

МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЧЕРНОГОРСКОГО РУДОНОСНОГО ИНТРУЗИВА, НОРИЛЬСКИЙ РУДНЫЙ РАЙОН¹

© 2021 г. Н. А. Криволицкая^a, *, Д. В. Кузьмин^b, **, Б. И. Гонгальский^c, ***,
И. В. Кубракова^a, ****, О. А. Тютюнник^a, *****

^aИнститут геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, ул. Косыгина, 19, Москва, 119991 Россия

^bИнститут геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, просп. Акад. Коптюга, 3, Новосибирск, 603090 Россия

^cИнститут геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,
Старомонетный пер., 35, Москва, 119017 Россия

*e-mail: nakriv@mail.ru

**e-mail: kuzmin@igm.nsc.ru

***e-mail: brgon@mail.ru

****e-mail: kubrakova@geokhi.ru

*****e-mail: toa-6767@mail.ru

Поступила в редакцию 28.08.2020 г.

После доработки 10.09.2020 г.

Принята к публикации 05.10.2020 г.

В проблеме генезиса магматических месторождений важное место занимает выяснение роли силикатного расплава в образовании сульфидных руд. Одним из путей ее решения является сопоставление массивов разной рудоносности по содержаниям главных и редких элементов в породах. Однако состав интрузивов норильского комплекса редко сопоставляется между собой, а также объему заключенных в них руд. Авторами впервые с помощью современных геохимических методов детально изучен Черногорский интрузив, локализованный в Норильской мульде. Внутренне строение его и состав хорошо сопоставимы с интрузивами того же комплекса, содержащими уникальные месторождения (Талнахским, Хараелахским, Норильском 1), по средневзвешенным значениям главных оксидов (мас. %): 47.2SiO₂, 0.62TiO₂, 16.7Al₂O₃, 9.94FeO, 0.16MnO, 11.7MgO, 11.3CaO, 1.53Na₂O, 0.46K₂O, 0.07P₂O₅, 0.18Cr₂O₃ и характеру и соотношению редких элементов (La/Sm)_n = 1–2, (Gd/Yb)_n = 1.2–1.4, (Th/Nb)_n = 1–4. Руды Черногорского интрузива близки к рудам Норильска 1, Cu/Ni немного превышает 1, а сумма Pt + Pd в среднем равна 5–6 ppm. Однако прогнозные ресурсы руд в Черногорском интрузиве (0.8 млн т Cu + Ni, 0.5 тыс. т Pr + Pd) в 140 раз меньше, чем в Хараелахском интрузиве (113 млн т Cu + Ni, 17.5 тыс. т Pr + Pd), и в 50 раз меньше, чем в Талнахском (40 млн т Cu + Ni, 8.3 тыс. т Pr + Pd). Это подтверждает отсутствие зависимости рудоносности массивов от силикатного состава пород, что делает невозможным проведения поисков новых месторождений по составу пород.

Ключевые слова: платино-медно-никелевые месторождения, Сибирские траппы, базитовый магматизм, Черногорское месторождение, Норильский район, геохимия пород

DOI: 10.31857/S0016752521060054

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важнейших аспектов генезиса сульфидных медно-никелевых месторождений, связанных с ультрабазит-базитовыми комплексами, является выяснение роли магматического расплава в их образовании. В большинстве моделей предполагается его решающая роль в формировании Cu–Ni руд (Золотухин и др., 1978, 1984; Лихачев, 2006, 2019). Между тем, прямых корреляционных связей между составами родоначальных

магм и размерами сформированных ими месторождений до сих пор не установлено. Во многом это связано с тем, что указанная проблема решается на примере единичных крупных плутонов (Садбери, Джинчуань, Войсис-Бей и другие), в которых локализованы месторождения, что, главным образом, обусловлено, геологическим строением территорий, на которых они расположены. В этом случае анализируются преимущественно внутрикамерные процессы, участвующие в образовании руд. Однако этого явно недостаточно для получения ответа на вопрос о взаимосвязи магматизма и рудообразования. Проблема рудоносности магм для магматических месторождений должна ре-

¹ К статье имеются дополнительные материалы, доступные для авторизованных пользователей по doi 10.31857/S0016752521060054.

шаться в более общем виде путем сопоставления ряда сходных между собой рудоносных массивов. Таких геологических обстановок немного на Земле.

К ним, в первую очередь, относится Норильский район, где локализованы разномасштабные месторождения никеля и платиновых металлов. СЗ Сибирской платформы в целом является крупнейшей металлогенической провинцией (Урванцев, 1973; Дюжиков и др., 1988), включающей как уникальные по запасам месторождения – Октябрьское, Талнахское, Норильск 1, так и более мелкие – Масловское, Вологочанское, Норильск 2, Черногорское, Зуб-Маркшейдерское, г. Большая Барьерная. Все они связаны с очень близкими по составу массивами габбро-долеритов, выделенными в норильский интрузивный комплекс (Геологическая карта..., 1994), входящими в состав Сибирской трапповой провинции. Наряду с интрузивами, содержащими промышленную минерализацию, в этом районе расположены многочисленные интрузивные тела с убогой сульфидной вкрапленностью или не содержащие ее (Государственная ..., 2000). Обычно массивы норильского комплекса сопоставляются с интрузивными телами других комплексов и чрезвычайно редко – между собой. Между тем, их сравнение, в частности, изучение их минералогеохимических особенностей с помощью современных аналитических методов, имеет важное значение для решения вопроса о роли расплава в генезисе руд. Эта задача является одной из основных в наших исследованиях. Ранее нами были рассмотрены основные особенности составов массивов, с которыми связаны уникальные по запасам никеля, меди и платиновых металлов, месторождения, а именно Хараелахского интрузива (Октябрьское месторождение (Krivolutskaya et al., 2019), Талнахского (Криволицкая и др., 2001), Норильск 1 массивов (Krivolutskaya et al., 2020).

В настоящей работе приводятся данные по составу пород и породообразующих минералов Черногорского интрузива в Норильском районе, с которым связано PGE-Cu-Ni месторождение. Несмотря на сходство с другими массивами района, он обладает специфическими особенностями, главной из которых является обогащенность руд платиновыми металлами относительно Cu и Ni. Однако геохимические особенности пород свидетельствуют о близости составов расплавов, сформировавших разномасштабные сульфидные месторождения в данном районе и отсутствии связи между составом силикатной и сульфидной составляющей в рудоносных интрузивах.

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О ГЕОЛОГИЧЕСКОМ СТРОЕНИИ РАЙОНА

Норильский район расположен в северо-западной части Сибирской платформы, в строении которой выделяется кристаллический фундамент и

платформенный чехол, породы которого обнажаются на поверхности (Государственная..., 2000). Структурный план территории (рис. 1) определяется сочетанием брахисинклиналей, или мульды, и валообразных поднятий, а также широко проявленной сетью разновозрастных разрывных дислокаций. Мульды (Хараелахская, Иконская, Вологочанская, Норильская) формируют Норильско-Хараелахский прогиб (Геологическая карта..., 1994) северо-восточного простирания, ограниченный Хантайско-Рыбнинским и Дудинским поднятиями (валами). Прогиб выполнен палеозойскими осадочными породами и перекрывающими их лавами и туфами трапповой формации (P₃-T₁). Главной дизъюнктивной структурой является Норильско-Хараелахский глубинный разлом, на пересечении которого с Хараелахской и Норильской мульдами располагаются крупнейшие месторождения района, образующие два рудных узла – Талнахский и Норильский соответственно. В состав первых из названных узлов входят Октябрьское и Талнахское месторождения. Норильский рудный узел включает крупное месторождение Норильск 1, а также ряд более мелких – Масловское, Норильск 2, Зуб-Маркшейдерское, г. Большая Барьерная и Черногорское (рис. 2).

В строении Норильской мульды принимают участие терригенно-карбонатные и сульфатоносные породы девона, терригенные отложения тунгусской серии с прослоями углей, а также породы туфо-лавовой толщи. Последние расчленены на следующие свиты (Геологическая карта..., 1994) (снизу вверх) – ивакинскую, сыверминскую, гудчихинскую, хаканчанскую, туклонскую, надединскую, моронговскую и мокулаевскую, общей мощностью 1200 м. Нижние две свиты представлены субщелочными базальтами. В составе гудчихинской свиты преобладают оливиновые и пикритовые базальты, в то время как хаканчанская свита образована туфами и туффитами. Верхние свиты, начиная с туклонской, сложены толеитовыми базальтами. Детальная характеристика строения и состава вулканогенной толщи Норильской мульды дана в работе (Криволицкая, Рудакова, 2009).

Интрузивные образования района разделены на ряд комплексов, из которых наиболее ранним является ергалахский, представленный трахидолеритами и сопоставляемый с породами ивакинской свиты, а поздним – далдыканский, габбро-долериты которого секут базальты всех свит района (Дюжиков и др., 1988). Промежуточное положение занимают интрузивы норильского комплекса, характеризующиеся дифференцированным строением. Все известные месторождения норильского района связаны с интрузивными телами этого комплекса, локализованными субсогласно в осадочных породах девона и тунгусской серии. Чаще всего они имеют корытообразную форму в сечении и лентовидную – в плане, протягиваясь на 15–20 км (Талнахский, Вологочан-

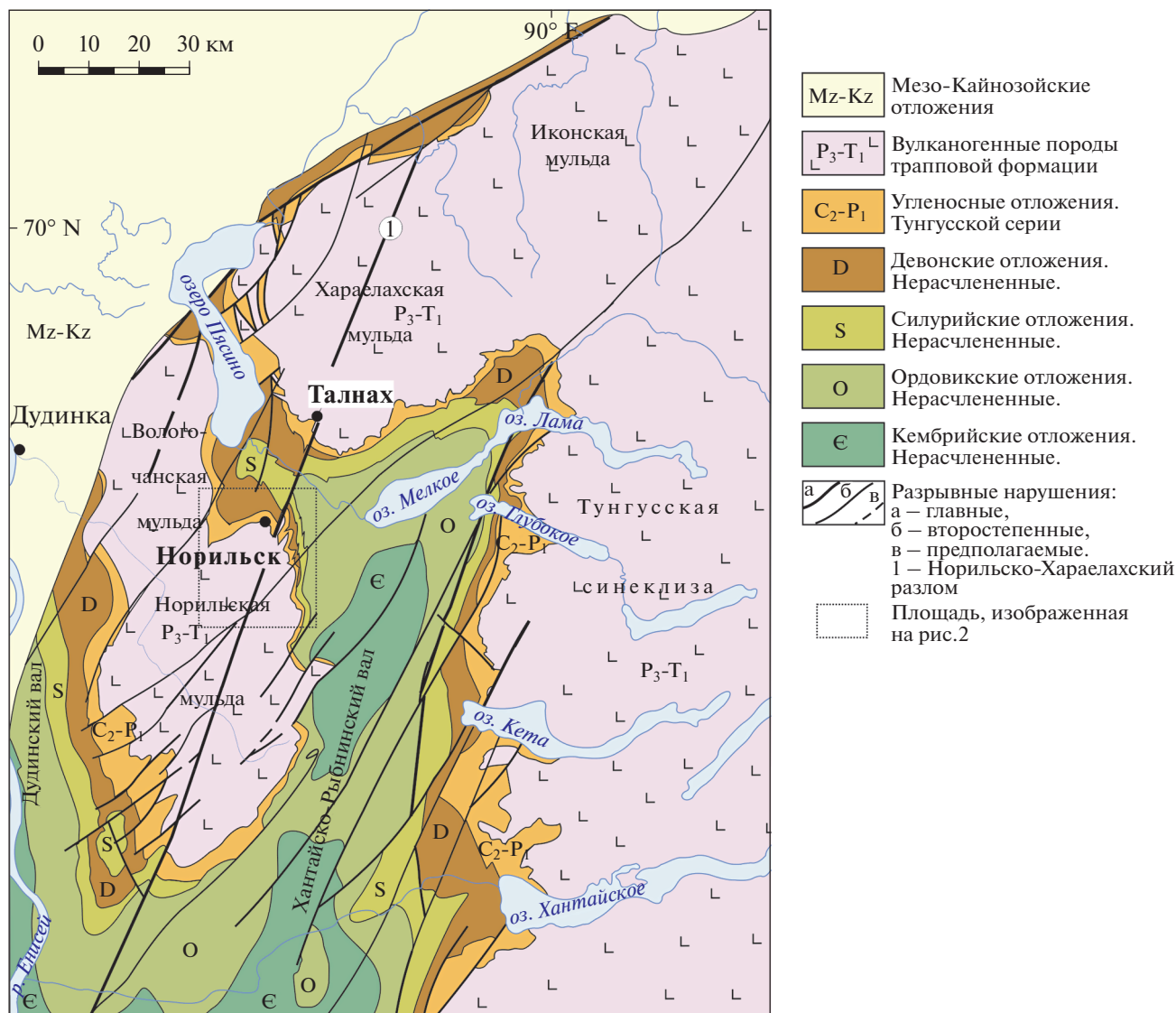


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Норильского района (составлена по материалам Геологической карты 1 : 200000 м-ба под ред. Б.М. Струнина, 1994).

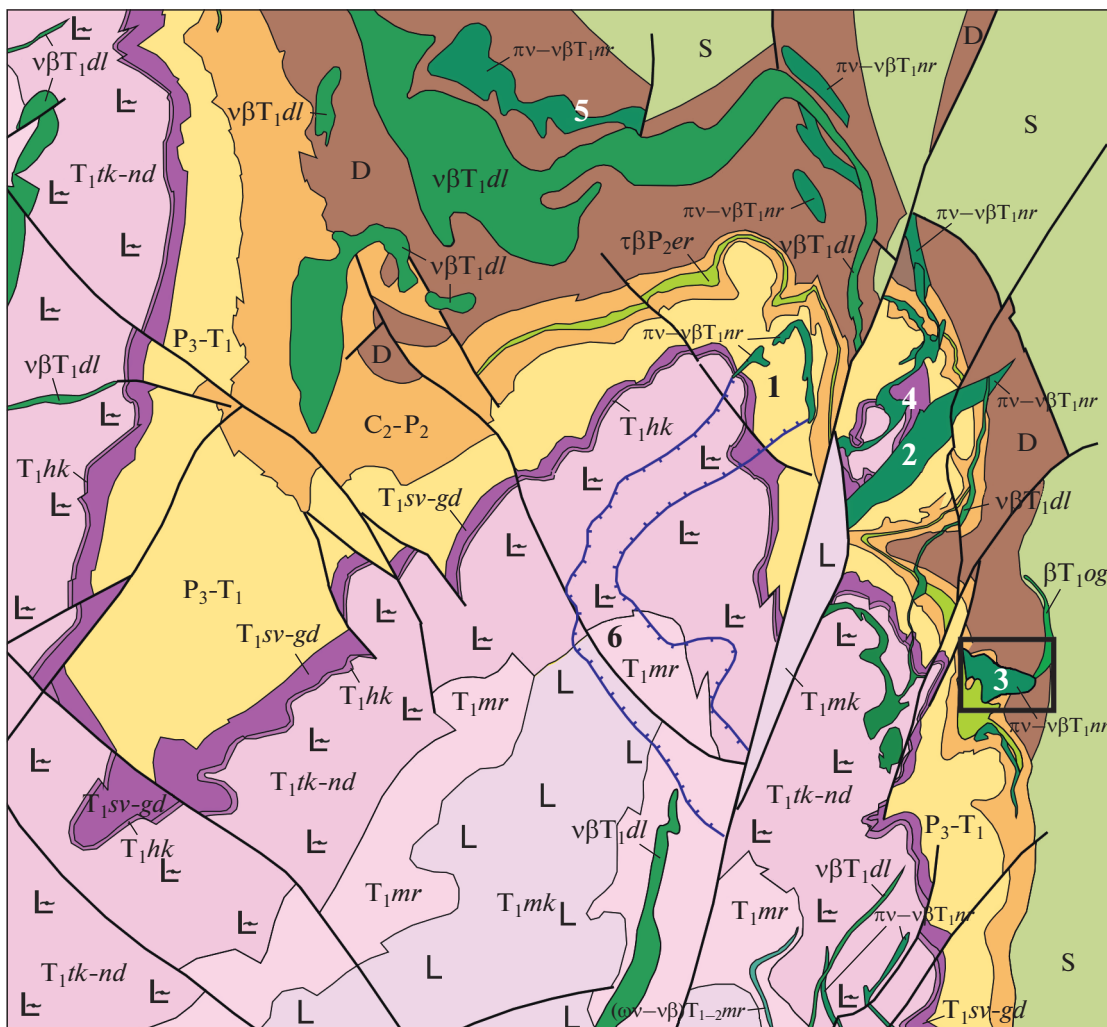
ский, Южно-Пясинский интрузивы) при средней мощности 150 м. Массивы Норильской мульды более разнообразны по морфологии, среди них отмечаются дайкообразные тела (Норильск 2, интрузив горы Большая Барьерная), секущие породы туфо-лаваовой толщи. Наиболее высокое положение в стратиграфическом разрезе занимает Южно-Масловский массив, прорывающий низы надеждинской свиты (Krivolutskaya et al., 2012).

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЧЕРНОГОРСКОГО ИНТРУЗИВА

Черногорский массив расположен на восточном крыле Норильской мульды и находится в 12 км к югу от г. Норильска, обнажаясь на г. Черной (рис. 3). Он был обнаружен в процессе геолого-съёмочных работ 1 : 50000 работ в 1940 г. В.С. Домаре-

вым и А.И. Корешковым. Связанная с ним сульфидная минерализация привлекала геологов на протяжении многих десятилетий, поэтому его строение изучено достаточно детально (Иванов и др., 1971; Туровцев, 2002; Малич и др., 2018). В результате проведенных Норильской экспедицией поисково-оценочных работ в 1960 г. были подсчитаны запасы металлов балансовых и забалансовых руд. В 2000–2004 г. массив входил в перечень объектов, в которых изучалась малосульфидная платинометальная минерализация, приуроченная к верхней части интрузивных тел (Рябов и др., 1982; Служеникин и др., 1994; Tolstykh et al., 2019).

Массив залегает на контакте отложений тунгусской серии и девона вкрест простирания вмещающих пород. Он прослежен на 5 км при ширине 0.6–1.5 км и средней мощности 170–180 м



Вулканогенные породы трапповой формации (P₃-T₁), свиты

| | |
|--------------------------------|---------------------------|
| T ₁ mk | Мокулаевская |
| T ₁ mr | Моронговская |
| T ₁ tk-nd | Туклонская-надеждинская |
| T ₁ hk | Хаканчанская |
| T ₁ sv-gd | Сыверминская-гудчихинская |
| P ₃ -T ₁ | Ивакинская |

Осадочные породы

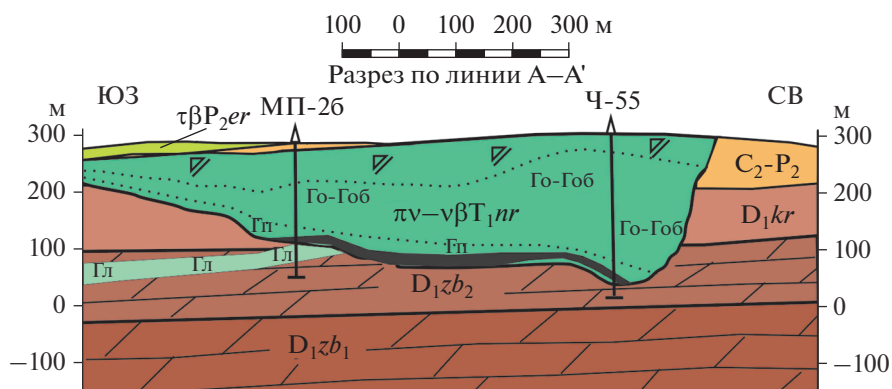
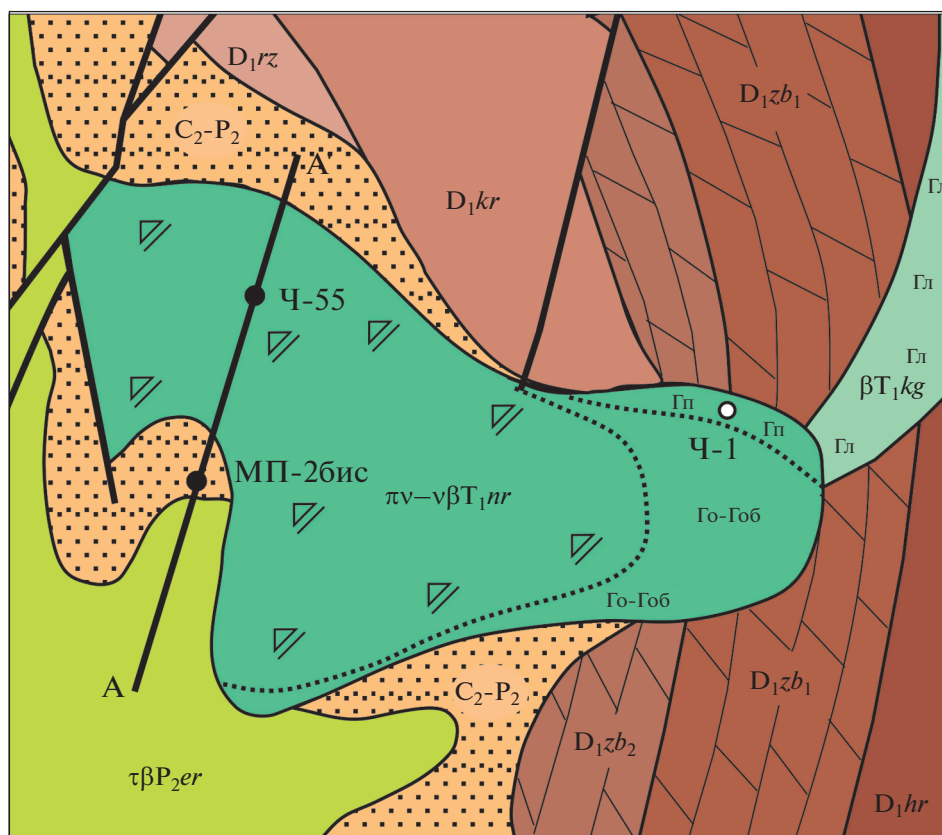
| | |
|--------------------------------|--------------------------------|
| C ₂ -P ₂ | Позднего карбона-средней перми |
| D | Девона |
| S | Силура |
| (diagonal line) | Разломы |
| 5 | Месторождения и их номера |
| (black box) | Площадь, показанная на рис. 3 |

Интрузивные комплексы

| | |
|----------------------------|--------------|
| vβT ₁ dl | Далдыканский |
| (ωv-vβ)T ₁₋₂ mr | Моронговский |
| πv-vβT ₁ nr | Норильский |
| βT ₁ og | Огонерский |
| τβP ₂ er | Ергалахский |

| | |
|---|---------------------|
| L | Базальты афировые |
| E | Базальты порфировые |

Рис. 2. Геологическая карта Норильской мульды (по материалам ООО "Норильскгеология, с изменениями).



| Осадочные породы | | Интрузивные комплексы | | |
|--------------------------|---|---|---|--|
| Девонская система, свита | C₂-P₂ Тунгусская серия | πv-νβT₁nr Норильский | Гл Гл Лейкогаббро | |
| | D₁rz Разведочнинская | βT₁kg Круглогорский | [dots] Песчаники | |
| | D₁kr Курейская | τβP₂er Ергалахский | [wavy line] Сульфидные руды | |
| | D₁zb₂ Зубовская. Верхняя подсвита | [diagonal lines] Габбро-диориты | [thick line] Разломы | |
| | D₁zb₁ Зубовская. Нижняя подсвита | Го-Гоб Габбро-долериты оливиновые и оливин-биотитовые | ● Ч-55 Скважины и их номера | |
| | D₁hr Хараелахская | Гп Гп Габбро-долериты пикритовые | ○ Ч-1 Место отбора образца | |

Рис. 3. Геологическая карта Черногорского интрузива (по материалам ООО “Норильскеология”, с изменениями).

(максимальная мощность достигает 370 м). В поперечном сечении интрузивное тело имеет вид уплощенной трубообразной залежи. Западная его часть перекрыта четвертичными отложениями, а восточная выходит на поверхность. В пределах западного участка предыдущими геологоразведочными работами выявлен грабен шириной 500 м, названный Черногорским, в котором породы опущены на 180–200 м.

В приподошвенной части интрузива располагаются вкрапленные и прожилково-вкрапленные (в подстилающих породах) руды. Средняя мощность рудного тела составляет 10–15 м. По минеральному составу и структурно-текстурным особенностям руды похожи на руды месторождения Норильск-1, хотя они немного беднее.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Внутреннее строение и состав Черногорского интрузива изучались как в ходе проведения маршрутных исследований в обнаженной на поверхности части интрузива (преимущественно вдоль ручья Звонкий и в северной части интрузива), так и в ряде скважин, пробуренных в разных его частях (Ч-50, Ч-52, Ч-42). Для детального изучения минерального и химического состава пород были выбраны две скважины, пробуренные в юго-западной и центральной и частях массива соответственно – МП-2бис и Ч-55 (рис. 3), по которым было отобрано около ста образцов.

Определение главных и редких элементов в породах проводилось путем получения из них стекол и анализа их с помощью электронного микрозонда и лазерной абляции. Для этого породы измельчались до состояния пудры и спекались в стекло с помощью иридиевого нагревателя (Stoll et al., 2008).

Измерения концентраций главных элементов в экспериментально закаленных стеклах проводились в Институте Химии имени Макса-Планка (Майнц, Германия) на пятиканальном микроанализаторе Jeol Jxa 8200 Superprobe методом волновой спектроскопии ВДС. Измерения осуществлялись при ускоряющем напряжении 15 кВ, силе тока 12 нА, время накопления сигнала для всех элементов составляло 60 с на пике и 30 с на измерение фона. Для уменьшения эффекта потери щелочных элементов при микроанализе измерения Na и K производились первыми в течение 30 с для Na на пике сигнала. Для расчета концентраций был использован ZAF метод коррекции. В качестве стандартов были использованы природные и синтетические оксиды и минералы (P&H Developments Ltd., Калибровочные стандарты для электронного зонда, Блок стандартов ГЕО, и набор стандартов Смитсониевского института для электронного зонда (Jarosewich et al., 1980). Для мониторинга стабильности и дрейфа прибора при анализе использовался внутренний стандарт, близкий по составу к исследуемым образцам –

базальтовое стекло VG-2 USNM 111240/52 (Jarosewich et al., 1980). Этот стандарт измерялся через каждые 30–40 измерений образцов и затем, при необходимости, вводилась коррекция. Типичная погрешность при измерении главных элементов при этих параметрах не превышает 1–2 отн. %. Часть образцов была проанализирована с помощью рентгенофлуоресцентного метода на спектрометре “AXIOS mAX” фирмы PANAnalytical в ИГЕМ РАН (аналитик А.И. Якушев).

Определение примесных элементов в породах проводилось на масс-спектрометре ELEMENT-2, Thermo Scientific, Англия, с твердотельным лазером UP-213 New Wave Research, Англия, в Институте химии им. Макса Планка (ИХМП), Майнц (Германия). В качестве стандарта использовали базальтовое стекло KL-2G и NIST 612 (Jochum et al., 2000; Jochum et al., 2011), а в качестве нормирующего элемента – Ca, измеренный микрорентгено-спектральным методом. Типичный диаметр лазера составлял 90 мкм, а время абляции 60–80 с. Для каждого образца состав определялся в трех точках, результирующие значения содержаний элементов приведены как среднее из трех определений. Погрешность определения концентраций, оцененная по воспроизведению стандарта, не превышала 5 отн. % (две стандартные ошибки) для содержаний более 1 г/т и 10 отн. % для концентраций около 0.1 г/т.

Определение цветных и благородных металлов в рудах, а также сопутствующих компонентов (As, Se, Te, Sb, Cr) выполнялось в лаборатории геохимии и аналитической химии благородных металлов в ГЕОХИ РАН. Fe, Cu, Ni, Co и S определялись медом ICP-AES с помощью Iris Intrepid II XDL (Thermo Electron Corporation, USA), благородные металлы предварительно концентрировались и определялись ETAAS с помощью SolarMQZ (Thermo Electron Corporation, USA) по методике, описанной в работе (Krivolutskaya et al., 2019).

Состав порообразующих минералов изучался с помощью микроанализатора Jeol Jxa 8200 Superprobe в ИХМП (Германия) и ИГЕМ РАН. В Институте Химии им. Макса Планка для анализа оливинов была использована специально разработанная методика, позволяющая определять концентрации примесных элементов с высокой точностью 20–30 г/т (две стандартные ошибки) для Ni, Ca, Mn, Al, Ti, Cr, Co и 0.02 мол. % для форстеритовой составляющей в оливине (Sobolev et al., 2007). Измерения проводились при ускоряющем напряжении 20 кВ силе, тока 300 нА, время накопления сигнала для редких элементов составляло 120–180 с на пике и на измерение фона. Главные элементы (Si, Mg, Fe) измерялись в течение 40 с на пике сигнала и столько же – на фоне. Для контроля точности и правильности измерений использовался природный стандарт San Carlos olivine, USNM 111312/444. Главные и некоторые примесные элементы в пироксенах анализи-

ровались при ускоряющем напряжении 20 кВ и токе зонда 80 нА, с использованием эталона хромистого-авгита USNM164905 (Jarosevich et al., 1980) с типичной погрешностью менее 1–2 отн. %. Состав плагиоклазов был изучен в ИГЕМ РАН при напряжении 20 кV силе и силе тока 30 нА.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Внутренне строение Черногорского интрузива и петрография слагающих его пород

В строении интрузива выделяются основные горизонты пород, которые характерны в целом для интрузивов норильского комплекса. Наиболее представительным является разрез массива, вскрытый скважиной Ч-55 (225 м). Разрез интрузива в скважине МП-2бис (118 м) отражает строение его юго-западной зоны (рис. 4).

В целом для Черногорского интрузива характерно присутствие следующих разновидностей пород (номенклатура пород соответствует номенклатуре, принятой в Легенде к 1 : 50000 карте Норильского района, 1991): габбро-долериты – контактовые, такситовые, пикритовые, оливиновые, оливинсодержащие, безоливиновые, верхние такситовые; габбро-диориты, магматические брекчии с ксенолитами песчаников и углей. Вкрапленность сульфидов установлена в нижней части интрузива в такситовых и пикритовых габбро-долеритах (8–10 об. %), а также в верхней части массива (1–2 об. %).

Контактовые габбро-долериты образуют зону небольшой мощности (0.5–1.8 м) в основании интрузива и представлены массивными мелко-среднекристаллическими породами, состоящими из плагиоклаза (50–60%), пироксена (45–55) и небольшого (до 5%) количества оливина. Выше по разрезу они сменяются такситовыми габбро-долеритами (рис. 4), характеризующимися атакситовой текстурой, отличающейся сочетанием участков крупно- и мелкокристаллического строения. Более мелкокристаллические участки (размер зерен 0.1 мм) обогащены оливинном и по составу отвечают троктолитам, а более крупнокристаллические (0.5–1.0 мм) близки к лейкогаббро (60–70% плагиоклаза и 30–40-пироксена). Над такситовыми габбро-долеритами располагаются пикритовые габбро-долериты, характеризующиеся максимальным содержанием оливина (40–55%), а также присутствием наиболее основного плагиоклаза и пироксена). Породы обладают мелко-среднекристаллической структурой, массивной или слабо проявленной полосчатой текстурой за счет обогащения отдельных прослоев (1–2 см) оливинном. Контакт пикритовых габбро-долеритов с вышележающими оливиновыми габбро-долеритами резкий и обусловлен снижением количества оливина до 5–10%, концентрация которого постепенно падает вверх по разрезу

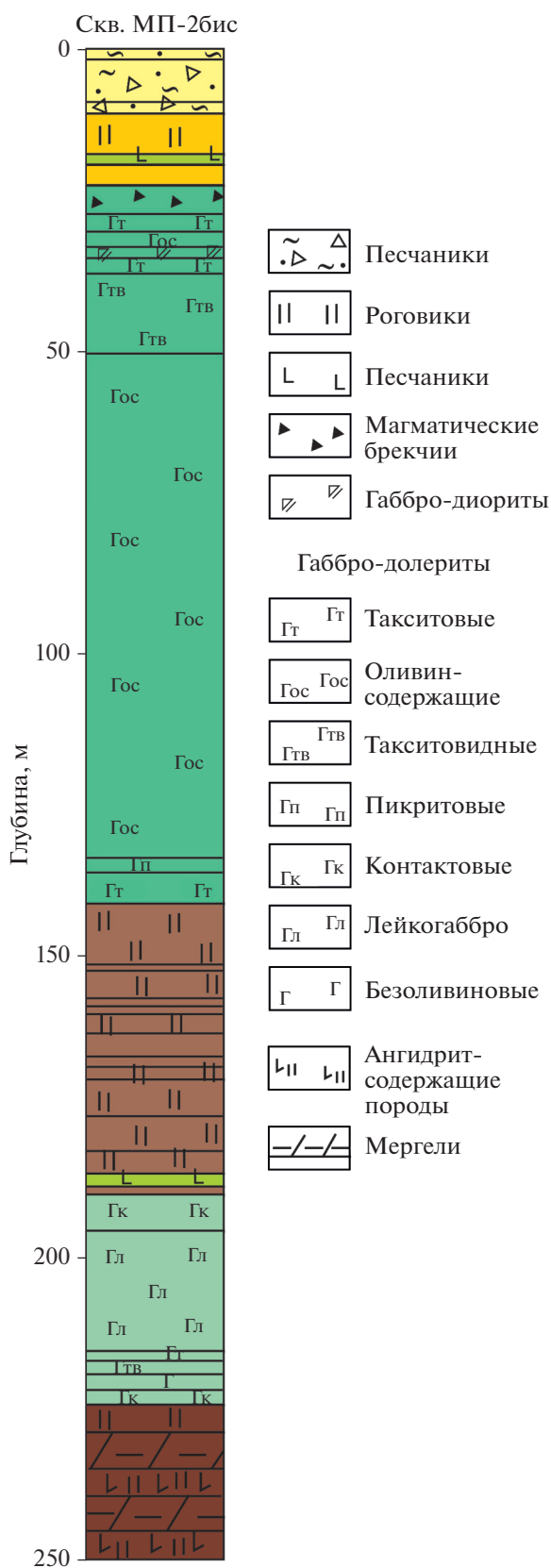


Рис. 4. Строение Черногорского интрузива по скв. МП-2бис.

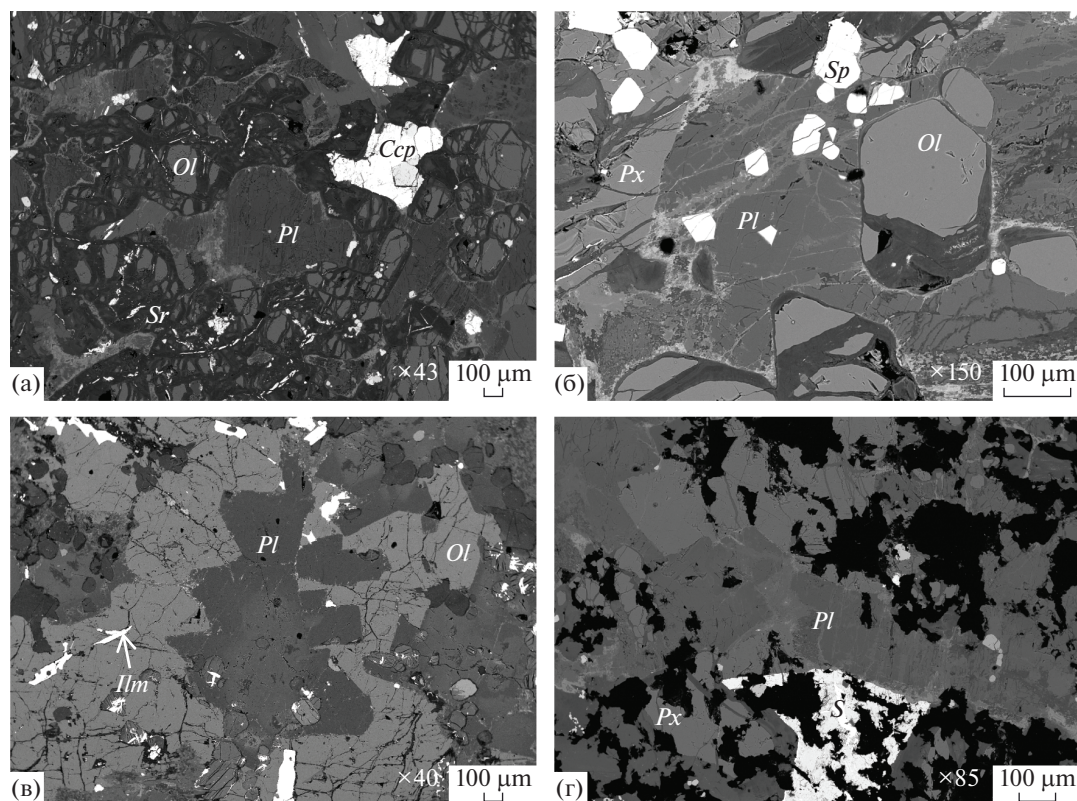


Рис. 5. Текстурно-структурные особенности пород Черногорского интрузива. Изображение в обратно рассеянных электронах. а) пикритовые долериты (обр. МП-26бис/140); б) пойкилитовая структура в пикритовых габбро-долеритах (обр. МП-26бис/140.5), в) оливиновые габбро-долериты (обр. МП-26бис/134), г) оливинсодержащие габбро-долериты (обр. МП-26бис/68). Минералы: *Ol* – оливин, *Px* – пироксен, *Pl* – плагиоклаз, *S* – сульфиды, *Csp* – халькопирит, *Sp* – хромшпинель, *Sr* – серпентин.

в оливинсодержащих габбро-долеритах (<5%). Последние две разновидности пород составляют большую часть разреза интрузива (около 70–80%) и характеризуются пойкилофитовой структурой, образованной крупными округлыми зёрнами пироксена и включенными в него лейстами плагиоклаза. Верхняя часть массива имеет сложное строение и состоит из нескольких горизонтов пород небольшой мощности (2–4 м) – так называемых верхних такситовых габбро-долеритов, габбро-диоритов, оливиновых габбро-долеритов, ферро-габбро. В кровле Черногорского массива располагаются магматические брекчии (4–5 м), в которых обломки осадочных пород, преимущественно углей, цементируются габброидным материалом.

Морфология и состав породообразующих минералов (табл. 1, табл. 1 в Приложении) варьируют в вертикальном разрезе интрузива. Оливин образует как идиоморфные кристаллы (рис. 5а) и овальные зёрна в пикритовых габбро-долеритах, часто в крупных зёрнах плагиоклаза с образованием пойкилитовой структуры (рис. 5б), так и выделения в интерстициях зёрен плагиоклаза в оливинсодержащих габбро-долеритах. Наиболее магнезиальный оливин типичен для пикритовых габбро-долеритов, где его состав меняется в до-

вольно узких пределах от $Fo_{78.5}$ до $Fo_{80.8}$ для образцов, отобранных в северной части массива (рис. 6). В скважинах в этом горизонте установлены несколько более широкие вариации: молярная доля форстеритовой составляющей меняется от 73.5 до 82.6%. Этот оливин представляет наибольший интерес, т.к. он является наиболее ранней ликвидусной фазой и максимально отражает состав родоначального расплава, сформировавшего массив.

В такситовых габбро-долеритах одновременно присутствуют как высокомагнезиальные оливины (Fo_{72-82}), так и существенно более железистые (Fo_{60-66}), что отражает указанную выше неоднородность этих пород. Бимодальное распределение составов оливинов в такситовых габбро-долеритах отражено на диаграмме $Fo-NiO$ (рис. 6а). Важнейшим элементом-примесью в оливине является никель, концентрации которого связаны прямой пропорциональной зональностью с магнезиальностью минерала. Эта зависимость отчетливо проявлена в оливинах пониженной магнезиальности (Fo_{60-67}). Однако в случае присутствия сульфидного расплава эта закономерность нарушается, что отражается на содержаниях NiO в оливинах пикритовых габбро-долеритов, где его содержания варьируют от 0.18 до 0.26 мас. % и не

Таблица 1. Представительные составы главных породообразующих минералов Черногорского массива. мас. %

| № пп | № обр | SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | FeO | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | NiO | CoO | Cr ₂ O ₃ | K ₂ O | Сумма | Fo, Ап. мол. %; Mg# |
|------|-------|------------------|------------------|--------------------------------|-------|------|-------|-------|-------------------|------|------|--------------------------------|------------------|-------|---------------------|
| 1 | 133 | 37.79 | 0.03 | 0.01 | 25.57 | 0.39 | 36.84 | 0.12 | н/а | 0.17 | 0.03 | 0.01 | н/а | 100.9 | 72.2 |
| 2 | 133 | 37.54 | 0.04 | 0.01 | 26.78 | 0.41 | 35.85 | 0.13 | н/а | 0.18 | 0.03 | 0.00 | н/а | 100.9 | 70.7 |
| 3 | 134 | 38.35 | 0.03 | 0.02 | 23.17 | 0.37 | 38.65 | 0.15 | н/а | 0.23 | 0.03 | 0.02 | н/а | 101.0 | 75.1 |
| 4 | 134 | 36.59 | 0.00 | 0.00 | 34.37 | 0.52 | 29.93 | 0.01 | н/а | 0.20 | 0.03 | 0.00 | н/а | 101.6 | 61.0 |
| 5 | 134 | 38.65 | 0.02 | 0.02 | 20.29 | 0.33 | 40.90 | 0.12 | н/а | 0.22 | 0.03 | 0.03 | н/а | 100.6 | 78.6 |
| 6 | 135 | 37.84 | 0.03 | 0.01 | 24.46 | 0.38 | 37.61 | 0.07 | н/а | 0.22 | 0.03 | 0.01 | н/а | 100.6 | 73.6 |
| 7 | 137 | 38.66 | 0.03 | 0.01 | 21.99 | 0.35 | 39.88 | 0.13 | н/а | 0.16 | 0.02 | 0.01 | н/а | 101.2 | 76.7 |
| 8 | 137 | 38.19 | 0.03 | 0.01 | 24.85 | 0.38 | 37.56 | 0.19 | н/а | 0.18 | 0.03 | 0.00 | н/а | 101.4 | 73.2 |
| 9 | 137 | 38.22 | 0.04 | 0.01 | 23.95 | 0.37 | 38.32 | 0.17 | н/а | 0.16 | 0.03 | 0.01 | н/а | 101.2 | 74.3 |
| 10 | 139 | 37.26 | 0.02 | 0.02 | 30.68 | 0.47 | 32.95 | 0.19 | н/а | 0.11 | 0.03 | 0.02 | н/а | 101.7 | 65.9 |
| 11 | 139 | 36.99 | 0.01 | 0.02 | 31.62 | 0.49 | 32.05 | 0.22 | н/а | 0.10 | 0.03 | 0.00 | н/а | 101.5 | 64.6 |
| 12 | 139 | 36.68 | 0.02 | 0.01 | 33.68 | 0.52 | 30.38 | 0.21 | н/а | 0.09 | 0.03 | 0.00 | н/а | 101.6 | 61.8 |
| 13 | 140 | 39.06 | 0.02 | 0.02 | 19.50 | 0.30 | 41.57 | 0.14 | н/а | 0.21 | 0.03 | 0.02 | н/а | 100.8 | 79.5 |
| 14 | 140 | 38.36 | 0.03 | 0.02 | 23.77 | 0.36 | 38.29 | 0.13 | н/а | 0.19 | 0.03 | 0.01 | н/а | 101.1 | 74.5 |
| 15 | 140 | 38.83 | 0.01 | 0.02 | 19.03 | 0.30 | 41.76 | 0.13 | н/а | 0.19 | 0.03 | 0.02 | н/а | 100.3 | 80.0 |
| 16 | 140 | 39.16 | 0.02 | 0.03 | 19.70 | 0.31 | 41.55 | 0.12 | н/а | 0.19 | 0.03 | 0.01 | н/а | 101.1 | 79.4 |
| 17 | 140 | 39.08 | 0.03 | 0.03 | 18.10 | 0.33 | 42.62 | 0.13 | н/а | 0.18 | 0.03 | 0.01 | н/а | 100.5 | 81.1 |
| 18 | 140 | 38.38 | 0.02 | 0.02 | 20.75 | 0.32 | 40.44 | 0.14 | н/а | 0.19 | 0.03 | 0.02 | н/а | 100.3 | 78.0 |
| 19 | Ч-1 | 39.06 | н/а | 0.02 | 20.21 | 0.31 | 40.97 | 0.11 | н/а | 0.24 | 0.06 | 0.01 | н/а | 100.9 | 78.7 |
| 20 | Ч-1 | 39.31 | н/а | 0.02 | 18.57 | 0.29 | 41.91 | 0.10 | н/а | 0.23 | 0.06 | 0.02 | н/а | 100.5 | 80.5 |
| 21 | Ч-1 | 38.93 | н/а | 0.01 | 20.04 | 0.31 | 40.97 | 0.07 | н/а | 0.25 | 0.06 | 0.01 | н/а | 100.6 | 78.8 |
| 22 | 26 | 51.27 | 0.58 | 2.36 | 9.38 | 0.23 | 15.82 | 19.24 | 0.15 | н/а | н/а | 0.06 | н/а | 99.0 | 75.4 |
| 23 | 46 | 51.41 | 0.65 | 2.00 | 10.89 | 0.26 | 15.38 | 18.86 | 0.21 | н/а | н/а | 0.01 | н/а | 99.6 | 71.8 |
| 24 | 47 | 52.10 | 0.49 | 2.16 | 7.87 | 0.20 | 16.49 | 20.05 | 0.33 | н/а | н/а | 0.13 | н/а | 99.8 | 79.2 |
| 25 | 135 | 52.61 | 0.52 | 2.13 | 6.95 | 0.17 | 16.91 | 20.17 | 0.17 | н/а | н/а | 0.31 | н/а | 99.9 | 81.7 |
| 26 | 2b | 51.74 | 0.43 | 2.66 | 5.96 | 0.15 | 16.71 | 20.64 | 0.20 | н/а | н/а | 0.78 | н/а | 99.3 | 83.8 |
| 27 | 140 | 51.87 | 0.46 | 2.66 | 6.28 | 0.15 | 16.49 | 20.45 | 0.22 | н/а | н/а | 0.73 | н/а | 99.3 | 82.8 |
| 28 | 140 | 48.17 | 0.11 | 33.55 | 0.24 | 0.04 | 0.02 | 16.74 | 2.12 | 0.00 | н/а | 0.00 | 0.09 | 101.0 | 81.3 |
| 29 | 140 | 48.55 | 0.12 | 32.79 | 0.33 | 0.00 | 0.03 | 16.06 | 2.56 | 0.03 | н/а | 0.01 | 0.11 | 100.5 | 77.6 |
| 30 | 133 | 47.52 | 0.11 | 32.77 | 0.37 | 0.02 | 0.04 | 16.72 | 2.10 | 0.01 | н/а | 0.00 | 0.10 | 99.7 | 81.4 |
| 31 | 133 | 50.66 | 0.14 | 31.85 | 0.30 | 0.00 | 0.02 | 15.03 | 3.03 | 0.00 | н/а | 0.02 | 0.13 | 101.1 | 73.2 |
| 32 | 133 | 49.33 | 0.14 | 32.57 | 0.32 | 0.01 | 0.03 | 15.81 | 2.59 | 0.00 | н/а | 0.00 | 0.10 | 100.9 | 77.1 |
| 33 | 134 | 49.01 | 0.11 | 32.95 | 0.44 | 0.00 | 0.01 | 16.04 | 2.53 | 0.02 | н/а | 0.01 | 0.10 | 101.2 | 77.8 |
| 34 | 134 | 53.48 | 0.18 | 29.60 | 0.23 | 0.02 | 0.02 | 12.07 | 4.87 | 0.01 | н/а | 0.00 | 0.34 | 100.8 | 57.8 |
| 35 | 140 | 50.28 | 0.13 | 31.50 | 0.36 | 0.03 | 0.04 | 14.68 | 3.17 | 0.00 | н/а | 0.01 | 0.15 | 100.3 | 71.9 |
| 36 | 140 | 48.17 | 0.11 | 33.55 | 0.24 | 0.04 | 0.02 | 16.74 | 2.12 | 0.00 | н/а | 0.00 | 0.09 | 101.0 | 81.3 |
| 37 | 140 | 46.26 | 0.12 | 31.39 | 0.24 | 0.00 | 0.01 | 17.21 | 3.03 | 0.00 | н/а | 0.01 | 0.09 | 98.3 | 75.8 |
| 38 | 141 | 51.43 | 0.15 | 30.58 | 0.22 | 0.00 | 0.03 | 13.93 | 3.90 | 0.01 | н/а | 0.00 | 0.19 | 100.4 | 66.4 |
| 39 | 141 | 53.03 | 0.19 | 28.55 | 0.40 | 0.03 | 0.03 | 13.77 | 4.28 | 0.01 | н/а | 0.00 | 0.26 | 100.5 | 64.0 |
| 40 | 141 | 49.62 | 0.17 | 31.84 | 0.30 | 0.01 | 0.03 | 15.35 | 3.03 | 0.00 | н/а | 0.00 | 0.14 | 100.4 | 73.7 |
| 41 | 141 | 48.01 | 0.15 | 32.87 | 0.23 | 0.00 | 0.00 | 16.66 | 2.21 | 0.01 | н/а | 0.00 | 0.08 | 100.2 | 80.6 |
| 42 | 141 | 51.86 | 0.16 | 29.98 | 0.52 | 0.01 | 0.06 | 13.52 | 3.97 | 0.00 | н/а | 0.00 | 0.14 | 100.2 | 65.3 |
| 43 | 141 | 54.92 | 0.20 | 27.92 | 0.56 | 0.00 | 0.04 | 10.97 | 5.39 | 0.00 | н/а | 0.00 | 0.29 | 100.2 | 52.9 |
| 44 | 141 | 52.91 | 0.20 | 29.55 | 0.56 | 0.00 | 0.15 | 13.12 | 4.26 | 0.02 | н/а | 0.00 | 0.20 | 100.9 | 62.9 |
| 45 | 141 | 50.52 | 0.15 | 30.29 | 0.68 | 0.00 | 0.08 | 14.28 | 3.52 | 0.00 | н/а | 0.04 | 0.17 | 99.7 | 69.2 |

Примечание. № пп 1–21 – оливин. 22–27 – пироксен. 28–45 – плагиоклаз. № образца – глубина по скв. МП-26, м. Fo, мол. % – мольная доля форстеритового минала в оливине; Ап, мол. % – мольная доля анортитового минала в плагиоклазе. Mg# – магнезиальность пироксена.

обнаруживают зависимости от магнезиальности минерала. Высокие концентрации никеля в оливинах Черногорского массива сопоставимы с концентрациями его в оливинах массивов, с которыми связаны уникальные месторождения – Хараелахским и Талнахским (Рябов, 1992), и они немного ниже концентраций этого металла в оливинах Норильска 1, где они достигают 0.28 мас. % (Туровцев, 2002). Содержания MnO (рис. 6б) рас-

тут в процессе кристаллизационной дифференциации расплава и образования железистого оливина, причем наблюдается отличная корреляция между фаялитовой составляющей и концентрацией марганца в нем ($R^2 = 0.98$). Для CaO в оливинах в целом наблюдается корреляция с железистой составляющей в оливинах (рис. 6в), хотя в пределах отдельных горизонтов эта тенденция отсутствует, за исключением железистых оливинов

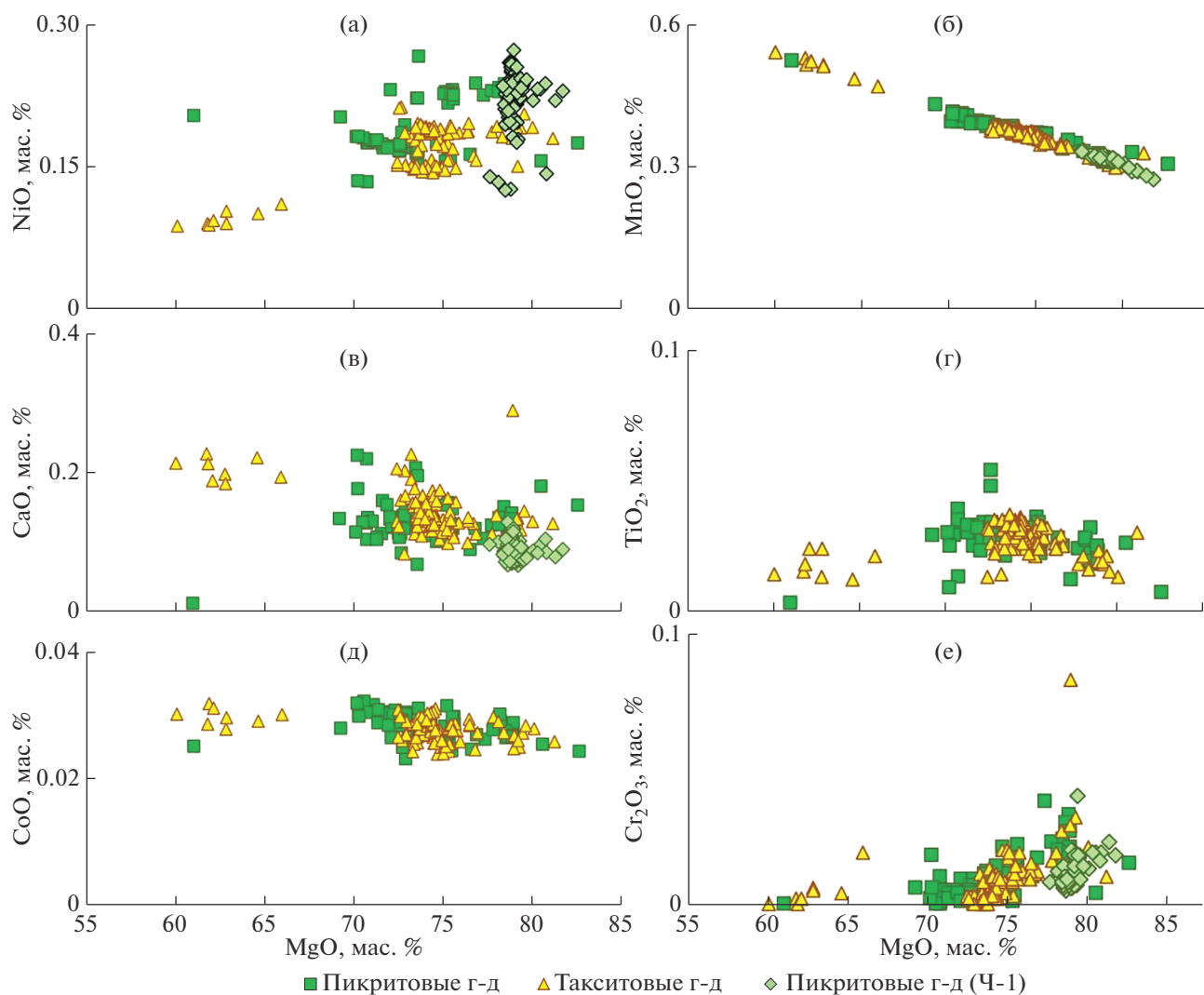


Рис. 6. Диаграммы составов оливинов Черногорского интрузива (мас. %). (а) MgO–NiO, (б) MgO–MnO, (в) MgO–CaO, (г) MgO–TiO₂, (д) MgO–CoO, (е) MgO–Cr₂O₃.

такситовых габбро-долеритов. Близкая картина наблюдается для кобальта, хотя его накопление происходит не так стремительно, как марганца. Более сложное поведение типично для титана и кобальта (рис. 6г, 6д), концентрации их практически не зависят от главных элементов. Содержания Ti немного снижаются в наиболее высокомагнезиальных оливинах, а также в самых железистых. Распределение хрома в оливинах близко к гиперболическому – его концентрации резко возрастают в высокомагнезиальных оливинах (рис. 6е).

Пироксен образует крупные зерна (до 6–8 мм), в котором заключены лейсты плагиоклаза. В центральной части массива, сложенной оливиновыми и олинсодержащими габбро-долеритами, пироксен имеет зональное строение: его периферические части обогащены титаном, а центральные – хромом. Он представлен клинопироксеном, преимущественно авгитом. Магнезиальность его, также как и оливина, меняется в зависимости от

состава пород: в пикритовых габбро-долеритах она максимальна и меняется в пределах Mg# = 79.3–83.3, в то время как в вышележающих оливиновых и оливинсодержащих габбро-долеритах она составляет Mg# = 66.9–78.1. В целом состав его меняется в следующих пределах Wo_{34.5–37.8} En_{8.7–29.3} Fs_{45.0–55.3}. Главными элементами-примесями являются Al, Na, Mn, Ti и Cr.

Плагиоклаз является одним из главных породообразующих минералов. Морфология и размер его зерен очень разнообразны даже в пределах отдельных образцов. Наиболее типичны лейсты размером от 0.2–0.4 мм до 2–3 мм, заключенные в пироксене. В пикритовых габбро-долеритах присутствуют более коротко призматические кристаллы. Характерны полисинтетические двойники, зональность проявлена очень слабо или отсутствует вообще. Состав минерала сильно варьирует в каждом горизонте. Наиболее основные разновидности

плагиоклаза (до $An_{81.3}$) установлены в пикритовых и троктолитовых габбро-долеритах (табл. 1, № 33).

В пикритовых габбро-долеритах присутствуют хромшпинелиды, содержания которых иногда достигают в локальных участках – 10–15 об. %. Их состав существенно варьирует – от высокохромистых ($Cr_2O_3 = 36$ мас. %) до среднехромистых (14 мас. % Cr_2O_3). Характерно для них высокое содержание ванадия, которое достигает 1.6 мас. % V_2O_5 , превышающие содержания этого оксида в шпинелидах других массивов (табл. 2).

Геохимические особенности пород Черногорского массива

Главные компоненты. Химический состав пород был изучен нами по скважине Ч-55 (рис. 7, табл. 3), расположенной в центральной части массива и являющейся в этом отношении представительной для Черногорского интрузива (судя по данным ООО “Норильскгеология”, мощность главных горизонтов выдержана в пределах всего массива, кроме северо-западной части). Концентрации оксидов меняются по разрезу закономерно, отражая строение интрузива: максимальные концентрации магния типичны для нижней части массива, для пикритовых габбро-долеритов, где они достигают 25 мас. %, что близко к содержаниям MgO в других рудоносных массивах норильского комплекса – в Норильске 1, Талнахском и Хараелахском. Вниз и вверх по разрезу концентрации падают (рис. 7а) и отражают состав такситовых габбро-долеритов, подстилающих пикритовые разновидности, и оливиновых и оливинсодержащих габбро-долеритах, перекрывающих их. Такое распределение в целом типично для норильских интрузивов (Рябов и др., 2000; Кривоуцкая и др., 2001). Особенностью данного разреза является появление низкомагнезиальных пород (оливинсодержащих габбро-долеритов) непосредственно над пикритовым горизонтом: как правило, в направлении верхнего контакта происходит постепенное снижение магнезиальности пород через оливиновые габбро-долериты. Кривая распределения SiO_2 практически зеркально отражает распределение этого элемента по отношению к магнию (рис. 7б). Содержания кремнезема варьируют от 41 до 50 мас. %. Распределение титана и железа в разрезе (рис. 7в, 7г) Черногорского интрузива практически идентичны: наблюдается увеличение содержаний этих элементов в верхней части массива, где появляются породы, обогащенные титаномагнетитом (феррогаббро), а также в нижней его части – в пикритовых и такситовых габбро-долеритах, что связано с появлением в этих горизонтах сульфидов. Концентрации TiO_2 не превышают 1 мас. % (рис. 7в), в среднем составляя 0.6 мас. %. Только в верхней части массива в одном из образцов зафиксировано значение в 1% (табл. 3). Максимальные содержания алюминия

установлены в лейкогаббро (до 21 мас. % Al_2O_3), а минимальные – в пикритовых габбро-долеритах (5 мас. %). Содержания натрия постепенно возрастают от подошвы к кровле интрузива, достигая 2.5 мас. % Na_2O (рис. 7д), в то время как изменение содержаний калия (рис. 7е) не столь закономерно: оно повышается только в верхней части интрузива, а также в самой его нижней части. Разница в поведении этих элементов связана с тем, что натрий является главным элементом в плагиоклазе и отражает в целом его состав, в то время как калий свидетельствует больше о проявлении наложенных гидротермальных процессов. Концентрации фосфора также несколько повышаются в приконтактных зонах интрузива (рис. 7ж).

Сопоставление химического состава пород Черногорского интрузива с другими массивами норильского комплекса (рис. 8), свидетельствует в целом об их близком составе, независимо от степени их рудоносности: массивы, содержащие уникальные по запасам руды (Талнахский интрузив), так и вмещающие крупные (Норильск 1) и мелкие месторождения (Норильск 2) практически не отличаются друг от друга. Но при этом Черногорский интрузив характеризуется повышенными концентрациями алюминия и кальция и пониженными железа и титана в оливиновых и оливинсодержащих породах, отражающих их более лейкократовый состав. Среднее содержание Al_2O_3 составляет 16.8 мас. % и является повышенным по сравнению с другими массивами, где аналогичные содержания отмечаются только в единичных случаях в лейкогаббро. Концентрации титана немного ниже в целом, чем аналогичные содержания в массивах, с которыми связаны крупные месторождения, и существенно ниже концентраций, наблюдаемых в Южно-Масловском интрузиве, породы которого в верхней части обогащены титаномагнетитом, вследствие чего концентрации TiO_2 достигают 3% и, таким образом, превышают максимальные содержания окиси титана в Черногорском интрузиве в три раза. Как следует из рис. 8, Южно-Масловский массив в целом отличается от других массивов Норильского района, за счет состава верхней зоны, существенно обогащенной титаномагнетитом.

Редкие элементы. Поскольку распределение главных породообразующих оксидов в разрезах интрузивов сильно зависит от внутреннего строения массивов, наибольший интерес представляет изучение в породах редких элементов, поведение которых слабо зависит от фракционирования расплава. Спектры распределения редких элементов в породах Черногорского массива очень близки между собой по топологии (рис. 9): в них отчетливо проявлена отрицательная Ta–Nb аномалия, а также положительная аномалия Pb, Sr и U. Для пород верхней части интрузива характерна небольшая положительная аномалия Ti, обуслов-

Таблица 2. Химический состав хромшпинелидов, мас. %

| № п/п | № обр. | SiO ₂ | TiO ₂ | CaO | FeO | CoO | MgO | Cr ₂ O ₃ | NiO | MnO | Al ₂ O ₃ | V ₂ O ₃ | ZnO |
|-------|--------|------------------|------------------|-------|-------|-------|-------|--------------------------------|------|------|--------------------------------|-------------------------------|------|
| 1 | 133-1 | 0.78 | 4.71 | 0.020 | 62.47 | 0.133 | 2.35 | 17.31 | 0.13 | 0.37 | 5.26 | 1.59 | 0.16 |
| 2 | 133-2 | 0.65 | 4.36 | 0.017 | 62.60 | 0.117 | 2.25 | 17.75 | 0.12 | 0.39 | 5.35 | 1.61 | 0.14 |
| 3 | 133-3 | 0.91 | 4.48 | 0.009 | 64.34 | 0.116 | 2.35 | 15.92 | 0.12 | 0.35 | 4.79 | 1.58 | 0.19 |
| 4 | 133-4 | 0.93 | 4.64 | 0.000 | 61.96 | 0.115 | 2.17 | 17.46 | 0.12 | 0.38 | 5.26 | 1.56 | 0.18 |
| 5 | 134 | 0.74 | 1.43 | 0.006 | 42.00 | 0.093 | 4.92 | 36.10 | 0.11 | 0.37 | 11.73 | 0.42 | 0.25 |
| 6 | 137 | 0.78 | 2.85 | 0.132 | 55.10 | 0.089 | 3.52 | 26.59 | 0.13 | 0.36 | 5.60 | 0.48 | 0.15 |
| 7 | 134 | 0.60 | 1.80 | 0.000 | 47.31 | 0.116 | 3.74 | 34.11 | 0.14 | 0.39 | 8.29 | 0.55 | 0.23 |
| 8 | 134 | 0.66 | 1.42 | 0.018 | 42.23 | 0.109 | 4.80 | 36.06 | 0.13 | 0.38 | 11.78 | 0.41 | 0.25 |
| 9 | 134 | 0.77 | 3.41 | 0.053 | 53.21 | 0.124 | 2.76 | 29.76 | 0.19 | 0.36 | 5.99 | 0.54 | 0.20 |
| 10 | 140 | 0.81 | 4.61 | 0.035 | 58.40 | 0.134 | 2.41 | 24.55 | 0.15 | 0.39 | 3.93 | 0.78 | 0.15 |
| 11 | 140 | 0.60 | 4.83 | 0.028 | 63.84 | 0.126 | 2.32 | 17.24 | 0.17 | 0.34 | 4.12 | 1.43 | 0.13 |
| 12 | 140 | 0.61 | 2.72 | 0.000 | 61.67 | 0.114 | 2.37 | 21.11 | 0.16 | 0.33 | 5.61 | 1.31 | 0.15 |
| 13 | 140 | 0.63 | 4.31 | 0.000 | 67.39 | 0.134 | 2.30 | 14.05 | 0.17 | 0.32 | 4.06 | 1.62 | 0.13 |
| 14 | H/120 | 0.42 | 1.83 | 0.000 | 50.63 | н/а | 4.20 | 29.67 | 0.20 | 0.44 | 7.02 | 0.37 | 0.22 |
| 15 | H/120 | 0.35 | 1.22 | 0.019 | 39.43 | н/а | 5.64 | 39.64 | 0.14 | 0.43 | 11.08 | 0.25 | 0.24 |
| 16 | 1/120 | 0.47 | 1.28 | 0.000 | 43.05 | н/а | 5.38 | 33.86 | 0.18 | 0.42 | 11.02 | 0.25 | 0.19 |
| 17 | 1/120 | 0.64 | 2.13 | 0.005 | 52.70 | н/а | 4.28 | 26.20 | 0.25 | 0.47 | 7.11 | 0.38 | 0.22 |
| 18 | 1/120 | 3.63 | 22.54 | 0.485 | 44.02 | н/а | 5.11 | 0.97 | 0.10 | 0.59 | 1.09 | 0.00 | 0.04 |
| 19 | 1/120 | 0.24 | 0.11 | 0.009 | 13.06 | н/а | 15.90 | 60.44 | 0.17 | 0.15 | 10.05 | 0.07 | 0.02 |
| 20 | 1/120 | 0.31 | 1.58 | 0.004 | 42.54 | н/а | 5.28 | 36.57 | 0.15 | 0.41 | 9.12 | 0.20 | 0.20 |
| 21 | 1/120 | 0.33 | 1.53 | 0.000 | 42.09 | н/а | 5.08 | 37.03 | 0.15 | 0.44 | 8.88 | 0.21 | 0.23 |
| 22 | 1/120 | 0.31 | 1.74 | 0.000 | 43.25 | н/а | 4.98 | 36.81 | 0.17 | 0.43 | 8.80 | 0.23 | 0.24 |
| 23 | 1/120 | 0.34 | 2.53 | 0.011 | 45.60 | н/а | 4.63 | 32.93 | 0.18 | 0.45 | 7.75 | 0.07 | 0.23 |
| 24 | 1/120 | 0.35 | 2.75 | 0.000 | 47.54 | н/а | 4.66 | 30.60 | 0.19 | 0.41 | 7.52 | 0.02 | 0.18 |
| 25 | 1/120 | 0.71 | 22.97 | 5.086 | 36.00 | н/а | 5.66 | 1.28 | 0.05 | 0.51 | 0.39 | 0.00 | 0.00 |
| 26 | 1/120 | 0.35 | 2.08 | 0.013 | 48.33 | н/а | 4.50 | 31.13 | 0.22 | 0.44 | 7.76 | 0.28 | 0.18 |
| 27 | 1/120 | 0.35 | 1.76 | 0.000 | 52.44 | н/а | 3.96 | 28.35 | 0.23 | 0.41 | 6.93 | 0.47 | 0.20 |
| 28 | 1/120 | 0.34 | 3.88 | 0.008 | 50.27 | н/а | 4.95 | 27.89 | 0.23 | 0.46 | 6.16 | 0.00 | 0.11 |
| 29 | 1/120 | 1.10 | 24.14 | 0.064 | 42.06 | н/а | 4.32 | 0.48 | 0.04 | 0.61 | 0.56 | 0.00 | 0.00 |
| 30 | 1/120 | 2.58 | 23.70 | 0.278 | 40.91 | н/а | 5.27 | 0.53 | 0.03 | 0.56 | 0.67 | 0.00 | 0.01 |
| 31 | 1/120 | 0.26 | 2.08 | 0.000 | 53.58 | н/а | 4.12 | 24.52 | 0.19 | 0.43 | 9.40 | 1.37 | 0.18 |
| 32 | 1/120 | 0.32 | 2.68 | 0.012 | 56.15 | н/а | 3.63 | 22.04 | 0.18 | 0.46 | 7.54 | 1.32 | 0.16 |

Примечание. № 1–13 – образцы из Черногорского массива по скв. МП-2бис (дана глубина в м), № 14–32 – из массива Норильск-1 (120 горизонт карьера “Медвежий ручей”).

ленная повышенными содержаниями титаномагнетита, что отмечалось выше. Напротив, породы центральных и нижних частей интрузива, характеризуются небольшой отрицательной титановой аномалией. Такие особенности распределения редких элементов в целом типичны для массивов Норильского комплекса, хотя стронциевая аномалия в них проявлена не так ярко, а иногда почти отсутствует. Это продемонстрировано на примере разреза пород Талнахского массива, в котором в данном случае (рис. 9г, скв. ОУГ-2) верхней части отмечается мощный горизонт габбро-диоритов (Криволицкая и др., 2001). Sr аномалия подчеркивает специфический петрохимический состав Черногорского интрузива, в котором породы центрального его части обогащены плагиоклазом.

Топология спектров распределения редких элементов более наглядно отображается характерными отношениями ряда элементов, которые отражают особенности их накопления в породах: (La/Yb)*n* отношение несет информацию о наклоне спектра относительно горизонтальной оси и об

обогащенности легкими редкими землями относительно тяжелых, а (La/Sm)*n* – средними редкими землями. Отношение (Gd/Yb)*n* характеризует наклон правой части спектра, свидетельствующий о присутствии или отсутствии граната в источнике образования магм, в то время как (Th/Nb)*n* отношение характеризует величину Ta-Nb аномалии, отражающей коровую составляющую в исходной магме. На диаграмме (La/Sm)*n*–(Gd/Yb)*n* точки составов пород всех интрузивов (рис. 10а) образуют единое поле, ограниченное значениями 2.0 и 1.3 соответствующих отношений элементов. Некоторые образцы характеризуются немного повышенными значениями указанных отношений (до 2.5 и 1.5), а один образец Талнахского массива (ОУГ-2/1259) обладает очень высоким отношением (La/Sm)*n* = 4.6. Образцы, характеризующиеся указанными особенностями, располагаются в области нижнего эндоконтакта интрузивов, где проявлены процессы ассимиляции расплавами осадочных пород (составы пород Тунгусской серии и карбонатно-терригенных пород приведены нами в статье Krivolutskaia et al, 2020). Диаграм-

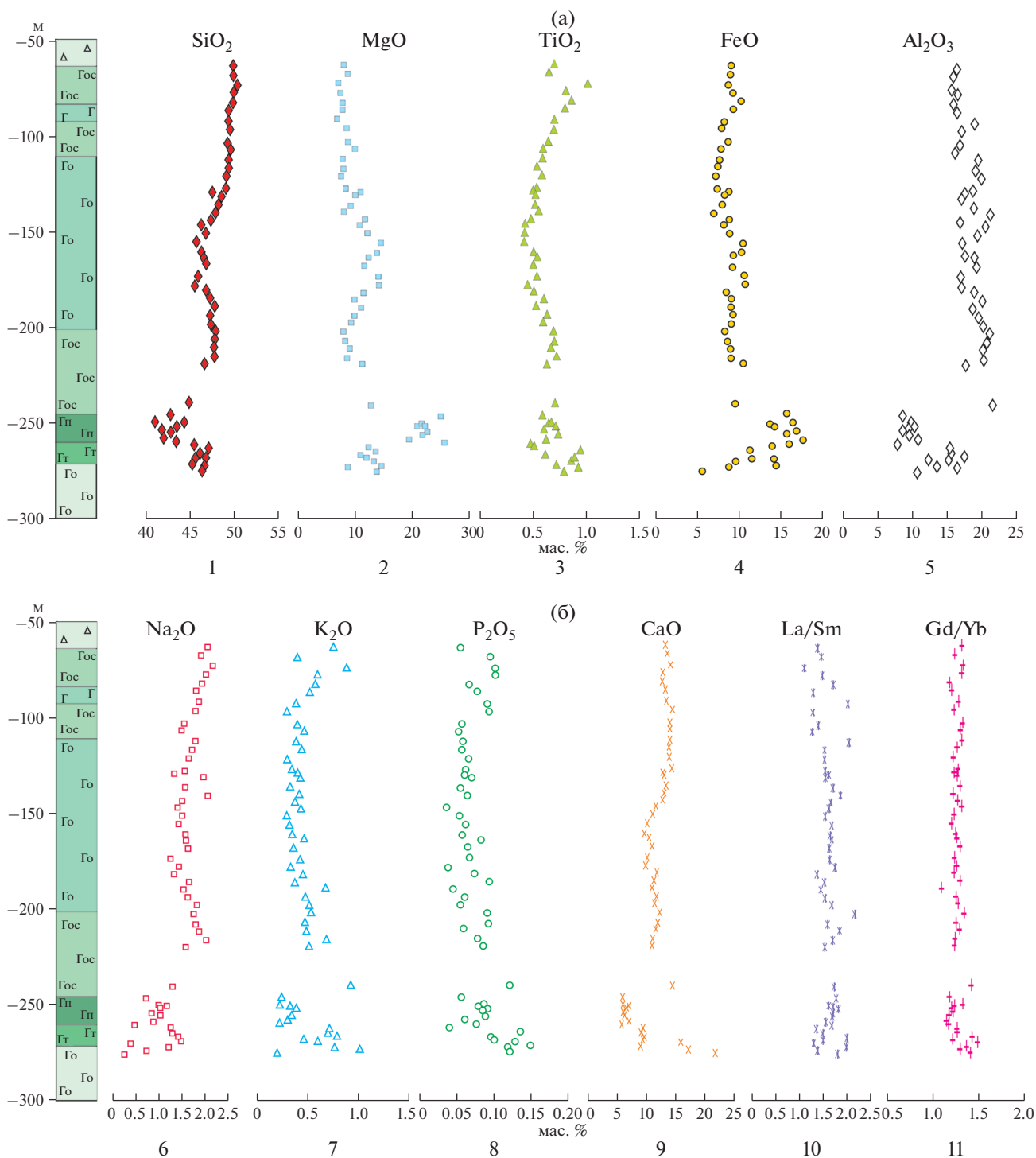


Рис. 7. Распределение оксидов (мас. %) и отношений элементов в разрезе Черногорского интрузива по скв. Ч-55. (а) 1 – SiO₂, 2 – MgO, 3 – TiO₂, 4 – FeO, 5 – Al₂O₃, (б) 6 – Na₂O, 7 – K₂O, 8 – P₂O₅, 9 – CaO, 10 – (La/Sm)*n*, 11 – (Gd/Yb)*n*. Условные обозначения на рис. 4.

ма (Th/Nb)*n*–(La/Yb)*n* также свидетельствует о близости составов пород изученных массивов (рис. 10б), образующих поле сближенных точек, а также о существенном отличии нескольких пород из приконтактовых зон.

Цветные металлы. Наиболее интересно поведение в породах никеля и меди – металлов, которые являются основными компонентами сульфидных руд. Хорошо известно (Рябов, 1992), что первый из указанных металлов находится в сили-

Таблица 3. Химический состав пород интрузивов Норильского района

| Компонент | Номер по порядку | | | | | | | | | |
|--------------------------------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| | Скважина Ч-55 | | | | | | | | | |
| | 63.6* | 68 | 77.8 | 82.6 | 86.6 | 92.6 | 103.6 | 107.1 | 112.7 | 116.5* |
| | Породы | | | | | | | | | |
| Г-д | Г | Г | Г | Г | Г | Г | Гос | Гос | Гос | Гос |
| SiO ₂ | 49.80 | 49.83 | 50.01 | 49.81 | 49.37 | 49.49 | 49.28 | 49.68 | 49.22 | 49.36 |
| TiO ₂ | 0.69 | 0.64 | 0.79 | 0.85 | 0.79 | 0.69 | 0.63 | 0.58 | 0.57 | 0.53 |
| Al ₂ O ₃ | 16.20 | 15.81 | 16.63 | 15.92 | 16.29 | 18.82 | 16.59 | 16.00 | 19.08 | 19.04 |
| FeO | 9.00 | 8.87 | 9.09 | 10.12 | 9.22 | 8.11 | 8.63 | 7.76 | 7.40 | 7.21 |
| MnO | 0.16 | 0.15 | 0.17 | 0.16 | 0.11 | 0.19 | 0.18 | 0.12 | 0.18 | 0.12 |
| MgO | 7.94 | 8.48 | 7.39 | 7.70 | 7.68 | 6.80 | 8.68 | 9.68 | 7.60 | 7.75 |
| CaO | 13.35 | 13.65 | 12.94 | 12.79 | 13.31 | 13.51 | 14.12 | 14.11 | 14.11 | 13.94 |
| Na ₂ O | 2.05 | 1.93 | 2.02 | 1.95 | 1.82 | 1.89 | 1.56 | 1.49 | 1.79 | 1.72 |
| K ₂ O | 0.76 | 0.41 | 0.60 | 0.58 | 0.53 | 0.40 | 0.41 | 0.48 | 0.40 | 0.44 |
| P ₂ O ₅ | 0.06 | 0.10 | 0.10 | 0.07 | 0.08 | 0.09 | 0.06 | 0.05 | 0.06 | 0.06 |
| Rb | 21.3 | 10.9 | 15.5 | 14.6 | 15.1 | 10.0 | 8.62 | 12.1 | 8.15 | 11.0 |
| Ba | 128 | 88.6 | 115 | 125 | 106 | 124 | 144 | 130 | 126 | 116 |
| Th | 0.41 | 0.55 | 0.66 | 1.42 | 0.58 | 0.65 | 0.42 | 0.43 | 0.48 | 0.47 |
| U | 0.16 | 0.22 | 0.27 | 0.47 | 0.25 | 0.24 | 0.17 | 0.17 | 0.20 | 0.19 |
| Nb | 2.04 | 1.99 | 2.76 | 2.85 | 2.84 | 2.68 | 1.99 | 1.73 | 1.88 | 1.80 |
| Ta | 0.11 | 0.15 | 0.16 | 0.18 | 0.15 | 0.15 | 0.12 | 0.10 | 0.12 | 0.11 |
| La | 3.49 | 3.82 | 4.78 | 5.92 | 4.06 | 6.04 | 3.54 | 3.08 | 4.78 | 3.59 |
| Ce | 8.45 | 8.57 | 11.31 | 13.02 | 9.80 | 13.19 | 8.45 | 7.25 | 9.64 | 8.12 |
| Pb | 2.50 | 2.49 | 2.21 | 2.12 | 1.86 | 6.01 | 3.88 | 2.18 | 2.98 | 1.80 |
| Pr | 1.17 | 1.23 | 1.55 | 1.79 | 1.43 | 1.68 | 1.18 | 1.07 | 1.22 | 1.13 |
| Nd | 5.63 | 5.91 | 7.53 | 8.37 | 7.09 | 7.46 | 5.71 | 5.23 | 5.50 | 5.40 |
| Sr | 448 | 293 | 280 | 267 | 286 | 275 | 312 | 282 | 341 | 293 |
| Sm | 1.64 | 1.70 | 2.09 | 2.24 | 2.05 | 1.94 | 1.64 | 1.57 | 1.52 | 1.52 |
| Zr | 34.8 | 40.8 | 46.0 | 59.3 | 44.7 | 40.0 | 32.4 | 40.2 | 37.1 | 36.8 |
| Hf | 0.99 | 1.15 | 1.21 | 1.57 | 1.19 | 1.07 | 0.86 | 1.06 | 1.05 | 0.97 |
| Eu | 0.65 | 0.65 | 0.81 | 0.85 | 0.75 | 0.73 | 0.63 | 0.57 | 0.63 | 0.59 |
| Ti | 4061 | 3753 | 4614 | 4949 | 4832 | 4197 | 3740 | 3530 | 3468 | 3250 |
| Gd | 2.13 | 2.18 | 2.54 | 2.80 | 2.49 | 2.19 | 1.96 | 2.00 | 1.93 | 1.88 |
| Tb | 0.34 | 0.37 | 0.43 | 0.47 | 0.44 | 0.37 | 0.35 | 0.33 | 0.33 | 0.31 |
| Dy | 2.35 | 2.54 | 2.81 | 3.16 | 2.85 | 2.51 | 2.31 | 2.30 | 2.15 | 2.09 |
| Ho | 0.48 | 0.52 | 0.59 | 0.67 | 0.59 | 0.50 | 0.46 | 0.47 | 0.45 | 0.43 |
| Y | 13.4 | 13.8 | 15.3 | 17.6 | 15.7 | 13.6 | 12.4 | 12.7 | 11.8 | 11.5 |
| Er | 1.39 | 1.52 | 1.70 | 1.93 | 1.72 | 1.47 | 1.28 | 1.40 | 1.24 | 1.25 |
| Yb | 1.34 | 1.46 | 1.60 | 1.98 | 1.72 | 1.42 | 1.23 | 1.28 | 1.22 | 1.23 |
| Tm | 0.20 | 0.22 | 0.24 | 0.28 | 0.24 | 0.20 | 0.19 | 0.19 | 0.18 | 0.18 |
| Lu | 0.20 | 0.22 | 0.23 | 0.29 | 0.24 | 0.20 | 0.19 | 0.20 | 0.19 | 0.17 |
| Ni | 839 | 169 | 106 | 109 | 168 | 110 | 169 | 178 | 118 | 127 |
| Cu | 821 | 234 | 141 | 135 | 174 | 144 | 141 | 108 | 111 | 95 |
| Zn | 96 | 83 | 79 | 95 | 65 | 117 | 85 | 64 | 107 | 83 |
| Co | 66 | 47 | 42 | 46 | 42 | 38 | 43 | 46 | 36 | 37 |
| V | 253 | 233 | 242 | 253 | 253 | 208 | 233 | 223 | 185 | 182 |
| Cr | 200 | н/а | н/а | н/а | н/а | н/а | н/а | н/а | н/а | 900 |
| S | 5900 | н/а | н/а | н/а | н/а | н/а | н/а | н/а | н/а | 700 |

Таблица 3. Продолжение

| Компонент | Номер по порядку | | | | | | | | | |
|--------------------------------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| | Скважина Ч-55 | | | | | | | | | |
| | 121.4 | 127.6 | 131.2 | 136.5 | 140.3 | 143.9 | 147 | 151.1 | 155.9 | 161.2 |
| | Породы | | | | | | | | | |
| Гос | Го | Го | Го | Го | Го | Го | Го | Го | Го | Го |
| SiO ₂ | 49.09 | 49.03 | 48.68 | 48.39 | 47.98 | 47.55 | 46.30 | 46.83 | 45.68 | 46.35 |
| TiO ₂ | 0.57 | 0.52 | 0.51 | 0.51 | 0.53 | 0.46 | 0.41 | 0.41 | 0.40 | 0.49 |
| Al ₂ O ₃ | 19.75 | 18.55 | 17.00 | 18.70 | 21.02 | 16.78 | 20.52 | 19.25 | 17.13 | 17.20 |
| FeO | 7.26 | 7.27 | 8.09 | 7.89 | 6.80 | 8.64 | 8.07 | 8.70 | 10.26 | 10.10 |
| MnO | 0.18 | 0.19 | 0.12 | 0.18 | 0.13 | 0.18 | 0.14 | 0.18 | 0.16 | 0.18 |
| MgO | 7.50 | 8.37 | 10.02 | 9.10 | 7.85 | 11.59 | 10.80 | 12.02 | 14.53 | 13.82 |
| CaO | 14.01 | 14.46 | 13.15 | 13.46 | 13.15 | 12.84 | 11.68 | 11.12 | 10.22 | 9.75 |
| Na ₂ O | 1.67 | 1.55 | 1.98 | 1.56 | 2.07 | 1.50 | 1.41 | 1.51 | 1.42 | 1.58 |
| K ₂ O | 0.30 | 0.35 | 0.43 | 0.34 | 0.42 | 0.38 | 0.45 | 0.30 | 0.33 | 0.34 |
| P ₂ O ₅ | 0.07 | 0.06 | 0.07 | 0.06 | 0.07 | 0.03 | 0.04 | 0.06 | 0.06 | 0.05 |
| Rb | 6.88 | 7.37 | 11.06 | 7.53 | 9.19 | 9.27 | 10.16 | 7.75 | 8.74 | 9.15 |
| Ba | 80.1 | 126 | 93.5 | 102 | 126 | 106 | 109 | 72.7 | 117 | 107 |
| Th | 0.52 | 0.38 | 0.37 | 0.37 | 0.58 | 0.41 | 0.44 | 0.34 | 0.33 | 0.40 |
| U | 0.21 | 0.16 | 0.16 | 0.15 | 0.32 | 0.15 | 0.13 | 0.15 | 0.14 | 0.15 |
| Nb | 1.94 | 1.71 | 1.50 | 1.57 | 2.14 | 1.62 | 1.49 | 1.33 | 1.36 | 1.70 |
| Ta | 0.11 | 0.11 | 0.09 | 0.11 | 0.13 | 0.11 | 0.10 | 0.09 | 0.08 | 0.10 |
| La | 3.32 | 3.43 | 3.29 | 3.65 | 4.09 | 3.20 | 2.85 | 2.90 | 2.77 | 3.14 |
| Ce | 7.84 | 7.77 | 7.23 | 7.55 | 9.30 | 7.34 | 6.25 | 6.41 | 6.54 | 7.25 |
| Pb | 3.06 | 1.73 | 2.70 | 2.20 | 4.76 | 4.04 | 4.86 | 1.31 | 3.43 | 3.13 |
| Pr | 1.09 | 1.06 | 1.00 | 1.04 | 1.24 | 1.01 | 0.88 | 0.88 | 0.88 | 0.96 |
| Nd | 5.07 | 5.10 | 4.78 | 4.89 | 5.35 | 4.66 | 4.12 | 4.22 | 4.02 | 4.49 |
| Sr | 256 | 371 | 291 | 277 | 323 | 280 | 381 | 293 | 324 | 319 |
| Sm | 1.41 | 1.44 | 1.38 | 1.39 | 1.42 | 1.25 | 1.14 | 1.22 | 1.07 | 1.24 |
| Zr | 36.5 | 30.7 | 31.9 | 30.3 | 45.1 | 29.4 | 27.7 | 26.5 | 22.5 | 27.5 |
| Hf | 0.94 | 0.84 | 0.89 | 0.83 | 1.14 | 0.80 | 0.72 | 0.73 | 0.62 | 0.74 |
| Eu | 0.60 | 0.59 | 0.53 | 0.56 | 0.62 | 0.53 | 0.50 | 0.51 | 0.48 | 0.49 |
| Ti | 3433 | 3190 | 2961 | 2966 | 3253 | 2933 | 2605 | 2505 | 2444 | 2976 |
| Gd | 1.68 | 1.69 | 1.76 | 1.70 | 1.65 | 1.57 | 1.34 | 1.41 | 1.25 | 1.38 |
| Tb | 0.28 | 0.29 | 0.30 | 0.29 | 0.28 | 0.26 | 0.22 | 0.23 | 0.21 | 0.23 |
| Dy | 1.95 | 1.92 | 1.96 | 1.90 | 1.86 | 1.76 | 1.41 | 1.60 | 1.41 | 1.50 |
| Ho | 0.40 | 0.40 | 0.41 | 0.39 | 0.38 | 0.36 | 0.29 | 0.32 | 0.29 | 0.31 |
| Y | 10.7 | 10.3 | 10.9 | 10.2 | 10.8 | 9.50 | 8.12 | 8.83 | 7.79 | 8.47 |
| Er | 1.17 | 1.09 | 1.18 | 1.09 | 1.10 | 1.08 | 0.87 | 0.91 | 0.86 | 0.91 |
| Yb | 1.14 | 1.11 | 1.16 | 1.09 | 1.12 | 1.03 | 0.85 | 0.95 | 0.87 | 0.92 |
| Tm | 0.15 | 0.16 | 0.17 | 0.16 | 0.16 | 0.14 | 0.13 | 0.13 | 0.12 | 0.13 |
| Lu | 0.17 | 0.16 | 0.17 | 0.17 | 0.17 | 0.15 | 0.13 | 0.13 | 0.12 | 0.13 |
| Ni | 156 | 167 | 205 | 193 | 165. | 256 | 261 | 304 | 349 | 350 |
| Cu | 125. | 195. | 125 | 129 | 111 | 107 | 45 | 82 | 69 | 68 |
| Zn | 89 | 69 | 81 | 63 | 86 | 88 | 80 | 60 | 66 | 90 |
| Co | 38 | 40 | 47 | 47 | 40 | 55 | 54 | 65 | 72 | 73 |
| V | 182 | 194 | 187 | 170 | 157 | 175 | 123 | 124 | 124 | 132 |
| Cr | н/а | н/а | н/а | н/а | н/а | н/а | н/а | н/а | н/а | н/а |
| S | н/а | н/а | н/а | н/а | н/а | н/а | н/а | н/а | н/а | н/а |

Таблица 3. Продолжение

| Компонент | Номер по порядку | | | | | | | | | |
|--------------------------------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|
| | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 |
| | Скважина Ч-55 | | | | | | | | | |
| | 168.2 | 173.7 | 178.1 | 181.6 | 185.7 | 189.5 | 194.3* | 197.6 | 210.9 | 219.3* |
| | Породы | | | | | | | | | |
| Го | Го | Го | Го | Го | Го | Го | Го | Гос | Го | |
| SiO ₂ | 46.83 | 45.86 | 45.78 | 46.85 | 47.41 | 47.72 | 45.68 | 47.40 | 47.69 | 45.32 |
| TiO ₂ | 0.49 | 0.52 | 0.43 | 0.49 | 0.60 | 0.52 | 0.60 | 0.59 | 0.65 | 0.62 |
| Al ₂ O ₃ | 19.17 | 17.06 | 16.98 | 18.71 | 19.73 | 18.58 | 18.54 | 19.97 | 19.79 | 16.36 |
| FeO | 9.15 | 10.50 | 10.63 | 8.34 | 8.96 | 8.95 | 9.67 | 9.00 | 8.81 | 11.19 |
| MnO | 0.16 | 0.15 | 0.12 | 0.15 | 0.08 | 0.11 | 0.14 | 0.19 | 0.18 | 0.15 |
| MgO | 11.61 | 14.07 | 14.10 | 11.46 | 9.85 | 10.97 | 9.65 | 9.11 | 9.00 | 11.23 |
| CaO | 11.02 | 10.23 | 9.97 | 11.85 | 11.36 | 11.05 | 11.60 | 11.50 | 11.67 | 10.71 |
| Na ₂ O | 1.63 | 1.23 | 1.41 | 1.32 | 1.68 | 1.57 | 1.74 | 1.83 | 1.86 | 1.73 |
| K ₂ O | 0.37 | 0.43 | 0.34 | 0.46 | 0.39 | 0.69 | 0.49 | 0.53 | 0.50 | 0.54 |
| P ₂ O ₅ | 0.06 | 0.07 | 0.04 | 0.07 | 0.10 | 0.05 | 0.07 | 0.06 | 0.06 | 0.07 |
| Rb | 8.35 | 11.1 | 9.03 | 10.2 | 8.41 | 17.8 | н/а | 11.8 | 11.45 | н/а |
| Ba | 110 | 85.2 | 88.9 | 88.6 | 129 | 101 | н/а | 127 | 138 | н/а |
| Th | 0.65 | 0.38 | 0.42 | 0.41 | 0.56 | 0.83 | н/а | 0.46 | 0.45 | н/а |
| U | 0.18 | 0.16 | 0.21 | 0.12 | 0.24 | 0.15 | н/а | 0.17 | 0.25 | н/а |
| Nb | 1.89 | 1.82 | 1.44 | 1.84 | 2.40 | 2.46 | н/а | 1.87 | 2.16 | н/а |
| Ta | 0.11 | 0.11 | 0.09 | 0.10 | 0.15 | 0.13 | н/а | 0.12 | 0.14 | н/а |
| La | 3.46 | 3.15 | 3.30 | 2.59 | 3.95 | 3.23 | н/а | 4.03 | 4.64 | н/а |
| Ce | 8.24 | 7.46 | 7.31 | 6.47 | 9.26 | 7.36 | н/а | 8.80 | 10.09 | н/а |
| Pb | 1.28 | 1.56 | 2.73 | 2.15 | 4.75 | 1.21 | н/а | 1.97 | 4.53 | н/а |
| Pr | 1.10 | 1.01 | 0.96 | 0.90 | 1.28 | 1.05 | н/а | 1.19 | 1.34 | н/а |
| Nd | 4.99 | 4.57 | 4.46 | 4.30 | 6.17 | 4.96 | н/а | 5.60 | 6.17 | н/а |
| Sr | 312 | 306 | 255 | 357 | 386 | 354 | н/а | 317 | 364 | н/а |
| Sm | 1.38 | 1.25 | 1.22 | 1.23 | 1.68 | 1.45 | н/а | 1.56 | 1.63 | н/а |
| Zr | 47.8 | 28.4 | 28.2 | 29.0 | 40.2 | 47.3 | н/а | 30.4 | 40.9 | н/а |
| Hf | 1.20 | 0.74 | 0.73 | 0.79 | 1.05 | 1.27 | н/а | 0.87 | 1.08 | н/а |
| Eu | 0.57 | 0.51 | 0.52 | 0.51 | 0.61 | 0.54 | н/а | 0.64 | 0.67 | н/а |
| Ti | 3106 | 3050 | 2619 | 3113 | 3596 | 3011 | н/а | 3570 | 3864 | н/а |
| Gd | 1.54 | 1.47 | 1.50 | 1.45 | 1.90 | 1.88 | н/а | 1.89 | 1.96 | н/а |
| Tb | 0.26 | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.31 | 0.32 | н/а | 0.32 | 0.33 | н/а |
| Dy | 1.68 | 1.67 | 1.62 | 1.66 | 2.00 | 2.22 | н/а | 2.15 | 2.18 | н/а |
| Ho | 0.34 | 0.34 | 0.34 | 0.34 | 0.41 | 0.48 | н/а | 0.42 | 0.46 | н/а |
| Y | 9.28 | 9.10 | 8.90 | 9.07 | 11.2 | 12.8 | н/а | 11.6 | 12.14 | н/а |
| Er | 1.00 | 0.97 | 0.98 | 1.00 | 1.23 | 1.40 | н/а | 1.28 | 1.32 | н/а |
| Yb | 0.98 | 0.99 | 0.99 | 0.98 | 1.22 | 1.43 | н/а | 1.23 | 1.26 | н/а |
| Tm | 0.14 | 0.14 | 0.14 | 0.15 | 0.17 | 0.21 | н/а | 0.18 | 0.19 | н/а |
| Lu | 0.15 | 0.14 | 0.15 | 0.15 | 0.18 | 0.21 | н/а | 0.18 | 0.19 | н/а |
| Ni | 312 | 374 | 376 | 329 | 265 | 357 | н/а | 245 | 245 | н/а |
| Cu | 67 | 82 | 114 | 91 | 208 | 81 | н/а | 92 | 142 | н/а |
| Zn | 51 | 87 | 100 | 71 | 118 | 58 | н/а | 82 | 104 | н/а |
| Co | 62 | 73 | 75 | 59 | 55 | 55 | н/а | 51 | 51 | н/а |
| V | 137 | 136 | 126 | 145 | 149 | 157 | н/а | 165 | 164 | н/а |
| Cr | н/а | н/а | н/а | н/а | н/а | н/а | 300 | н/а | н/а | 300 |
| S | н/а | н/а | н/а | н/а | н/а | н/а | 1200 | н/а | н/а | 2200 |

Таблица 3. Продолжение

| Компонент | Номер по порядку | | | | | | | | | |
|--------------------------------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|
| | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 |
| | Скважина Ч-55 | | | | | | | | | |
| | 249.9 | 250.5 | 251.8 | 253.8 | 260.3 | 262.3 | 264.4* | 266.9 | 269.5* | 271.8 |
| | Породы | | | | | | | | | |
| Гп | Гп | Гп | Гп | Гп | Гт | Гт | Гт | Гт | Гт | |
| SiO ₂ | 41.09 | 44.41 | 44.02 | 41.91 | 43.42 | 45.54 | 47.20 | 46.19 | 44.38 | 45.49 |
| TiO ₂ | 0.66 | 0.63 | 0.70 | 0.59 | 0.46 | 0.49 | 0.93 | 0.60 | 0.82 | 0.71 |
| Al ₂ O ₃ | 9.88 | 10.12 | 9.65 | 8.47 | 7.85 | 15.35 | 15.29 | 17.38 | 11.30 | 13.38 |
| FeO | 16.40 | 13.73 | 14.33 | 16.98 | 15.93 | 13.93 | 11.18 | 11.41 | 9.68 | 14.30 |
| MnO | 0.22 | 0.23 | 0.28 | 0.26 | 0.25 | 0.25 | 0.17 | 0.18 | 0.32 | 0.26 |
| MgO | 21.48 | 21.02 | 21.9 | 22.2 | 25.4 | 12.1 | 13.4 | 10.9 | 12.90 | 14.5 |
| CaO | 6.05 | 7.04 | 6.62 | 6.10 | 5.83 | 9.51 | 9.16 | 9.73 | 14.91 | 9.09 |
| Na ₂ O | 1.01 | 1.18 | 1.03 | 0.82 | 0.43 | 1.27 | 1.28 | 1.44 | 0.50 | 1.20 |
| K ₂ O | 0.24 | 0.35 | 0.40 | 0.35 | 0.23 | 0.72 | 0.71 | 0.80 | 0.64 | 0.78 |
| P ₂ O ₅ | 0.09 | 0.08 | 0.09 | 0.09 | 0.08 | 0.04 | 0.13 | 0.10 | 0.08 | 0.15 |
| Rb | 5.52 | 9.27 | 9.51 | 10.6 | 7.63 | 18.8 | 16.3 | 16.0 | н/а | 20.9 |
| Ba | 375 | 140 | 164 | 150 | 108 | 168 | 150 | 227 | н/а | 180 |
| Th | 0.43 | 0.68 | 0.48 | 0.51 | 0.45 | 0.40 | 1.33 | 0.67 | н/а | 0.99 |
| U | 0.22 | 0.28 | 0.23 | 0.26 | 0.20 | 0.21 | 0.44 | 0.36 | н/а | 0.47 |
| Nb | 1.78 | 2.50 | 2.09 | 2.19 | 2.01 | 1.61 | 3.60 | 2.53 | н/а | 3.13 |
| Ta | 0.11 | 0.16 | 0.12 | 0.13 | 0.11 | 0.11 | 0.23 | 0.14 | н/а | 0.18 |
| La | 3.28 | 4.67 | 4.33 | 4.02 | 3.26 | 3.09 | 6.01 | 5.83 | н/а | 6.76 |
| Ce | 7.23 | 9.95 | 9.79 | 9.56 | 7.81 | 7.57 | 14.6 | 12.7 | н/а | 15.6 |
| Pb | 9.72 | 34.3 | 30.9 | 14.6 | 1.50 | 8.54 | 17.9 | 34.9 | н/а | 16.2 |
| Pr | 0.96 | 1.35 | 1.27 | 1.22 | 0.98 | 1.07 | 2.06 | 1.67 | н/а | 2.02 |
| Nd | 4.54 | 6.44 | 5.87 | 5.63 | 4.59 | 5.30 | 9.54 | 7.41 | н/а | 8.73 |
| Sr | 122 | 161 | 159 | 176 | 160 | 316 | 377 | 727 | н/а | 370 |
| Sm | 1.32 | 1.77 | 1.54 | 1.52 | 1.26 | 1.48 | 2.62 | 1.89 | н/а | 2.20 |
| Zr | 32.3 | 60.6 | 36.4 | 41.3 | 33.7 | 31.8 | 81.1 | 39.1 | н/а | 52.0 |
| Hf | 0.87 | 1.54 | 0.96 | 1.10 | 0.85 | 0.83 | 2.09 | 1.06 | н/а | 1.27 |
| Eu | 0.49 | 0.65 | 0.62 | 0.55 | 0.45 | 0.59 | 0.73 | 0.75 | н/а | 0.79 |
| Ti | 3506 | 3876 | 4051 | 3537 | 2872 | 3196 | 5571 | 3602 | н/а | 4236 |
| Gd | 1.62 | 2.20 | 1.93 | 1.82 | 1.36 | 1.77 | 2.90 | 2.17 | н/а | 2.59 |
| Tb | 0.25 | 0.36 | 0.32 | 0.30 | 0.24 | 0.30 | 0.49 | 0.37 | н/а | 0.43 |
| Dy | 1.66 | 2.51 | 2.09 | 2.02 | 1.57 | 2.00 | 3.19 | 2.30 | н/а | 2.84 |
| Ho | 0.36 | 0.53 | 0.43 | 0.41 | 0.30 | 0.39 | 0.66 | 0.47 | н/а | 0.55 |
| Y | 9.53 | 14.2 | 11.8 | 11.5 | 8.75 | 10.6 | 17.7 | 12.6 | н/а | 16.0 |
| Er | 1.13 | 1.49 | 1.29 | 1.22 | 0.91 | 1.18 | 1.91 | 1.40 | н/а | 1.72 |
| Yb | 1.02 | 1.48 | 1.33 | 1.24 | 0.97 | 1.16 | 1.91 | 1.26 | н/а | 1.57 |
| Tm | 0.16 | 0.21 | 0.18 | 0.18 | 0.13 | 0.16 | 0.26 | 0.18 | н/а | 0.23 |
| Lu | 0.17 | 0.22 | 0.20 | 0.18 | 0.12 | 0.16 | 0.28 | 0.19 | н/а | 0.24 |
| Ni | 1838 | 1569 | 1127 | 4226 | 1812 | 2340 | 1096 | 1682 | н/а | 1042 |
| Cu | 3269 | 1659 | 1691 | 5374 | 1163 | 3845 | 1530 | 3407 | н/а | 1662 |
| Zn | 1184 | 1146 | 1209 | 843 | 108 | 328 | 654 | 1012 | н/а | 727 |
| Co | 119 | 119 | 118 | 174 | 142 | 129 | 83 | 97 | н/а | 108 |
| V | 209 | 200 | 239 | 191 | 130 | 165 | 202 | 155 | н/а | 175 |
| Cr | н/а | н/а | н/а | н/а | н/а | н/а | н/а | н/а | 300 | н/а |
| S | н/а | н/а | н/а | н/а | н/а | н/а | 1200 | н/а | 1200 | н/а |

Таблица 3. Окончание

| Компонент | Номер по порядку | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|------------------|-------|---------|-------|----------------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|
| | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 | 49 | 50 | 51 | 52 |
| | Скважина Ч-55 | | | | Скважина МП-18 | | | | | | | |
| | 273.1 | 274.4 | 275.1 * | Ч-1* | 139 | 143 | 160 | 187.7 | 264.7* | 279 | 273.1 | 274.4 |
| | Породы | | | | | | | | | | | |
| Гп | Гт | Гт | Гп | Гос | Гос | Гос | Гос | Гос | Го | Го | Гос | |
| SiO ₂ | 41.09 | 44.93 | 45.01 | 40.79 | 47.64 | 49.43 | 49.51 | 48.13 | 50.26 | 48.46 | 46.45 | 46.08 |
| TiO ₂ | 0.66 | 0.69 | 0.73 | 0.58 | 0.69 | 0.88 | 0.74 | 0.84 | 1.42 | 0.68 | 0.85 | 0.67 |
| Al ₂ O ₃ | 9.88 | 21.12 | 10.36 | 7.75 | 17.45 | 15.04 | 17.39 | 16.35 | 13.76 | 16.52 | 14.70 | 14.36 |
| FeO | 16.40 | 9.32 | 5.70 | 15.66 | 10.88 | 11.21 | 9.69 | 10.72 | 12.62 | 12.27 | 12.72 | 16.86 |
| MnO | 0.22 | 0.14 | 0.10 | 0.23 | 0.21 | 0.24 | 0.18 | 0.27 | 0.31 | 0.26 | 0.54 | 0.24 |
| MgO | 21.48 | 12.80 | 14.04 | 23.74 | 8.62 | 7.81 | 7.79 | 9.49 | 6.55 | 8.95 | 13.33 | 8.02 |
| CaO | 6.05 | 14.5 | 20.84 | 5.87 | 11.55 | 12.59 | 13.02 | 11.39 | 11.40 | 10.62 | 9.14 | 11.59 |
| Na ₂ O | 1.01 | 1.30 | 0.26 | 0.71 | 1.91 | 2.13 | 1.96 | 1.91 | 2.50 | 2.21 | 1.21 | 1.84 |
| K ₂ O | 0.24 | 0.94 | 0.22 | 0.40 | 0.44 | 0.23 | 0.20 | 0.33 | 0.59 | 0.47 | 0.26 | 0.34 |
| P ₂ O ₅ | 0.09 | 0.12 | 0.11 | 0.06 | 0.09 | 0.09 | 0.07 | 0.09 | 0.15 | 0.07 | 0.14 | 0.07 |
| Rb | 5.52 | 28.5 | н/а | н/а | 14.0 | 5.02 | 3.86 | 8.67 | 14.6 | 14.9 | 10.2 | 9.98 |
| Ba | 375 | 224 | н/а | н/а | 87.5 | 95.4 | 75.7 | 129 | 190 | 145 | 217 | 96.7 |
| Th | 0.43 | 0.76 | н/а | н/а | 0.75 | 0.80 | 0.51 | 0.95 | 1.25 | 0.85 | 0.71 | 0.92 |
| U | 0.22 | 0.27 | н/а | н/а | 0.36 | 0.41 | 0.26 | 0.50 | 0.51 | 0.36 | 0.37 | 0.41 |
| Nb | 1.78 | 2.89 | н/а | н/а | 2.46 | 2.86 | 2.38 | 2.98 | 5.24 | 2.24 | 1.92 | 2.38 |
| Ta | 0.11 | 0.16 | н/а | н/а | 0.15 | 0.18 | 0.14 | 0.17 | 0.33 | 0.15 | 0.13 | 0.17 |
| La | 3.28 | 5.99 | н/а | н/а | 4.54 | 5.14 | 4.39 | 5.54 | 8.65 | 5.02 | 4.32 | 5.22 |
| Ce | 7.23 | 14.3 | н/а | н/а | 10.2 | 11.9 | 9.58 | 12.3 | 19.7 | 10.9 | 11.2 | 11.7 |
| Pb | 9.72 | 2.21 | н/а | н/а | 419 | 217 | 408 | 239 | 148 | 84.2 | 523 | 178 |
| Pr | 0.96 | 1.95 | н/а | н/а | 1.43 | 1.66 | 1.32 | 1.70 | 2.67 | 1.53 | 1.32 | 1.63 |
| Nd | 4.54 | 8.94 | н/а | н/а | 6.77 | 8.09 | 6.36 | 8.11 | 12.80 | 7.31 | 6.14 | 7.82 |
| Sr | 122 | 606 | н/а | н/а | 243 | 263 | 216 | 236 | 212 | 259 | 247 | 216 |
| Sm | 1.32 | 2.25 | н/а | н/а | 1.88 | 2.28 | 1.82 | 2.23 | 3.54 | 2.13 | 1.64 | 2.23 |
| Zr | 32.3 | 44.1 | н/а | н/а | 47.1 | 54.5 | 43.0 | 61.0 | 93.8 | 51.4 | 50.1 | 63.8 |
| Hf | 0.87 | 1.16 | н/а | н/а | 1.26 | 1.57 | 1.21 | 1.51 | 2.58 | 1.42 | 1.40 | 1.75 |
| Eu | 0.49 | 0.84 | н/а | н/а | 0.72 | 0.88 | 0.76 | 0.83 | 1.26 | 0.86 | 0.60 | 0.82 |
| Ti | 3506 | 3967 | н/а | н/а | 4197 | 5265 | 4533 | 4959 | 8926 | 4217 | 4467 | 4018 |
| Gd | 1.62 | 2.57 | н/а | н/а | 2.31 | 2.85 | 2.28 | 2.72 | 4.30 | 2.53 | 2.06 | 2.73 |
| Tb | 0.25 | 0.41 | н/а | н/а | 0.40 | 0.50 | 0.38 | 0.49 | 0.73 | 0.43 | 0.34 | 0.46 |
| Dy | 1.66 | 2.73 | н/а | н/а | 2.48 | 3.26 | 2.48 | 3.05 | 4.71 | 2.80 | 2.23 | 3.04 |
| Ho | 0.36 | 0.55 | н/а | н/а | 0.52 | 0.70 | 0.54 | 0.64 | 1.00 | 0.59 | 0.48 | 0.63 |
| Y | 9.53 | 15.5 | н/а | н/а | 13.2 | 17.7 | 13.4 | 15.9 | 24.4 | 14.5 | 11.5 | 15.7 |
| Er | 1.13 | 1.59 | н/а | н/а | 1.49 | 2.02 | 1.50 | 1.80 | 2.75 | 1.65 | 1.31 | 1.82 |
| Yb | 1.02 | 1.50 | н/а | н/а | 1.53 | 2.07 | 1.53 | 1.84 | 2.68 | 1.67 | 1.40 | 1.76 |
| Tm | 0.16 | 0.21 | н/а | н/а | 0.21 | 0.28 | 0.21 | 0.25 | 0.39 | 0.24 | 0.19 | 0.25 |
| Lu | 0.17 | 0.23 | н/а | н/а | 0.23 | 0.32 | 0.22 | 0.27 | 0.42 | 0.25 | 0.21 | 0.26 |
| Ni | 1838 | 2994 | н/а | н/а | 789 | 114 | 143 | 550 | 89.5 | 277 | 709 | 1933 |
| Cu | 3269 | 4832 | н/а | н/а | 1963 | 316 | 399 | 1211 | 744 | 340 | 1690 | 3269 |
| Zn | 1184 | 65 | н/а | н/а | 519 | 198 | 347 | 908 | 234 | 142 | 624 | 405 |
| Co | 119 | 86 | н/а | н/а | 94.8 | 56.9 | 51.8 | 97.5 | 60.9 | 64.8 | 129 | 172 |
| V | 209 | 149 | н/а | н/а | 182 | 270 | 214 | 218 | 370 | 196 | 325 | 226 |
| Cr | н/а | н/а | 100 | 6900 | н/а | н/а | н/а | н/а | н/а | н/а | н/а | н/а |
| S | н/а | н/а | 8100 | 4400 | н/а | н/а | н/а | н/а | 1200 | н/а | н/а | н/а |

Примечания. 1) Породы, габбро-долериты: Гп – пикритовые, Гт – такситовые, Го- оливиновые, Гос – оливинсодержащие, Гк – контактовые; г-д – габбро-диориты; 2) н/а – элемент не анализировался. 63.6 * анализ выполнен XRF методом; 3) содержания оксидов даны в мас. %, элементов – в ppm.

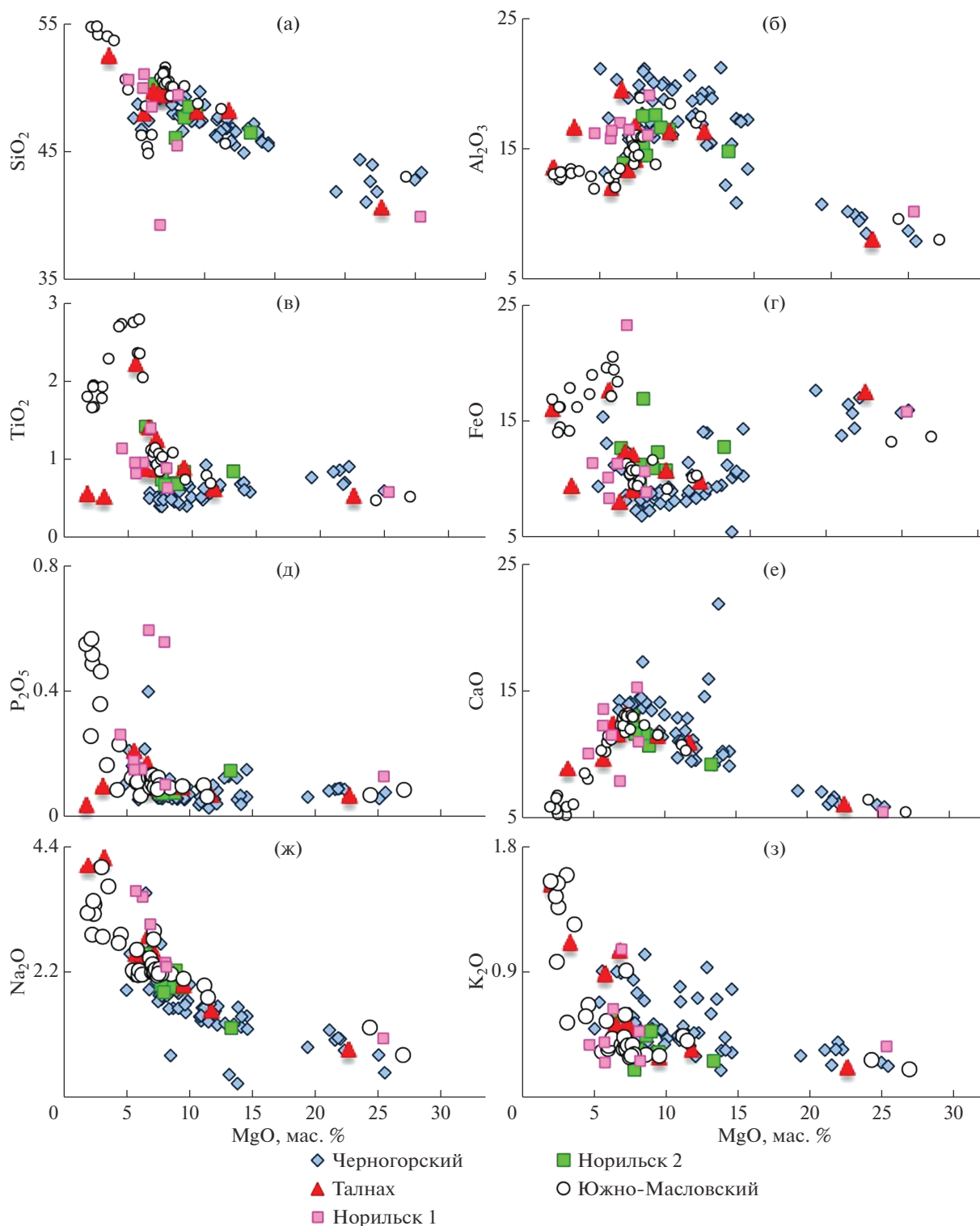


Рис. 8. Диаграммы MgO–SiO₂ (а), Al₂O₃ (б), TiO₂ (в), FeO (г), P₂O₅ (д), CaO (е), Na₂O (ж), K₂O (з) для интрузивов Норильского района, мас. %.

катной и сульфидной форме в породах. Наиболее высокие концентрации его установлены в оливинах (рис. 5, табл. 1), хотя в значительно меньшем количестве он присутствует и в пироксенах, и в хромшпинелидах. Главным носителем его в сульфидной

форме является пентландит. Медь практически вся сосредоточена в халькопирите. Рядовые содержания никеля в безоливиновых, оливинсодержащих и в оливиновых габбро-диоритах зависят от содержания оливина в породах и колеблются

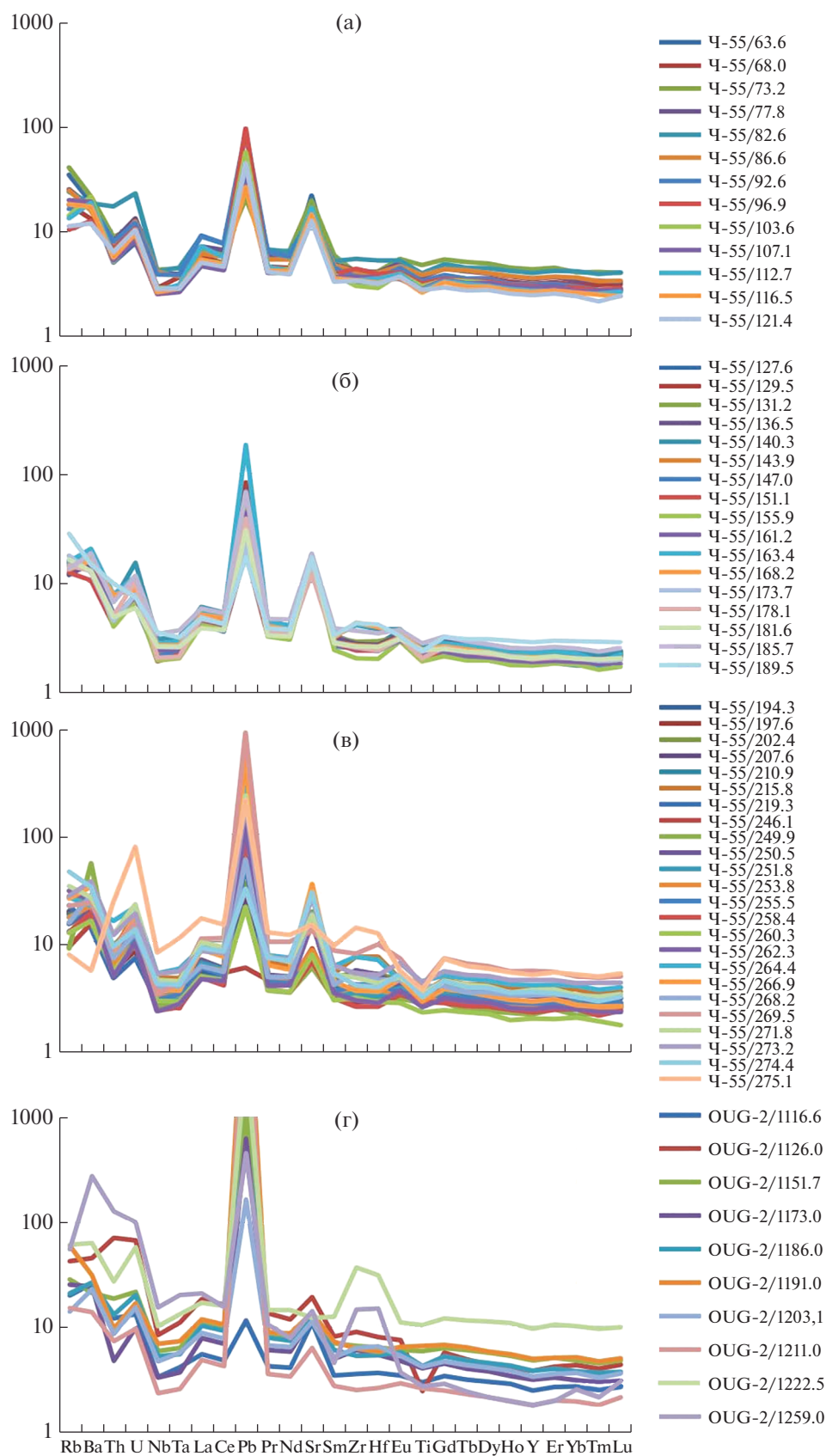


Рис. 9. Спайдер-диаграммы для пород Черногорского (а – верхняя часть, б – средняя часть, в – нижняя часть) и Талнахского (г) интрузивов.

Здесь и на рис. 10, 13 нормировано к примитивной мантии (Hofmann, 1988).

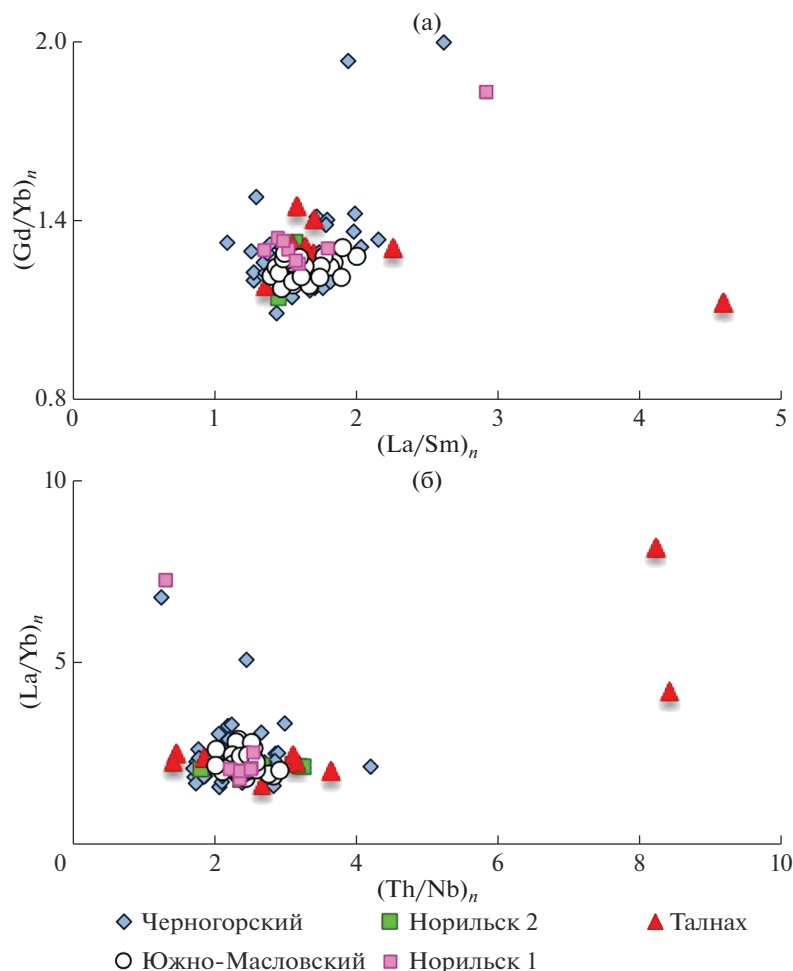


Рис. 10. Диаграммы $(La/Sm)_n$ (а) и $(Gd/Yb)_n$; (б) для интрузивов Норильского района.

ся от 100–110 до 340–360 ppm соответственно (табл. 3). Концентрации никеля резко возрастают в пикритовых габбро-долеритах, где появляется сульфидная вкрапленность; и колеблются в пределах 1000–3000 ppm. Также повышенные содержания этого металла характерны для такситовых и контактовых габбро-долеритов (табл. 3). В низезалегающих безоливиновых габбро-долеритах их концентрации не превышающие 0.1 мас. % Содержания меди в породах прямо пропорционально увеличиваются с повышением количества сульфидов. В безрудных породах они колеблются от 60 до 170 ppm, а в рудоносных горизонтах возрастают до 5000 ppm.

Отношение концентраций Ni/Cu при низких содержаниях металлов варьирует, а при высоких — практически постоянно (рис. 11а). Наблюдается отчетливая корреляция их содержаний между собой ($R^2 = 0.81$). В верхней части разреза Ni/Cu отношение колеблется около 1, в то время как в рудных горизонтах оно близко к 0.7, т.е. медь начинает доминировать над никелем, а в интервале 155–190 м никель резко преобладает: Ni/Cu отношение варьирует от 4 до 5. Это объясняется повышенным

содержанием оливина в породах и незначительным количеством в них сульфидов. Сопоставление этих данных с распределением этих металлов в Талнахском интрузиве (на примере скв. ОУГ-2) свидетельствует о значительной обогащенности последнего медью (рис. 11а) и о более тесной связи между этими металлами ($R^2 = 0.96$).

Концентрации еще одного важного металла — кобальта — варьируют от 36 до 174 ppm (рис. 11б) и в целом близки к его содержаниям в других массивах, за исключением Южно-Масловского. В последнем наблюдается корреляция этого металла с ванадием, содержания которого намного выше, чем в породах аналогичных массивов, поскольку они, как отмечалось выше, обогащены титаномагнетитом, содержащим кобальт.

СУЛЬФИДНЫЕ РУДЫ

Сульфидная вкрапленность отмечается практически во всех породах в очень ограниченном количестве (<0.3 об. %, содержания серы при этом составляет 0.07–0.09 мас. %). Но в нижней части массива содержание сульфидов увеличива-

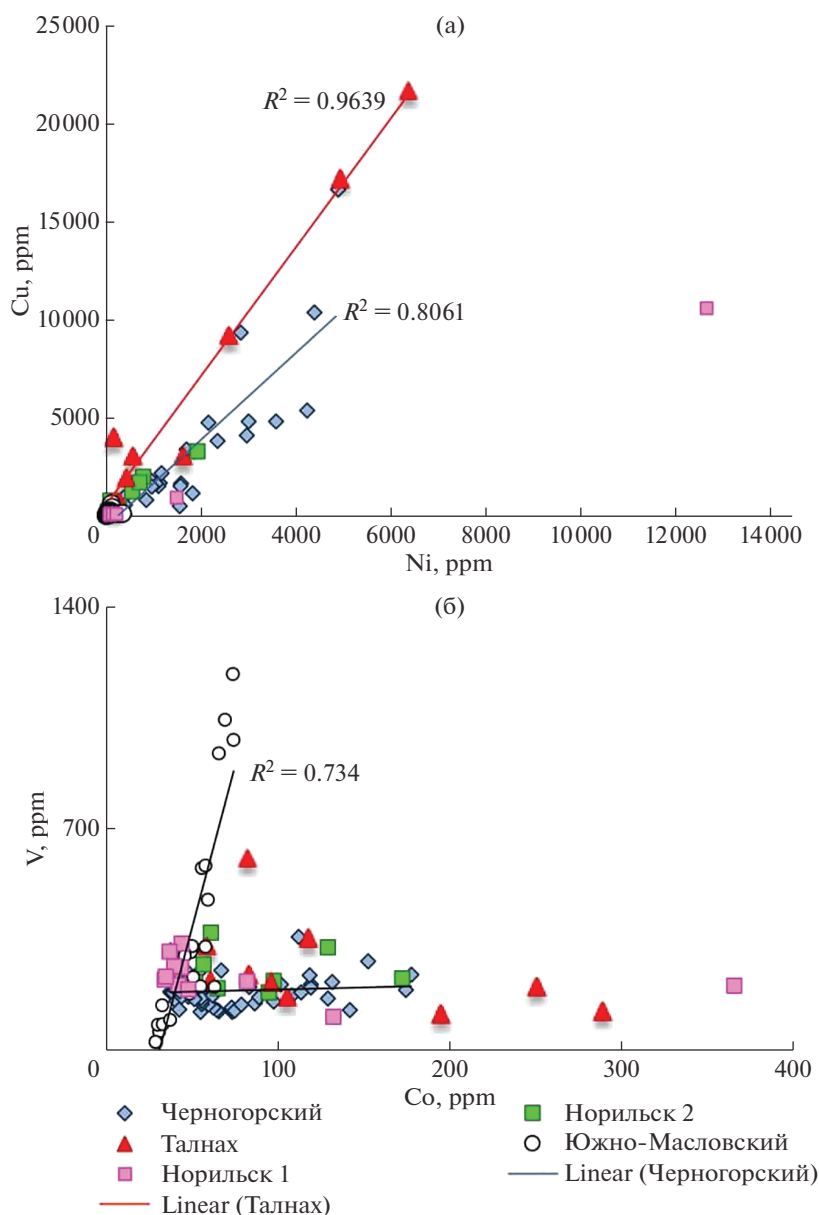


Рис. 11. Диаграммы Ni–Cu и Co–V для интрузивов Норильского района.

ется, образуя промышленные вкрапленные руды. Они приурочены к пикритовым, такситовым, контактовым габбро-долеритам и части пород, подстилающих Черногорский интрузив. Иногда сульфиды появляются и в маломощном горизонте оливин-биотитовых габбро-долеритов, лежащих непосредственно над пикритовыми габбро-долеритами. Мощность руд колеблется: она максимальна в северной части массива (до 100 м) и снижается до 10–15 м в его южной части. Преобладает тонкая дисперсная вкрапленность сульфидов в пикритовых габбро-долеритах, хотя иногда отмечаются и небольшие вкрапленники до 1–1.5 см в поперечнике. В такситовых разновидностях пород появляются более крупные (до 3–4 см) скоп-

ления сульфидов. Минеральный состав руд в пикритовых и такситовых габбро-долеритах близок, главными рудными минералами являются пирротин, халькопирит и пентландит. Среди второстепенных и редких минералов отмечены кубанит, вилларит, сфалерит, пирит, интерметаллиды платины и палладия. В области нижнего контакта интрузива с вмещающими породами (как в интрузивных, так и в осадочных породах) были зафиксированы тонкие прожилки сульфидов (2–3 см), обогащенные халькопиритом.

В среднем содержания металлов во вкрапленных рудах составляют: Ni – 0.2–0.3 мас. %, Cu – 0.3–0.4 мас. %, PGE-5–6 ppm. Пластообразное рудное тело полого падает на запад под углом

Таблица 4. Химический состав вкрапленных руд Черногорского массива, ppm

| Компонент | Номер по порядку | | | | | | | | | | |
|-----------|------------------|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | |
| | Обр. | Скважина Ч-55 | | | | | | | | | |
| | | Глубина, м | | | | | | | | | |
| Ч-1 | 249.9 | 251.8 | 253.8 | 255.5 | 255.5 | 258.4 | 260.3 | 266.9 | 274.4 | | |
| Ni | 1570 | 2010 | 1050 | 4150 | 2930 | 2930 | 4950 | 1740 | 1810 | 2700 | |
| Cu | 956 | 5550 | 1550 | 4970 | 3830 | 3790 | 5900 | 1670 | 3490 | 8230 | |
| Co | 131 | 134 | 113 | 191 | 156 | 161 | 210 | 147 | 107 | 96.6 | |
| Pt | 1.25 | 0.83 | 1.85 | 0.32 | 1.28 | 1.13 | 2.85 | 0.81 | 0.75 | 2.77 | |
| Pd | 5.11 | 3.87 | 6.37 | 5.43 | 8.67 | 8.3 | 8.95 | 1.48 | 3.32 | 8.59 | |
| Rh | 0.22 | 0.10 | 0.20 | 0.15 | 0.10 | 0.09 | 0.32 | 0.27 | 0.18 | 0.33 | |
| Ag | 0.18 | 3.94 | 1.49 | 1.89 | 2.30 | 2.10 | 2.29 | 0.87 | 1.64 | 1.07 | |
| Au | 0.16 | 0.18 | 0.43 | 0.34 | 0.20 | 0.28 | 0.56 | 0.15 | 0.26 | 0.11 | |
| S | 3000 | 5800 | 2800 | 13600 | 8700 | 8900 | 20700 | 5500 | 9100 | 15000 | |
| As | 25.1 | 23 | 4.5 | 26.9 | 22.3 | 16 | 18.9 | 10.1 | 6.1 | 22.5 | |
| Te | 81 | 76 | 14 | 142 | 62 | 70 | 687 | 94 | 153 | 438 | |
| Se | 211 | 143 | 85 | 464 | 80 | <30 | 246 | 42 | 129 | 435 | |
| Cr | 5560 | 6410 | 5310 | 3750 | 5660 | 5440 | 4970 | 769 | 208 | 112 | |

около 10° и погружается до глубины 600 м. В верхней части интрузива концентрации меди и никеля составляют всего лишь сотые доли процентов. Сульфидные прожилки и агрегаты, сложенные халькопиритом, обогащены платиновыми металлами и медью до 4–6 мас. %.

В проанализированных нами вкрапленных рудах по скважине Ч-55 (табл. 4) концентрации цветных металлов близки к средним по рудному горизонту. Содержания меди колеблются от 0.1 до 0.8 мас. %, никеля – от 0.2 до 0.5 мас. %, при этом отношение Cu/Ni большое 1. Минимальное значение 0.6 характерно только для пикритовых габбро-долеритов, отобранных в северной части массива и характеризующихся максимальным содержанием оливина, за счет чего увеличивается содержание никеля в образце Ч-1. В образцах, отобранных из скв. Ч-55, Cu/Ni отношение в среднем составляет 1.6, максимальное его значение равно 3 (обр. Ч-55/274.4). Содержания кобальта меняются незначительно – от 97 до 210 ppm. Концентрации платины в среднем составляют 1 ppm, а палладия – около 5 ppm; причем отношение Pd/Pt варьирует от 3.5 до 16. Для вкрапленных руд Черногорского массива характерны повышенные содержания серебра, которые меняются от 0.18 до 4 ppm, причем повышенные его содержания типичны для обогащенных медью образцов. Концентрации золота низкие и составляют десятки доли граммов на тонну (табл. 4). Для руд типичны примеси селена, теллура и мышьяка (табл. 4). Концентрации олова оказались ниже предела его обнаружения в рудах. Присутствие хрома обусловлено присутствием хромшпинелидов в породах массива.

Сопоставление трендов накопления платиновых металлов (Pt и Pd) во вкрапленных рудах Чер-

ногорского интрузива с другими массивами свидетельствует о более быстром их накоплении при повышении содержаний цветных металлов (Cu и Ni), чем в рудах Хараелахского интрузива (рис. 12), проанализированных по ряду скважин (ТГ-21, КЗ-868 и КЗ-1879). Такое поведение платиновых металлов очень близко к поведению во вкрапленных рудах Норильска 1, но отличается от него еще более высокими содержаниями PGE относительно Ni + Cu (рис. 12).

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Вопрос о составе исходной магмы для рудоносных интрузивов Сибирской трапповой провинции рассматривается на протяжении нескольких десятилетий. Одним из первых состав расплава оценил М.Н. Годлевский (Годлевский, 1959) на основании подсчета средневзвешенного состава интрузива Норильск 1, базируясь на данных исследования многочисленных скважин (54, табл. 5). Он оказался более магнезиальным (11 мас. % MgO), чем состав типичных платформенных базальтов, или “среднего траппа” (Кутолин, 1972), характеризующихся содержаниями 6–7 мас. % MgO. На протяжении многих лет такой состав расплава рассматривался в качестве исходного для всего разнообразия пород трапповой провинции нормальной щелочности (Золотухин и др., 1978). Ряд геологов объединял рудоносные интрузивы с лавами в вулcano-плутонические комплексы (Иванов и др., 1974), в частности их коррелировали с породами гудчихинской свиты на основании повышенной магнезиальности последней (Дюжиков и др., 1988; Геологическая карта..., 1994). Геохимические исследования с помощью современных методов этих интрузивных

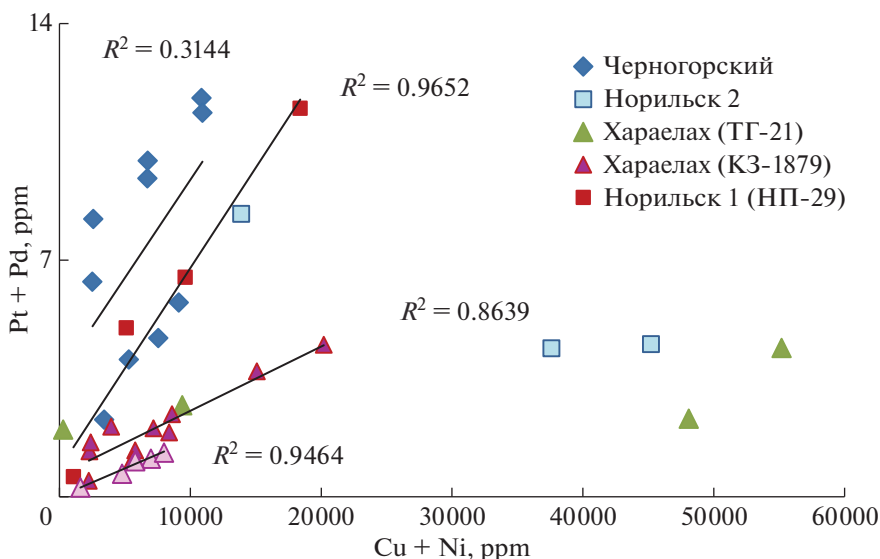


Рис. 12. Диаграмма Ni + Cu – PGE для массивов Норильского района. Данные из работ, интрузивы: Черногорский – табл. 4; Норильск 1 – скв. НП-29 (Czamanske et al., 1994); Хараелахский – скв. 868 (Zientek et al., 1994), Хараелахский – скв. КЗ-1879 (Likhachev, 1994); Хараелахский – скв. ТГ-21 (Krivolutskaya et al., 2019).

и эффузивных пород показали отсутствие связи между ними (Lightfoot et al., 1990; Соболев и др., 2009). По составу рудоносные интрузивы ближе всего к породам моронговской и мокулаевской свит, с которыми они рассматриваются в виде единой магматической системы (Радько, 1991, 2017). Однако, как и было предположено М.Н. Годлевским, рудоносные интрузивы образовались в результате самостоятельного магматического импульса и с вулканитами не связаны непосредственно (Krivolutskaya et al., 2019).

Присутствие высокомагнезиальных горизонтов пород было отмечено для всех сульфидоносных интрузивов, на основании чего они выделены в самостоятельный норильский комплекс (Геологическая карта..., 1994). Массивы этого комплекса, в свою очередь, были подразделены на типы – лейкогаббровый круглогорский, среднемагнезиальный дифференцированный норильский и менее дифференцированный зубовский, а также высокомагнезиальный нижнеталнахский (14–16 мас. % MgO). Как было показано ранее (Криволицкая, 2014) последний тип должен быть выделен в самостоятельный комплекс, т.к. его геохимические особенности резко отличаются от остальных пород норильского комплекса.

Норильский тип интрузивов характеризуется присутствием промышленно значимых скоплений сульфидов. Его особенностями являются повышенная магнезиальность, низкое содержание титана и повышенное – хрома. Объединенные в этот комплекс массивы образованы из однотипных магм (Изотопная геология..., 2017) и характеризуются близкими условиями кристаллизации. Однако очень похожие по составу массивы характеризуются присутствием очень разных по мас-

штабам месторождений – от уникальных Октябрьского, Талнахского – до крупных Норильск 1, Масловское и более мелких – Черногорского, Норильска 2, Имангдинского, а также включают сладорудоносные и безрудные массивы (Фокинская, Микчангдинская площади) Это позволяет рассмотреть возможные корреляции между составом пород и руд, либо убедиться в их отсутствии.

Для изученных в этой работе массивов по опорным скважинам были рассчитаны средневзвешенные составы интрузивов (табл. 5) и сопоставлены с аналогичными расчетами для Талнахского массива и Норильска 1, полученными ранее. Как отмечалось выше, разрез по скважине Ч-55 является представительным для Черногорского интрузива, в котором отсутствуют существенные вариации мощностей основных горизонтов пород. Поэтому полученные средневзвешенные содержания оксидов для этого массива, выполненные на основании результатов анализов по скв. Ч-55, можно считать отвечающими его составу. Как видно из табл. 5, состав Черногорского интрузива типичен для интрузивов норильского типа: он характеризуется повышенной магнезиальностью (11.7 мас. % MgO), пониженным содержанием TiO_2 (0.61 мас. %) и повышенными содержаниями хрома и хорошо сопоставляется с составом интрузива Норильск 1, полученный М.Н. Годлевским (табл. 5, № 9), а также близок к средневзвешенному составу Талнахского интрузива, рассчитанному М.Д. Днепровской по 29 скважинам (табл. 5, № 8). Сравнение же состава Черногорского интрузива с отдельными средневзвешенными значениями оксидов, полученными по выборочным скважинами для этих массивов (ДМ-27 для Норильска 1 и ОУГ-2 для Талнаха, ТГ-21 для Хараелахского массива) выяв-

Таблица 5. Средневзвешенный состав интрузивов Норильского района, мас. %

| Компонент | Номер по порядку | | | | | | | | |
|---|-------------------|------------------|------------------|-----------------------|-------------------|---------------------------|------------------------|----------------------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| | Скважина/Массив | | | | | | | | |
| Черногорский Ч-55 | Черногорский (17) | Норильск 2 МП-18 | Норильск 1 ДМ-27 | Южно-Масловский ОМ-24 | Харелахский ТГ-21 | Талнах ОУГ-2 | Талнах (29 скв.) | Норильск 1 (54 скв.) | |
| SiO ₂ | 47.2 | 46.23 | 48.2 | 46.7 | 49.7 | 47.41 | 46.57 | 48.3 | 46.1 |
| TiO ₂ | 0.61 | 0.90 | 0.97 | 0.91 | 1.43 | 0.85 | 1.05 | 0.85 | 0.74 |
| Al ₂ O ₃ | 16.7 | 16.82 | 15.5 | 15.6 | 14.1 | 15.50 | 13.32 | 15.33 | 15.5 |
| FeO | 9.94 | 10.72 | 11.6 | 11.1 | 13.3 | 10.65 | 8.50 | 12.3 | 13.4 |
| MnO | 0.16 | 0.15 | 0.28 | 0.15 | 0.22 | 0.16 | 0.18 | 0.19 | 0.15 |
| MgO | 11.7 | 9.19 | 8.51 | 9.43 | 8.06 | 7.62 | 8.06 | 10.0 | 11.3 |
| CaO | 11.4 | 10.67 | 11.4 | 10.7 | 10.1 | 9.28 | 8.16 | 10.4 | 10.3 |
| Na ₂ O | 1.53 | 1.91 | 2.06 | 3.16 | 2.33 | 1.69 | 1.86 | 1.86 | 1.32 |
| K ₂ O | 0.46 | 0.67 | 0.38 | 0.46 | 0.53 | 0.74 | 0.47 | 0.58 | 0.69 |
| P ₂ O ₅ | 0.07 | 0.12 | 0.11 | 0.26 | 0.16 | 0.24 | 0.08 | 0.20 | 0.25 |
| Cr ₂ O ₃ | 0.18 | | | 0.19 | | 0.12 | | 0.10 | |
| Прогнозные ресурсы (Cu+Ni, млн т; – PGE, тыс. т | 0.82–0.5 | – | – | – | – | Харелах в целом* 113–17.5 | Талнах в целом* 40–8.3 | – | – |

Примечание. № 1–7 по данным: 1, 3 – табл. 3; 2 – Коровяков и др., 1963; 4 – Krivolutskaia et al., 2020; 5 – Krivolutskaia et al., 2012; 6, 7 – Krivolutskaia, 2016; 8 – Днепровская и др., 1987; 9 – Годлевский, 1959. * – данные из работы (Радько, 2017), – нет данных.

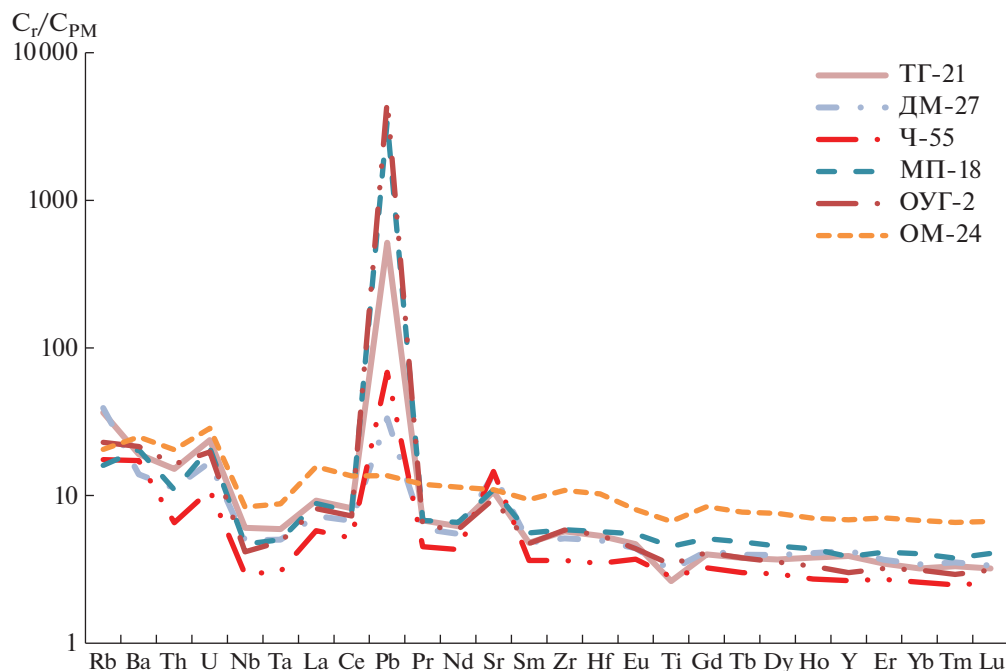


Рис. 13. Спектры распределения редких элементов для средневзвешенных составов интрузивов Норильского района. Скважина, массив, данные из работ: скв. ТГ-21, Хараелахский, ОУГ-2, Талнахский МП-18, и Норильск 2; (Krivolutskaya, 2016); ОМ-24, Южно-Масловский (Krivolutskaya et al., 2012); Ч-55, Черногорский, табл.1; ДМ-27, Норильск 1 (Krivolutskaya et al., 2020).

ляет их отличия, в первую очередь, в магнезиальности пород. Это обусловлено существенными вариациями мощностей пикритовых габбро-долеритов в указанных массивах (Туровцев, 2002). Также он несколько отличается от состава, полученного простым суммированием анализов для этого интрузива, не учитывающего мощность горизонтов (табл. 5, № 2). Полученные результаты еще раз подтверждают, что составы интрузивов могут быть оценены для массивов сложного строения только на основании использования данных по многочисленным разрезам. Существенно отличается от изученных массивов Южно-Масловский интрузив (табл. 5, № 5) за счет повышенных содержаний титана (1.43 мас. %). Это еще раз подтверждает его отличие от Северо-Масловского интрузива и Норильска 1 (Krivolutskaya et al., 2012), продолжением которого он считается.

Более достоверную информацию о составе расплава дают содержания редких элементов. Особенно показательными являются отношения ряда элементов – La/Sm, Gd/Yb, Th/U и других, что продемонстрировано выше (рис. 10). Сравнение же спектров распределения редких элементов по средневзвешенным их содержаниям в породах изученных нами скважин демонстрирует идентичность их топологии (рис. 13), варьируют лишь суммарные содержания элементов, что обусловлено различной разницей средневзвешенной магнезиальностью пород. Самыми низкими концентрациями характеризуется Черногорский массив с повышенным содержанием MgO, а самыми высокими –

Южно-Масловский; спектры остальных интрузивов близки между собой. К сожалению, для наиболее представительных подсчетов (табл. 5, № 7, 8) отсутствуют данные по редким элементам.

Для характеристики рудоносности массивов норильского комплекса нами были подсчитаны приблизительные запасы металлов для рудного тела пластовой формы мощностью 12 м при содержаниях Ni + Cu = 0.5 мас. % и Pt + Pd = 5 ppm. Они сопоставлены с ресурсами, приведенными для Талнахского и Хараелахского интрузивов (Радько, 2017). Как видно из табл. 5, эти значения отличаются очень существенно. Для Черногорского интрузива суммарные ресурсы цветных металлов (Cu + Ni) составляют 800 тыс. т, в то время как для Хараелахского массива и Талнахского они равны 113 и 40 млн т, т.е. в соответственно в 140 и 50 раз больше. Несколько другая картина наблюдается для платиновых металлов, которых в Черногорском массиве 500 т, а в Хараелахском и Талнахском массивах 17.5 и 8.3 тыс. т, т.е. в 35 и 16.5 раз больше. Это еще раз подтверждает обогащенность руд Черногорского интрузива платиновыми металлами по сравнению с медью и никелем.

Сопоставление составов интрузивов с их рудоносностью показывает отсутствие каких-либо корреляций между силикатной составляющей и объемом и составом сульфидного расплава. Таким образом, поиски перспективных объектов в районе не могут основываться на данных о составе пород интрузивов.

ВЫВОДЫ

1. Черногорский интрузив характеризуется повышенными содержаниями (мас. %) $MgO = 11.7$ и $Cr_2O_3 = 0.12$ и пониженными — $TiO_2 = 0.62$, что типично для массивов норильского типа норильского комплекса. Топология спектров распределения редких элементов в слагающих его породах идентична таковой других рудоносных массивов, включая интрузивы с уникальными месторождениями — Хараелахского (Октябрьское месторождение) и Талнахского массивов (Талнахское месторождение).

2. Отношение Cu/Ni в рудах Черногорского массива немного превышает 1, а сумма $Pt + Pd$ в среднем равна 5–6 ppm. Однако прогнозные ресурсы руд в Черногорском интрузиве (0.8 млн т $Cu + Ni$, 0.5 тыс. т $Pt + Pd$) в 140 раз меньше, чем в Хараелахском интрузиве (113 млн т $Cu + Ni$, 17.5 тыс. т $Pt + Pd$), и 50 раз меньше, чем в Талнахском (40 млн т $Cu + Ni$, 8.3 тыс. т $Pt + Pd$).

3. Несмотря на близкий состав пород массивов норильского комплекса, состав руд и их количество сильно варьируют. Руды Черногорского интрузива обогащены платиновыми металлами относительно цветных металлов по сравнению с рудами других интрузивов, — главным образом, Талнахского и Хараелахского, и в меньшей степени — Норильска I. Таким образом, рудоносность массивов норильского комплекса существенно варьирует не связана напрямую с силикатным составом вмещающих их пород.

Авторы признательны геологам ООО “Норильскгеология” за содействие в проведении полевых работ, особенно И.А. Матвееву, В.И. Тетерюку, И.Н. Тушенцовой. Авторы выражают благодарность академику А.В. Соболеву за предоставленную возможность проведения аналитических работ в лабораториях Института Химии им. Макса Планка, Германия. В.И. Таскаевым (ИГЕМ РАН) выполнен анализ плагиоклазов на микрозонде и фотографии пород в обратно рассеянных электронах, за что авторы ему признательны.

Исследование силикатного состава пород выполнено при финансовой поддержке проекта Российской Федерации в лице Минобрнауки России № 075-15-2020-802, изучение руд — при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (проект № 18-05-70094) и Российского научного фонда (проект 19-17-00121).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Виленский А.М., Кавардин Г.И., Кравцова Л.И., Старицына Г.Н. (1963) *Значение петрохимических особенностей дифференцированных трапповых интрузивов для оценки перспектив их рудоносности*. В кн.: *Геология северо-запада Сибирской платформы*. М.: Госгеолиздат, 112–126.

Виленский А.М., Кавардин Г.И., Кравцова Л.И., Старицына Г.Н. (1964) *Петрология трапповых интрузивов правобережья нижнего течения р. Енисей*. М.: Наука, 237 с.

Геологическая карта Норильского рудного района масштаба 1 : 200000. (1994). Объяснительная записка. М., АО “Геоинформмарк”, Под ред. Б.М. Струнина, 118 с.

Государственная геологическая карта Российской Федерации (2000) Масштаб 1 : 1000000 (новая версия). Лист R-(45)-47 — Норильск. Объяснительная записка. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 479 с.

Годлевский М.Н. (1959) *Траппы и рудоносные интрузии Норильского района*. М.: Госгеолтехиздат. 68 с.

Днепровская М.Б., Френкель М.Я., Ярошевский А.А. 1987. *Количественная модель формирования расслоенности Талнахского интрузива. Построение моделей рудообразующих систем*. Новосибирск: Наука, 96–106.

Дюжиков О.А., Дистлер В.В., Струнин Б.М. и др. 1988. *Геология и рудоносность Норильского района*. М.: Недра, 279 с.

Золотухин В.В. (1971) Трапповый магматизм и условия формирования рудоносных дифференцированных интрузивов на Сибирской платформе. В: *Траппы Сибирской платформы и их металлогения*. Иркутск, 53–59.

Золотухин В.В., Васильев Ю.Р., Дюжиков О.А. (1978) *Многообразие траппов и исходные магмы (на примере Сибирской платформы)*. Новосибирск: Наука, 248 с.

Золотухин В.В., Виленский А.М., Васильев Ю.Р. Межвилк А.А., Рябов В.В., Щербакова З.В. (1984) *Магнезитовые базиты запада Сибирской платформы и вопросы никеленосности*. Новосибирск: Наука, 208 с.

Иванов М.К., Иванова Т.К., Ленкин Е.Н., Митрошин М.Н., Нагайцева Н.Н. (1974) Палеовулканизм и оруденение северо-запада Сибирской платформы. В кн.: *Магматические и метаморфические комплексы Восточной Сибири*. Иркутск, 84–85.

Иванов М.К., Иванова Т.К., Тарасов А.В., Шатков В.А. (1971) Особенности петрологии и оруденения дифференцированных интрузивов Норильского рудного узла (месторождения Норильск I, Норильск II, горы Черной). В кн.: *Петрология и рудоносность талнахских и норильских дифференцированных интрузивов*. Ленинград: изд-во НИИГА, 197–305.

Изотопная геология норильских месторождений (2017) Ред. Петров О.А., Санкт-Петербург, Изд-во ВСЕГЕИ, 348 с.

Коровяков И.А., Нелюбин А.Е., Райкова З.А., Хортова Л.К. (1963) Происхождение норильских трапповых интрузивов, несущих сульфидные медно-никелевые руды. Труды ВНИИМС, новая серия, 9, 102 с.

Криволицкая Н.А. (2014) *Эволюция траппового магматизма и платино-медно-никелевое рудообразование в Норильском районе*. М.: МГК, 321 с.

Криволицкая Н.А., Арискин А.А., Служеникин С.Ф., Туровцев Д.М. (2001) Геохимическая термометрия пород Талнахского интрузива: оценка состава расплава и степени раскристаллизованности исходной магмы *Петрология*. 9(5), 451–479.

Криволицкая Н.А., Рудакова А.В. (2009) Строение и геохимические особенности пород трапповой формации Норильской мульды (СЗ Сибирской платформы). *Геохимия*. 7, 675–698.

Krivolutskaya N.A., Rudakova A.V. (2009) Structure and Geochemical characteristics of trap rocks from the Norilsk trough, Northwestern Siberian craton. *Geochim. Int.* 47(7), 675–698.

Кутолин В.А. (1972). *Проблемы петрохимии и петрологии базальтов*. М.: Наука, 216 с.

Лихачев А.П. (2006) *Платино-медно-никелевые и платиновые месторождения*. М.: Эслан. 496 с.

- Лихачев А.П. (2019) Возможность самообогащения рудным веществом и тяжелым изотопом серы (^{34}S), мантийных магм, формирующих Cu-Ni месторождения и перспективное место для локализации руд в Норильском районе. *Отечественная геология*. (3), 1-18.
- Малич К.Н., Баданина И.Ю., Туганова Е.В. (2018) *Рудоносные ультрамафит-мафитовые интрузивы Полярной Сибири*. Екатеринбург, Институт геохимии им. акад. А.Н. Заварицкого, 287 с.
- Радько В.А. (1991) Модель динамической дифференциации интрузивных траппов северо-запада Сибирской платформы. *Геология и геофизика*. (11), 19-27.
- Радько В.А. (2017) *Фации интрузивного и эффузивного магматизма Норильского района*. Санкт-Петербург, Изд-во ВСЕГЕИ, 226 с.
- Рябов В.В. (1992) *Оливины норильских интрузий как показатели петрогенезиса и рудообразования*. Новосибирск: Наука, 102 с.
- Рябов В.В., Цимбалист В.Г., Якоби Н.Я. (1982) О концентрации хрома и платиноидов в кровле расслоенных интрузий норильского типа. *ДАН СССР*, **266**(2), 466-470.
- Служеникин С.Ф., Дистлер В.В., Дюжиков О.А., Кравцов В.Ф., Кунилов В.Е., Лапутина И.П. (1994) Малосульфидная платиновая минерализация в норильских интрузиях. *Геология рудных месторождений*, **36**(3), 195-217.
- Соболев А.В., Криволицкая Н.А., Кузьмин Д.В. (2009). Петрология родоначальных расплавов и мантийных источников магм Сибирской трапповой провинции. *Петрология*. **17**(3), 276-310.
- Туровцев Д.М. (2002). *Контактный метаморфизм норильских интрузий*. М.: Научный мир. 318 с.
- Урванцев Н.Н. (1973) Северо-Сибирская никеленосная область. В кн.: *Северо-Сибирский никеленосный регион и его промышленные перспективы*. Ленинград: изд-во НИИГА, 5-15.
- Czamanske G.K., Wooden J.L., Zientek M.L., Fedorenko V.A., Zen'ko T.E., Kent J., King B.-S.W., Knight R.J., Siems D.F. (1994) Chemical and isotopic constraints on the petrogenesis of the Noril'sk-Talnakh ore-forming system. *Proceedings of the Sudbury-Noril'sk Symposium*. Ontario: Geological Survey, **5**, 313-341.
- Distler V.V. (1994) Platinum mineralization of the Noril'sk deposits. *Proceedings of the Sudbury-Noril'sk Symposium*. Ontario: Geological Survey, **5**, 243-262.
- Jarosewich, E.J., Nelen, J.A., Norberg, J.A. (1980) Reference samples for electron microprobe analyses. *Geostandards Newsletter, J. Geostandards Geoanalysis*. **4**, 43-47.
- Jochum K.P., Dingwell D.B., Rochol A., Stoll B., Hofmann A.W., Becker S., Besmehn A., Bessette D., Dietze H.-J., Dulski P., Erzinger J., Hellebrand E., Hoppe P., Horn I., Janssens K., Jenner G.A., Klein M., McDonough W.F., Maetz M., Mezger K., Münker C., Nikogolian, I.K., Pickhardt C., Raczek I., Rhede D., Seufert H.M., Simakin S.G., Sobolev A.V., Spettle B., Straub S., Vincze L., Wallianos A., Weckwerth G., Weyer S., Wolf D., Zimmer M. (2000) The Preparation and Preliminary Characterisation of Eight Geological MPI-DING Reference Glasses for In-Situ Microanalysis. *Geostandards Newsletters – J. geostandards and geoanalysis*. **24**, 87-133.
- Jochum K.P., Weis U., Stoll B., Kuzmin D., Yang Q., Raczek I., Jacob D.E., Stracke A., Birbaum K., Frick D.A., Günther D., Enzweiler J. (2011) Determination of Reference Values for NIST SRM 610–617 Glasses Following ISO Guidelines. *Geostandards Geoanalytical Research*. **35**(4), 397-429.
- Jochum K.P., Stoll B., Herwig K., Willbold M. (2007) Validation of LA-ICP-MS trace element analysis of geological glasses using a new solid-state 193 nm Nd: YAG laser and matrix-matched calibration. *J. Anal. At. Spectrom.* **22**, 112-121.
- Hofmann A.W. (1988) Chemical differentiation of the Earth: the relationship between mantle, continental crust and oceanic crust. *Earth Planet. Sci. Lett.* **90**, 297-314.
- Krivolutskaya N.A. *Siberian traps and Pt-Cu-Ni Deposits in the Noril'sk Area* (2016). Springer, Heidelberg, New York, Dordrecht. London, 364 p.
- Krivolutskaya N.A., Sobolev A.V., Snisar S.G., Gongalskiy B.I. et al. (2012) Mineralogy, geochemistry and stratigraphy of the Maslovsky Pt–Cu–Ni sulfide deposit, Noril'sk Region, Russia. *Mineralium Deposita*. **47**, 69–88.
- Krivolutskaya N., Gongalskiy B., Kedrovskaya T., Kubrakov I., Tyutyunnik O., Chikatueva V., Bychkova Ya., Kovalchuk E., Yakushev A., Kononkova N. (2019) Geology of the Western Flanks of the Oktyabr'skoe Deposit, Noril'sk District, Russia: Evidence of a Closed Magmatic System. *Mineralium Deposita*. **54**(4), 611-630.
- Krivolutskaya N., Belyatsky B., Gongalskiy B., Dolgal A., Lapkovskiy A., Bayanova T. (2020) Petrographical and Geochemical Characteristics of Magmatic Rocks in the Northwestern Siberian Traps Province, Kulyumber River Valley. Part I: Rocks of the Kulyumber Sites. *Minerals*. **10**(415), 1-39.
- Lightfoot P.C., Naldrett A.J., Gorbachev N.S. (1990). Geochemistry of the Siberian trap of the Noril'sk area, USSR, with application for the relative contributions of crust and mantle to flood basalt magmatism. *Contrib. Mineral. Petrol.* **104**, 631-644.
- Likhachev A.P. (1994) Ore-bearing intrusions of the Noril'sk region. *Proceedings of the Sudbury-Noril'sk Symposium*. Ontario: Geological Survey, **5**, 185-201.
- Sobolev A.V., Hofmann A.W., Kuzmin D.V., Yaxley G.M., Anderson A.T., Arndt N.T., Chung S.-L., Garcia M.O., Gurenko A.A., Danyushevsky L.V., Elliott T., Frey F.A., Kamenetsky V.S., Kerr A.C., Krivolutskaya N.A., Matvienkov V.V., Nikogolian I.K., Rocholl A., Suschevskaya N.M., Teklay M. (2007) Estimating the amount of recycled crust in sources of mantle-derived melts. *Science*. **316**, 412-417.
- Stoll B., Jochum K.P., Herwig K., Amini M., Flanz M., Kreuzburg B., Kuzmin D., Willbold M., Enzweiler J. (2008) An automated Iridium-strip-heater for LA-ICP-MS bulk analysis of geological samples. *Geostandards and Geoanalytical Research*. **32**, 5-26.
- Tolstykh N., Zhitova L., Shapovalova M., Chayka I. (2019) Evolution of the ore-forming system in low-sulfide horizon of the Noril'sk 1 intrusion, Russia. *Mineralogical Magazine*. **115**(6), 1-22.
- Zientek M.L., Likhachev A.P., Kunilov V.E., Barnes S.-J., Meier A.I., Carlson R.R., Brigg P.H., Fries T.L., Adrian B.M. (1994) Cumulus processes and the composition of magmatic ore deposits: example from the Talnakh district, Russia. *Proceedings of the Sudbury-Noril'sk Symposium*. Ontario: Geological Survey, **5**, 373-392.