}$ (Ripley et al., 2003). Следовательно, последние не могли служить источником тяжелой серы в сульфидах.

Процесс ассимиляции магмой вмещающих пород должен, в первую очередь, отражаться на изменении химического и минерального состава интрузивных пород, особенно в приконтактных зонах массивов. Это отмечается редко и в ограниченных масштабах. Наиболее показательным является поведение редких элементов. Для демонстрации их распределения в приконтактных зонах был выбран случай близости составов интрузивных и вмещающих пород по главным компонентам – габбро-долеритов и базальтов,

но принципиально отличающихся по содержаниям редких элементов: контакт нижненадеждинских лав (обогащенных легкими РЗЭ, рис.6) с Южно-Масловским интрузивом норильского комплекса (с нормальными их содержаниями, рис.11). Весьма характерным является La/Sm отношение, которое повышается в зоне эндоконтакта мощностью до 1 м. Процесс контаминации фиксируется также и по распределению меди, которой существенно обеднены рассматриваемые лавы.

Во-вторых, при ассимиляции средневзвешенный состав интрузива должен зависеть от состава вмещающих пород – карбонатных, терригенных или вулканогенных. Однако такой зависимости не наблюдается, составы интрузивов очень близки между собой, особенно по содержаниям редких элементов. Концентрации главных компонентов в данном случае являются менее показательными, поскольку соотношение отдельных горизонтов в разных массивах существенно варьирует.

Еще одним аргументом против существенной роли ассимиляции в рудообразовании (Li et al., 2009; Naldrett, 2009; Ripley et al., 2010) является несоответствие изотопного состава серы и стронция в интрузивных породах. Так, для существенно контаминированного Нижне-Таланахского массива установлены повышенные значения радиогенного стронция, коррелирующие с обогащенностью пород легкими элементами, а именно их обогащенностью литофильными элементами. Однако изотопный состав серы заключенных в них сульфидов близок к мантийному. Напротив, для Таланахского интрузива, образование сплошных руд которого связывается с ассимиляцией большого объема ангидритового материала, типичны низкие значения отношений изотопов стронция ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.705\text{--}0.706$) и небогатые спектры распределения редких элементов, но тяжелый изотопный состав серы – $\delta^{34}\text{S}$ (до +15 ‰).

Нами впервые получены содержания радиогенных изотопов в ангидритах из девонских пород (Криволуцкая, 2011), удаленных от полей проявления магматизма. Наиболее важным является установление изотопных соотношений $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.708637\text{--}0.708949$ - ниже, чем в надеждинских базальтах (до 0.709171; Wooden et al., 1993) и породах Нижне-Таланахского интрузива (до 0.709946, Hawkesworth et al., 1995; все данные приведены в пересчете на возраст 251 млн. лет). Для изученных образцов ангидритов характерно также аномальное обогащение радиогенным свинцом ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ до 24.53), что должно было бы сказаться на изотопном составе в различной степени контаминированных магматических пород, однако этого не происходит. Таким

образом, ангидрит не может рассматриваться в качестве контаминанта, как это предполагается. Ассимиляция вмещающих пород в камерах кристаллизации интрузивов либо отсутствовала, либо имела крайне ограниченное распространение и на образование руд не влияла.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В начальный период изучения (Котульский, 1948; Годлевский, 1959; Дюжиков и др., 1988) интрузивы норильского комплекса рассматривались как продукты самостоятельного магматического импульса. Последующее предположение о комплементарности интрузивов с надеждинской свитой, основанное на ее обедненности цветными и благородными металлами (Naldrett, 1992), оказалось малореальным, поскольку была показана невозможность накопления сульфидов в недосыщенном серой надеждинском расплаве (Лихачев, 1997). Поэтому было предложено двухступенчатое отложение сульфидов: сначала из надеждинских расплавов, а затем их транспортировка насыщенной серой моронговской магмой в камеру кристаллизации и осаждение в виде рудных залежей (Li et al., 2009).

Полученные нами минералого-геохимические данные о составах пород и их взаимоотношениях с лавами позволили подтвердить первоначальные представления о формировании рудоносных интрузивов из самостоятельных магм второго этапа, которые имели скорее нижнекоровую, чем мантийную природу. Об этом свидетельствует ряд фактов. Во-первых, низкая магнезиальность основного объема базальтов и интрузивов ($Mg\# = MgO/(MgO+FeO) \times 100 = 37-38$) по сравнению с мантийными породами (где этот показатель ≥ 50). Во-вторых, высоко-Mg породы провинции ($Mg\# 55-63$ - пикриты tk и nd свит и пикритовые габбро-долериты) при условии их образования из перидотитового источника должны содержать высокомагнезиальный оливин ($>Fo_{90}$ - Rudnick, Gao, 2003), но его состав реально не превышает Fo_{83} (Соболев и др., 2009). В-третьих, концентрации всех редких элементов в породах норильского комплекса (рис.17) полностью совпадают с таковыми для пород нижней коры, как и их изотопные характеристики ($^{87}Sr/^{86}Sr = 0,705-0,706$ и $\epsilon Nd = 0 \pm 1$).

Обычно эти особенности пород объясняются контаминацией (на 30%) коровым веществом мантийных магм (Wooden et al., 1993; Arndt et al., 2003) и отсадкой из него оливина. Однако выше было продемонстрировано, что процессы ассимиляции практически отсутствовали на уровне камер, а

доказательства масштабности их проявления в нижних частях коры в литературе отсутствуют.

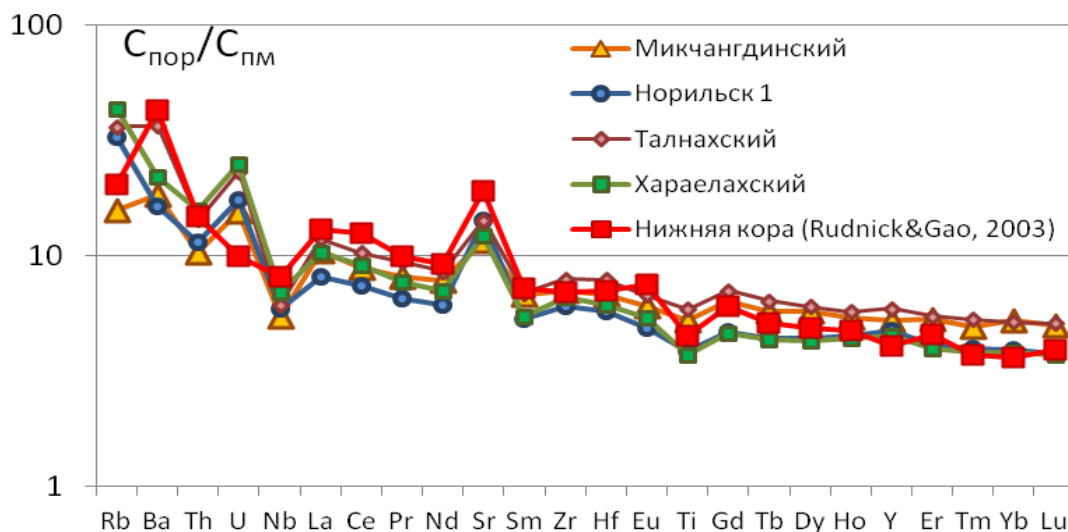


Рис. 17. Спектры распределения редких элементов для рудоносных массивов норильского комплекса (данные автора) и нижней коры

Плавление нижней коры более логично, чем процесс ассимиляции коровым материалом мантийных магм, объясняет следующие геологические факты: 1) появление однородных потоков лав на огромных территориях (до 50 000 км²), 2) отсутствие сульфидов в базальтах всех свит; 3) избирательную рудоносность определенных зон земной коры.

Возникновение уникальных месторождений в этом случае можно интерпретировать как плавление уже обогащенного сульфидами субстрата, накопление металлов в котором скорее всего происходило в несколько стадий, включающих как первичное их образование, так и возможное концентрирование под действием метаморфических процессов в длительно развивающихся рифтовых структурах, что отмечалось многими исследователями (Дюжиков, 2002; Горбунов и др., 2011; Додин и др., 2011).

Важную роль в накоплении ЭПГ в рудах могла иметь длительность пути сульфидов от источника до камеры кристаллизации (более 40 км), во время которого более эффективно действовал механизм их обогащения платиноидами, предложенный А. Налдреттом (1992), чем при их образовании и перемещении только в условиях платформенного чехла. Вполне вероятно, что именно этим фактором объясняется высокая платиноносность норильских руд относительно руд других Cu-Ni месторождений мира, ассоциирующих с PR массивами фундамента платформ. Возможность транспортировки больших

объемов (до 10%) сульфидного расплава в виде мелких капель расплавами была продемонстрирована экспериментально (Лихачев, 1987).

Отсутствие взаимосвязи геохимических характеристик расплавов с оруденением может объясняться преимущественно транспортирующей ролью магм. Тяжелый изотопный состав серы, который чаще всего приводится в качестве доказательства коровой контаминации магм (обычно девонским ангидритом), был типичен еще для руд PR месторождений Сибири (до +20 ‰; Кряжев, 2008).

Таким образом, породы нижней коры вполне вероятны в качестве источника родоначальных магм. Остается открытым вопрос о возможности их плавления. Можно предположить два варианта: 1) под действием плюма, 2) в результате пока не изученных процессов, поскольку в последние годы с помощью современных геофизических методов под континентами обнаружено тонкослоистое строение границы Мохо, нередко объясняющееся сменой реологических свойств пород в зависимости от их флюидонасыщенности (Лобковский, 2004; Павленкова, 2006) и пониженными температурами плавления. Однако разработка механизма плавления требует специальных исследований, выходящих за рамки данной работы.

В заключение развитие территории и образование месторождений в Норильском районе представляется следующим образом: 1. Возникновение протяженных по латерали (сотни километров) горизонтальных очагов базальтового магматизма в нижней части континентальной коры. 2. Образование крупных структур растяжения – сначала концентрированных в виде палеорифтов, а затем рассеянных, развитых на всей платформе; внедрение по ним огромных объемов магм, выносящих сульфиды из субстрата нижней коры рифтовых структур к поверхности.

Список основных публикаций по теме диссертации

1. **Криволуцкая Н.А.** Формирование платино-медно-никелевых месторождений в процессе развития траппового магматизма в Норильском районе // *Геология рудных месторождений*. 2011. Т. 53. № 4. С.346-378.
2. **Криволуцкая Н.А.** К проблеме расчленении вулканогенных пород трапповой формации в Норильском районе // *ДАН*. 2011. Т. 439. №. 4. С. 523-527.
3. **Krivolutskaya N.A., Sobolev A.V., Snisar S.G., Gongalskiy B.I., Hauff B., Kuzmin D.V., Tushentsova I.N., Svirskaya N.M., Kononkova N.N., Schlychkova T.B.** Mineralogy, geochemistry and stratigraphy of the Maslovsky Pt–Cu–Ni sulfide deposit, Noril'sk Region, Russia: Implications for relationship

- of ore-bearing intrusions and lavas // *Mineralium Deposita*. 2012. V. 47. P.69-88.
4. **Krivolutskaya N.A.**, Sobolev A.V., Mikhailov V. N., Plechova A.A., Kostitsyn Yu.A., Roschina I.A. , Fekiacova Z. Parental melt of the Nadezhdinsky Formation: geochemistry, petrology and connection with Cu-Ni deposits (Noril'sk area, Russia) // *Chemical Geology*. 2011. doi: 10.1016/j.chemgeo.2011.11.022.
 5. **Krivolutskaya N.A.** Gongalskiy B.I., Yushin, A.A., Schlychkova T.B., Kononkova N.N., Tushentsova I.N. Mineralogical and geochemical characteristics of PGE-Cu-Ni ores of the Maslovsky deposit in the Noril'sk area, Russia // *Canadian Mineralogist*. 2011. V. 49. № 6. P. 1649 – 1674.
 6. Sobolev, S.V., Sobolev, A.V., Kuzmin, D.V., **Krivolutskaya, N.A.**, Petrunin, A.G., Arndt, N.T., Radko, V.A., Vasilev, Yu.R. Linking mantle plumes, large igneous provinces and environmental catastrophes// *Nature*. 2011. V. 477. P. 312-316.
 7. **Криволуцкая Н.А.**, Смолькин В.Ф., Свирская Н.М., Мамонтов В.П., Фаныгин А.С., Беяцкий Б.В., Рощина И.А. Геохимические особенности массивов друзитового комплекса центральной части Беломорского подвижного пояса. I. Петрография и геохимия пород // *Геохимия* . 2010. № 5. С. 16-44.
 8. **Криволуцкая Н.А.**, Беяцкий Б.В., Смолькин В.Ф., Свирская Н.М., Мамонтов В.П., Фаныгин А.С. Геохимические особенности массивов друзитового комплекса центральной части Беломорского подвижного пояса. II. Исследование самарий-неодимовой изотопной системы в породах и U-Pb системы в цирконах // *Геохимия*. 2010. N 11. С.1132-1153.
 9. **Криволуцкая Н.А.**,Брянчанинова Н.И. Оливины магматических пород // *Российский химический журнал*. 2010. № 2. С.50-61.
 10. **Криволуцкая Н.А.**, Соболев А.В., Кузьмин Д.В., Свирская Н.М. Уникальные зональные оливины из ультрабазит-базитового массива Норильского района // *ДАН*. 2009.Т. 429. № 4. С. 518–522.
 11. **Криволуцкая Н.А.**, Рудакова А.В. Строение и геохимические особенности пород трапповой формации Норильской мульды (СЗ Сибирской платформы) // *Геохимия*. 2009. № 7. С. 675-698.
 12. **Krivolutskaya N.A.**, Sobolev A.V., Rudakova A.V., Kuzmin D.V. Are Noril'sk deposits site-specific or universal by the origin? // *Northwestern Geology*. 2009. V. 42. 2009. P.137-142.
 13. Соболев А.В., **Криволуцкая Н.А.**, Кузьмин Д.В. Петрология родоначальных расплавов и мантийных источников магм Сибирской трапповой провинции // *Петрология*. 2009.Т. 17. № 3. С. 276-310.

14. **Криволицкая Н.А.**, Михайлов В.Н., Снисар С.Г., Гонгальский Б.И. Внутреннее строение и состав Микчангинского ультрабазит-базитового массива в Норильском рудном районе (Сибирская трапповая провинция) // *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*. 2009. № 2. № 14. С. 29-48.
15. Рудакова А.В., **Криволицкая Н.А.** Структурно-текстурные особенности пород трапповой формации Норильской мульды (СЗ Сибирской платформы) // *Вестник МГУ*. 2009. № 6. С. 34-44.
16. Gongalsky B.I, **Krivolutskaya N.A.** Udokan-Chiney ore magmatic system // *Northwestern Geology*. V. 42. 2009. P.180-184.
17. Гонгальский Б.И., **Криволицкая Н.А.**, Арискин А.А., Николаев Г.С. Строение, состав и формирование Чинейского анортозит-габброноритового массива в Северном Забайкалье // *Геохимия*. 2008. №7. С. 391-420.
18. **Криволицкая Н.А.**, Соболев А.В., Кузьмин Д.В. Гудчихинская свита – продукт кристаллизации наиболее примитивных расплавов в западной части Сибирской трапповой провинции. // Материалы XIII Всероссийской конференции по Термобарогеохимии и IV симпозиума APIFIS. 3 с. (ИГЕМ, г. Москва, 22 сентября 2008 г.), (<http://www.minsoc.ru/2008-1-23-0>)
19. Sobolev A.V., Hofmann A.J., Kuzmin D.V., Yaxley J.M., Arndt N.T., Chung S.L., Danyushevsky L.V., Elliot T., Frey F.A., Garcia M.O., Gurenko A.A., Kamenetsky V.S., Kerr A.C., **Krivolutskaya N.A.**, Matvienkov V.V., Nikogosian I.K., Rocholl A., Sigurdsson I.A., Sushchevskaya N.M., Teklay M. The amount of Recycled Crust in Sources of Mantle-Derived Melts // *Science*. 2007. V. 316. P. 412-417.
20. Гонгальский Б.И., Сафонов Ю.Г, **Криволицкая Н.А.**, Прокофьев В.Ю., Юшин А.А. Новый тип медно-благороднометального оруденения в Северном Забайкалье // *ДАН*. 2007. Т. 414. № 5. С. 645-648.
21. **Криволицкая Н.А.**, Соболев А.В., Кузьмин Д.В. Сопоставление исходных расплавов рудоносных и безрудных массивов Норильского района // *Разведка и охрана недр*. 2006. № 8. С.44-50.
22. **Криволицкая Н.А.**, Соболев А.В., Михайлов В.Н., Рощина И.А. Новые данные о формационной принадлежности пикритовых базальтов Норильского района // *ДАН*. 2005. Т. 403. № 1. С. 76–81.
23. Покровский Б.Г., Служеникин С.Ф., **Криволицкая Н.А.** Условия взаимодействия норильских трапповых интрузий с вмещающими породами по изотопным (О, Н, С) данным // *Петрология*. 2005. № 1. Т.13. С.84-209.
24. **Krivolutskaya N.A.**, Sobolev A.V., Sluzhenikin S.F., Pokrovsky B.G. Olivine-hosted magmatic inclusions from the Noril'sk intrusions: application to origin of Pt-Cu-Ni deposits (Russia) // In 'Metallogeny of the Pasific Northwest: Tectonics, Magmatism and Metallogeny of Active Continental Margins', Vladivostok, Dalnauka. 2004. P.296-299.

25. Покровский Б.Г., Служеникин С.Ф., **Криволицкая Н.А.** Геохимия изотопов кислорода и водорода в норильских интрузивах // *ДАН*. 2002. Т.384. №2. С.238-242.
26. **Криволицкая Н.А.**, Соболев А.В. Магматические включения в оливинах норильских интрузивов (Северо-Запад Сибирской платформы) как источник информации об исходных расплавах // *ДАН*. 2001. Т.381. № 3. С.393-398.
27. **Криволицкая Н.А.**, Арискин А.А., Служеникин С.Ф., Туровцев Д.М. Геохимическая термометрия пород Талнахского интрузива: оценка состава расплава и степени раскристаллизованности исходной магмы // *Петрология*. 2001. Т. 9. № 5. С. 451-479.
28. Дистлер В.В., Служеникин С.С., Кабри Л.Дж., **Криволицкая Н.А.**, Туровцев Д.М., Голованова Т.И. Платиновые руды норильских расслоенных интрузивов: соотношение магматического и флюидного концентрирования благородных металлов // *Геология рудных месторождений*. 1999. Т. 41. № 3. С. 241-265.
29. Гонгальский Б.И., **Криволицкая Н.А.** Чинейский расслоенный плутон. Новосибирск: Наука. 1993. 184 с.

