

## РЕДКИЕ И РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ В Cu-Ni РУДАХ НОРИЛЬСКОГО РАЙОНА

А. В. Григорьева, А. В. Волков, К. Ю. Мурашов

ФГБУН Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии  
и геохимии РАН (Москва, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 27 октября 2020 г.

Месторождения Норильского района приурочены к краевой северо-западной части Сибирской платформы и связаны с проявлением раннемезозойского траппового вулканизма. Сульфидное оруденение концентрируется в интрузивной фации вулкано-интрузивного комплекса. По текстурным особенностям выделены четыре основных типа Cu-Ni руд: массивные, прожилково-вкрапленные, брекчиевидные и вкрапленные, которые существенно различаются по химическому составу и содержанию пороодо- и рудообразующих компонентов. Коэффициенты обогащения рудных микроэлементов в октябрьской и талнахской прожилково-вкрапленной руде достигают в основном сотен (S, Pt, Au, Se, Te, Pb, As, Sn, Mo) и тысяч (Ni, Cu, Ag, Pd) раз. Выявлена довольно высокая обогащенность всех типов руд Bi, Re и Cd, которые потенциально промышленно значимы как высокотехнологичные металлы и могут быть перспективны для попутной добычи. Концентрация редких земель в основных типах руд за исключением массивных превышает уровень стандарта хондрита, фракционирование РЗЭ слабое. Суммарные содержания легких РЗЭ выше, чем тяжелых. Схожесть геометрии спектров РЗЭ массивных и прожилково-вкрапленных, брекчиевидных, вкрапленных типов руд, содержащих значительную примесь вмещающих пород, указывает на унаследованность состава РЗЭ в рудах от вмещающих пород.

**Ключевые слова:** Норильский район, медно-никелевые месторождения, геохимия руд, микроэлементы, редкие земли.

### Введение

Норильский район, один из крупнейших промышленных регионов России, расположен в Арктической зоне. Здесь сосредоточено 71,1% запасов никеля России, более 33,9% запасов меди и 93% платиноидов [1]. Норильские месторождения сульфидных Cu-Ni руд интенсивно разрабатываются Заполярным филиалом ПАО ГМК «Норникель», который производит Ni, Cu, Co, Pd, Pt, Ru, Rh, Os, Ir, Au, Ag, Te, Se и серную кислоту<sup>1</sup>. По оценкам компании «Schodde at Minex Consulting», с момента начала эксплуатации в 1940 г. на месторождении было добыто в общей сложности 8,3 млн т Ni, 16,3 млн т Cu, более 5500 т платиноидов и около 100 т Au из 691 млн т руды [2]. В 2019 г. «Норникель», судя по опубликованному отчету, заработал более 13,6 млрд долл.<sup>2</sup>

Месторождения Норильского района приурочены к краевой северо-западной части Сибирской плат-

формы и связаны с проявлением траппового вулканизма в раннемезозойское время (около 250 млн л). Выявлено восемь Cu-Ni месторождений, локализованных в трех рудных узлах: Октябрьское и Талнахское месторождения Талнахского рудного узла; месторождения Норильск I, Черногорское, Норильск II, Масловское, Зуб-Маркшейдерское в Норильском рудном узле и Имангдинское — Имангдинский рудный узел. Руды наиболее значимых по запасам Cu, Ni и платиновых металлов месторождений Норильск I, Октябрьского и Талнахского (рис. 1) — предмет настоящих исследований.

Сульфидное оруденение концентрируется в интрузивной фации вулкано-интрузивного комплекса, причем его максимальная концентрация сосредоточена в полнодифференцированных массивах и в меньшей степени в более ранних дифференцированных лейкократовых интрузивах и более поздних дифференцированных меланократовых интрузивах. Одна из особенностей норильских месторождений — многообразие слагающих их типов сульфидных руд [3—5].

<sup>1</sup> www.nornickel.ru.

<sup>2</sup> Там же.

© Григорьева А. В., Волков А. В., Мурашов К. Ю., 2021



Рис. 1. Схематическая структурно-геологическая карта Норильского рудного района (по материалам Норильской комплексной геолого-разведочной экспедиции (НКГРЭ), 1974 г., модифицирована)

Fig. 1. Schematic structural and geological map of the Norilsk ore region (based on materials of the Norilsk comprehensive geological exploration expedition (NIGEE), 1974, modified)

Основные Cu-Ni месторождения Норильского района изучаются на протяжении многих лет большим числом ученых России и мира. Однако распределение редких и редкоземельных элементов (РЗЭ) в Cu-Ni рудах современными аналитическими методами исследовано недостаточно. Известно, что микроэлементы и РЗЭ активно реагируют на окислительно-восстановительную среду природных обстановок, что позволяет использовать их в качестве геохимических индикаторов источников вещества. Кроме того, доизучение химического состава руд комплексных норильских месторождений, потенциальных источников высокотехнологичных металлов, имеет большое практическое значение [6]. Публикация продолжает серию статей Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (ИГЕМ РАН), посвященных минеральным ресурсам Арктики.

### Методика исследований

Для проведения исследований была составлена коллекция из 32 образцов основных типов руд (табл. 1, рис. 2). Массивные руды представлены 7 образцами (6 Октябрьского и 1 Талнахского месторождений); прожилково-вкрапленные руды — 5 образцами Талнахского месторождения; брекчиевидные руды — 4 образцами западного фланга Октябрьского месторождения; вкрапленные руды —

17 образцами, отобранными из такситовых и пикритовых габбродолеритов Талнахского (скважина ОУГ-2), Хараелахского (скважина РТ-7) и Норильск I (скважина МН-2) интрузивов.

Петрографическими и минералогическими методами изучались состав пород и рудная минерализация.

Определение концентрации главных и примесных элементов в пробах выполнено методом рентгеноспектрального флуоресцентного анализа на вакуумном спектрометре последовательного действия (с дисперсией по длине волны), модель Axios mAX Advanced производства компании PANalytical (Нидерланды), в лаборатории анализа минерального вещества ИГЕМ РАН. Спектрометр снабжен рентгеновской трубкой мощностью 4 кВт с Rh-анодом. Максимальное напряжение на трубке 60 кВ, максимальный анодный ток 160 мА. При градуировке спектрометра использованы отраслевые и государственные стандартные образцы химического состава горных пород и минерального сырья. В качестве контрольных образцов использованы стандартные образцы Геологической службы США (USGS).

Анализ выполнен по методикам Научного совета по аналитическим методам исследований Всероссийского научно-исследовательского института минерального сырья им. Н. М. Федоровского, обе-

Таблица 1. Коллекция норильских Cu-Ni руд

Типы руд	Типы руд по главным сульфидам	Место отбора образца: интрузив, скважина	Главные рудные минералы
Массивные руды	Халькопирит-пирротиновый Пирротин-халькопиритовый	Хараелахский интрузив: РТ-30, гл. 1564 м, РТ-30, гл. 1573,6 м, РТ-30, гл. 1576,1 м	Пирротин Халькопирит Пентландит
	Талнахитовый	Октябрьское месторождение: РТ-102, гл. 1614,4 м, РТ-102, гл. 1617,6 м	Талнахит Халькопирит Кубанит Пентландит
	Кубанит-пирротиновый	Октябрьское месторождение: 1/ОК-88	Халькопирит Кубанит Пирротин Пентландит
	Пентландит-халькопиритовый	Талнахский интрузив: ЭМ-1, гл. 81,7 м	Пентландит Халькопирит Борнит
Прожилково-вкрапленные руды	Пирротин-пентландитовый	Талнахское месторождение: 1 — в скарнах — СФ-18, гл. 841,1 м, СФ-18, гл. 842,8 м, СФ-18, гл. 845,8 м, СФ-18, гл. 855,5 м	Пирротин Пентландит Пирит
	Пирротин-пентландит-халькопиритовый	Талнахское месторождение: 2 — в роговиках — ОУГ-2, гл. 1231,7 м, ОУГ-2, гл. 1234,5 м	Пирротин Пентландит Халькопирит
Брекчиевидные руды	Пирротин-пентландит-халькопиритовый	Хараелахский интрузив, Октябрьское месторождение: 937/51, гл. 616,2 м, 937/86, гл. 532,7 м, ЗФ-68, гл. 375,5 м, ЗФ-68, гл.385,8 м	Пирротин Пентландит Халькопирит Пирит
Вкрапленные руды	Пирротин-пентландит-халькопиритовый	Талнахский интрузив: 1 — пикритовые габбродолериты — ОУГ-2, гл. 1211,0 м (Гп 1), ОУГ-2, гл. 1221,2 м (Гп 2); 2 — такситовые габбродолериты — ОУГ-2, гл. 1225,7 м (Гт 1), ОУГ-2, гл. 1230,0 м (Гт 2)	Халькопирит Пентландит Пирротин
	Пирротин-пентландит-халькопиритовый	Хараелахский интрузив, Октябрьское месторождение: 1 — пикритовые габбродолериты — РТ-7, гл. 1474,3 м (Гп 1), РТ-7, гл. 1475,9 м (Гп 2), РТ-7, гл. 1476,3 м (Гп 3); 2 — такситовые габбродолериты — РТ-7, гл. 1487,3 м (Гт)	Халькопирит Пирротин Пентландит
	Пирротин-пентландит-халькопиритовый	Месторождение Норильск I: 1 — контактовые габбродолериты — МН-2, гл. 380,0 м (Гк); 2 — пикритовые габбродолериты — МН-2, гл. 368,5 м (Гп 1), МН-2, гл. 369,23 м (Гп 2); 3 — такситовые габбродолериты — МН-2, гл. 370,7 м (Гт 1), МН-2, гл. 372,05 м (Гт 2), МН-2, гл. 372,85 м (Гт 3), МН-2, гл. 374,15 м (Гт 4)	Пирротин Пентландит Халькопирит Пирротин никелистый Пирит никелистый

Примечание: гл. — глубина.

спечивающим получение результатов III категории точности количественного анализа по ОСТ РФ 41-08-205-04. Данная категория точности применяется для массового анализа проб минеральных веществ, контрольных анализов и при подсчете запасов месторождений полезных ископаемых (аналитик А. И. Якушев).

Определение микроэлементов и РЗЭ проводилось в Институте экспериментальной минералогии им. академика Д. С. Коржинского РАН (Черноголовка Московской области) с помощью масс-спектрометра ICP-MS XSeries 2 Thermo Electron, который позволяет выполнять высокоточный анализ в диапазоне элементов от Li до U, включая элементы с высокими

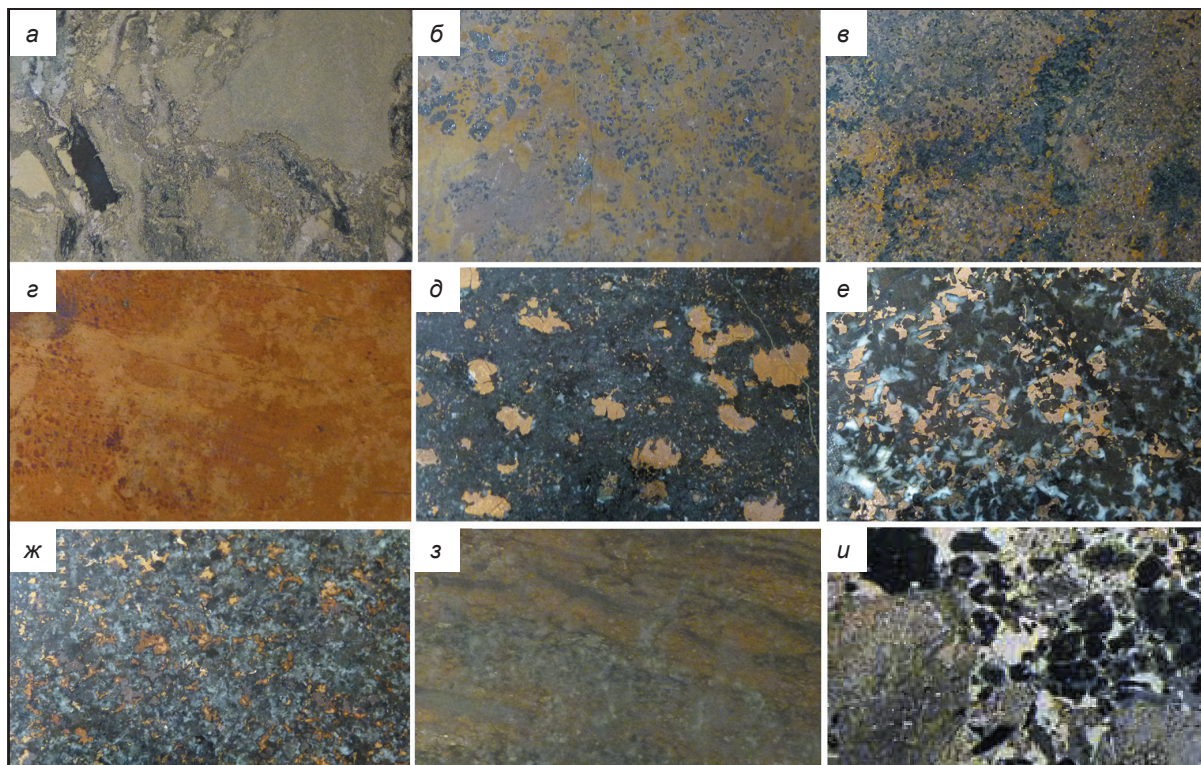


Рис. 2. Фотографии основных типов Cu-Ni норильских руд. Полированные штуфы в натуральную величину: а – массивная пентландит-пирротин-халькопиритовая руда, Октябрьское месторождение, рудник «Комсомольский»; б – массивная пентландит-пирротин-халькопиритовая руда, Октябрьское месторождение, рудник «Октябрьский»; в – пентландит-халькопирит-пирротин-прожилково-вкрапленная руда, Талнахское месторождение, рудник «Комсомольский»; г – пентландит-кубанит-талнахитовая массивная руда, Талнахское месторождение, рудник «Комсомольский»; д – вкрапленная сульфидная руда (ликвационные халькопирит-пирротин-капли) в пикритовых габбро-долеритах (нижние части сульфидных капель сложены пирротином, верхние – халькопиритом), Талнахское месторождение, рудник «Комсомольский»; е – халькопирит-пирротин-густовкрапленная сидеронитовая руда в пикритовых габбро-долеритах, месторождение Норильск I; ж – пирротин-халькопиритовая тонковкрапленная руда с магнетитом в оливиновых габбро-долеритах, месторождение Норильск I; з – пирротин-халькопиритовая прожилково-вкрапленная тонкозернистая руда с магнетитом в роговиках, Талнахское месторождение, рудник «Комсомольский»; и – брекчиевидные руды («обломки» роговиков, метасоматитов и габбродолеритов цементируются крупнозернистым пентландит-халькопирит-пирротин-материалом, роговики замещаются сульфидами и магнетитом), Октябрьское месторождение, рудник «Октябрьский»

Fig. 2. Photos of the main types of Cu-Ni ores in Norilsk. Life-size polished floats: а – massive pentlandite-pyrrhotite-chalcopyrite ore, Oktyabrskoye Deposit, Komsomolsky mine; б – massive pentlandite-pyrrhotite-chalcopyrite ore, Oktyabrskoye Deposit, Oktyabrskiy mine; в – pentlandite-chalcopyrite-pyrrhotite veined-interspersed ore, Talnakhskoye Deposit, Komsomolsky mine; г – pentlandite-kubanite-talnakhite massive ore, Talnakhskoye Deposit, Komsomolsky mine; д – interspersed sulfide ore (liquation chalcopyrite-pyrrhotite drops) in picritic gabbro-dolerites. The lower parts of the sulfide droplets are composed of pyrrhotite, and the upper parts are of chalcopyrite. Talnakhskoye Deposit, Komsomolsky mine; е – chalcopyrite-pyrrhotite thickly interspersed sideronite ore in picritic gabbro-dolerites Norilsk I Deposit; ж – pyrrhotite-chalcopyrite thinly interspersed ore with magnetite in olivine gabbro-dolerites, Norilsk I Deposit; з – pyrrhotite-chalcopyrite vein-interspersed fine-grained ore with magnetite in hornfels, Talnakhskoye Deposit, Komsomolsky mine; и – brecciated ores. "Fragments" of hornfels, metasomatites, and gabbrodolerites are cemented by coarse-grained pentlandite-chalcopyrite-pyrrhotite material. The hornfels are replaced by sulfides and magnetite. Oktyabrskoye deposit, Oktyabrskiy mine

потенциалами ионизации: РЗЭ, Zr, Nb, W и др. Пределы обнаружения элементов от  $10^{-9}$  до  $10^{-12}$  г/мл (аналитик В. К. Карандашев).

### Характеристика основных типов Cu-Ni руд

#### Массивные или сплошные руды

Массивные — наиболее экономически значимый тип Cu-Ni руд. Массивные руды в настоящее время играют наиболее существенную роль (8,5%) в балансе запасов Норильского промышленного района. Наибольшее их количество сосредоточено в месторождениях Талнахское и Норильск I. По латерали

протяженность залежей этих руд достигает несколько сотен метров, а мощность колеблется от 0,1 до 45 м. Наибольшей мощности сплошные руды достигают в осевых зонах интрузивов. Кроме того, массивные руды образуют самостоятельные тела и локализуются в метаморфических и метасоматических породах ближнего экзоконтакта рудоносных интрузивов. Они образуют систему жил плито- и линзовидных тел, залегающих в породах нижнего экзоконтакта интрузивов конкордантно с элементами залегания последних.

Форма тел массивных руд плитообразная, уплотненно-линзовидная. В меньшем количестве тела

массивных руд размещаются среди пород дифференцированных рудоносных интрузивов, где слагают жилы, заполняют свободное пространство [7].

В норильских и особенно талнахских массивных рудах установлен полный ряд парагенетических ассоциаций сульфидов, охватываемых системой Fe-Cu-Ni-S. Слагая отдельные части рудных тел, они обуславливают их зональность и скрытую расслоенность. Большинство рудных тел сложено пирротиновыми рудами с отношением Cu/Ni порядка 0,8, почти в два раза ниже, чем во вкрапленных рудах. Эти руды на 60—65% сложены минералами группы пирротина, на 15—20% — халькопиритом, на 10—15% — пентландитом и примерно на 5% — магнетитом. Среди существенных пирротиновых руд по текстурным особенностям выделяются две разновидности. Первая характеризуется петельчатой текстурой: между блоками, сложенными пирротинном, развивается халькопирит в виде петель изменяющейся мощности. Количество ксенолитов роговиков в них не превышает 5%. Вторая разновидность представляет собой мелкозернистые руды с большим количеством магнетита и силикатных включений, составляющих до 30% объема руд. В рудах с низкосернистыми ассоциациями сульфидов (минералы группы халькопирита с пониженным содержанием серы) концентрация Ni в пентландите опускается до 28 масс. %, а в пирротиновых рудах поднимается до 36 масс. %. Содержание Ni в пирротине при этом изменяется от сотых долей процента (в троилите) до 1,6 масс. % в моноклинном пирротине. Массивные руды формируются позже внедрения сульфидно-силикатной магмы, образующей полнодифференцированные интрузивы с вкрапленным оруденением [3].

### *Прожилково-вкрапленные руды*

Прожилково-вкрапленная минерализация, связанная с массивными рудами, наложена на все типы вмещающих пород, слагающих экзоконтакты тел сплошных сульфидов, а также и на интрузивные породы, содержащие вкрапленное оруденение. Прожилково-вкрапленные руды Талнахского и Октябрьского месторождений в метаморфических и метасоматических породах по осадочно-терригенным породам тунгусской серии, осадочным породам девона локализуются в основном в нижнем, реже в верхнем экзоконтактах рудоносных интрузивов. В нижнем экзоконтакте интрузива Норильск I вмещающими являются метасоматиты по породам тунгусской серии и базальты верхней перми. Они слагают линзовидные и пластообразные тела мощностью 2—3 м. Вместе с брекчиевидными прожилково-вкрапленные руды составляют около 4% запасов руд норильских месторождений [8].

### *Брекчиевидные руды*

Брекчиевидные руды — второй по значению промышленный тип в пределах Октябрьского месторождения. По химическому и минеральному составу они близки к прожилково-вкрапленным рудам и от-

личаются от них только структурно-текстурными характеристиками. Они развиты на западном фланге Хараелахского интрузивного массива (Октябрьское месторождение), где единое тело интрузива расщепляется на ряд апофиз, а контактово-метаморфизованные и метасоматически измененные сульфатно-карбонатно-осадочные породы среднего девона содержат множество инъецированных тел интрузивных пород разной степени раскристаллизованности и размеров. Вмещающие породы для брекчиевидных руд — пироксеновые, гранат-пироксеновые, ангидрит-пироксеновые роговики и шпинель-форстеритовые, монтичеллитовые и фассаитовые скарны.

В рудах с брекчиевидной текстурой обломки пород цементируются сульфидами и сульфидно-силикатными агрегатами. В основном «обломки» лишены рудной минерализации, но нередко их края замещаются тонкозернистыми сульфидами, преимущественно халькопиритом. По количественным соотношениям рудообразующих минералов выделяются халькопирит-пирротиновые, пирротин-халькопиритовые и халькопиритовые руды. Всегда в них присутствует пентландит в количестве 10—15% объема сульфидов. В миллерит-халькопиритовых рудах миллерит может быть единственным никелевым минералом. Пирротин представлен в основном моноклинной модификацией. Содержание никеля в нем в халькопирит-пирротиновых рудах колеблется от 0,7 до 1,6 масс. %, а в пирротин-халькопиритовых — от 0,57 до 0,7 масс. %.

Пентландит в рудах с пирротинном образует мелкие пламенивидные и пластинчатые зерна в пирротине и тонкие каймы вокруг пирротина, а в халькопиритовых рудах пентландит порфиоровидный. Содержание никеля в пентландите из пирротиновых руд — 37,2—38,0 масс. %, а в миллерит-пентландит-халькопиритовых достигает 41,6 масс. %. Сульфиды в отдельных участках замещаются вторичными минералами, пирротин и халькопирит — пиритом, пиритом + магнетитом, магнетитом + валлериитом + диаспором, пентландит — макинавитом. Второстепенные минералы — сфалерит, галенит, джерфшерит, аргентопентландит.

### *Вкрапленные руды*

Вкрапленные руды приурочены к нижним дифференциатам интрузивных массивов — пикритовым и такситовым габбро-долеритам. В структуре запасов норильских месторождений они составляют около 84% [9]. Строение залежей вкрапленных руд полностью определяется морфологическими особенностями горизонтов вмещающих их пород. Наибольшей мощностью (до 40—50 м) эти руды обладают в максимальных мощностях расслоенных массивов.

Характер минерализации как по морфологии сульфидных выделений, так и по парагенезисам сульфидов в пикритовых габбродолеритах отличается от такситовых [3; 4]. В первых сульфиды выделяются в виде (1) мелких (не более 2 мм) интерстициальных вкрапленников, (2) более крупных (до 2—3 см)

Таблица 2. Химический состав основных типов Cu-Ni руд (масс. %) Норильского района

Тип руд	n	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> общ.	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S общ.	Cu	Ni	Σ
Массивные руды	7	1,23	0,03	0,4	37,47	0,04	0,14	0,07	0,04	0,04	0,02	35,19	19,58	4,7	99,02
Прожилково-вкрапленные руды	6	19,41	0,23	4,59	20,46	0,08	5,11	18,6	0,51	0,12	0,03	14,9	3,0	1,91	88,56
Брекчиевидные руды	4	13,91	0,4	5,04	25,07	0,16	5,99	7,23	0,09	0,03	0,07	22,17	11,79	1,34	92,94
Вкрапленные руды ОУГ-2	4	35,66	0,07	8,95	18,68	0,17	12,77	5,7	0,87	0,41	0,06	6,1	1,4	0,87	91,62
Вкрапленные руды РТ-7	4	32,95	0,41	7,09	21,88	0,17	15,01	4,4	0,51	0,47	0,06	7,95	2,43	1,03	94,11
Вкрапленные руды МН-2	7	40,3	0,91	11,02	16,28	0,14	7,51	6,62	1,68	0,50	0,22	4,13	1,07	0,76	90,97
Октябрьское месторождение *	2	23,72	0,58	7,44	17,83	0,11	9,67	14,83	0,16	0,33	0,02	12,19	4,18	1,01	92,07
Талнахское месторождение *	3	27,67	0,57	8,79	15,89	0,10	9,13	15,08	0,23	0,36	0,02	7,64	2,04	0,78	88,30

\* Технологические пробы [10].

**Примечание:** n — количество проб.

овоидов — «капель», часто расслоенных. Верхняя их часть сложена халькопиритом, нижняя — пирротин. В такситовых габбро-долеритах преобладают относительно крупные (1—3 см) ксеноморфные выделения сульфидов. Кроме них развита мелкая интерстициальная вкрапленность и шлиры неправильной линзовидной и прожилковидной формы величиной до 10—15 см.

Пентландит-халькопирит-пирротинные руды, как вкрапленные, так и массивные, имеют общий структурный рисунок. На контакте блоков пирротина и халькопирита развиваются каймы пентландита I, в некоторых участках переходящие в порфиоровидные выделения. В самом пирротине I наблюдаются мелкие пластинчатые, линзовидные и пламенивидные выделения пентландита II, ориентированные вдоль трещин и отдельностей пирротина I или перпендикулярно трещинам в нем (пентландит II). Такую же ориентировку имеют и линзовидные выделения халькопирита. В поле развития халькопирита развиваются зерна пирротина II, которые либо непосредственно примыкают к блокам пирротина I, либо образуют выделения неправильной, прямоугольной и шестиугольной формы. Зерна пирротина II могут отделяться от халькопирита тонкими полосками силикатов. В сложении пирротина II могут участвовать все три модификации пирротина — троилит, гексагональный и моноклинный пирротин.

Рудные оксиды во вкрапленных рудах представлены титаномагнетитом, магнетитом и ильменитом.

### Геохимические особенности Cu-Ni руд Норильского района

Основные типы Cu-Ni руд Норильского района, рассмотренные выше, существенно различаются по химическому составу и содержанию породообразующих окислов (табл. 2). Следует отметить, что установленные содержания породо- и рудообразующих компонентов хорошо коррелируют с минералогическим описанием типов руд (см. выше).

В массивных рудах преобладают Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> общ. и S (в среднем 37,47% и 35,19% соответственно). В них наиболее высокие содержания основных металлов Cu и Ni (в среднем 19,58% и 4,7% соответственно) и низкие концентрации породообразующих компонентов.

В прожилково-вкрапленных рудах содержания породообразующих компонентов заметно возрастают (средние): SiO<sub>2</sub> — 19,41%, CaO — 18,6%, MgO — 5,11%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — 4,59%. А концентрации Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> общ., S, Cu и Ni соответственно снижаются: 20,46%, 14,9%, 3,0% и 1,91%.

В брекчиевидных рудах по сравнению с прожилково-вкрапленными наблюдаются снижение концентраций SiO<sub>2</sub> до 13,97% и CaO до 7,23%, обогащение рудообразующими компонентами (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> общ. — 25,07%, S — 22,17%, Cu — 11,79% и Ni — 1,34%).

Во вкрапленных рудах породообразующие компоненты, естественно, имеют наиболее высокие, а рудные компоненты — низкие концентрации (см. табл. 2). Вкрапленные руды Норильска I наибо-

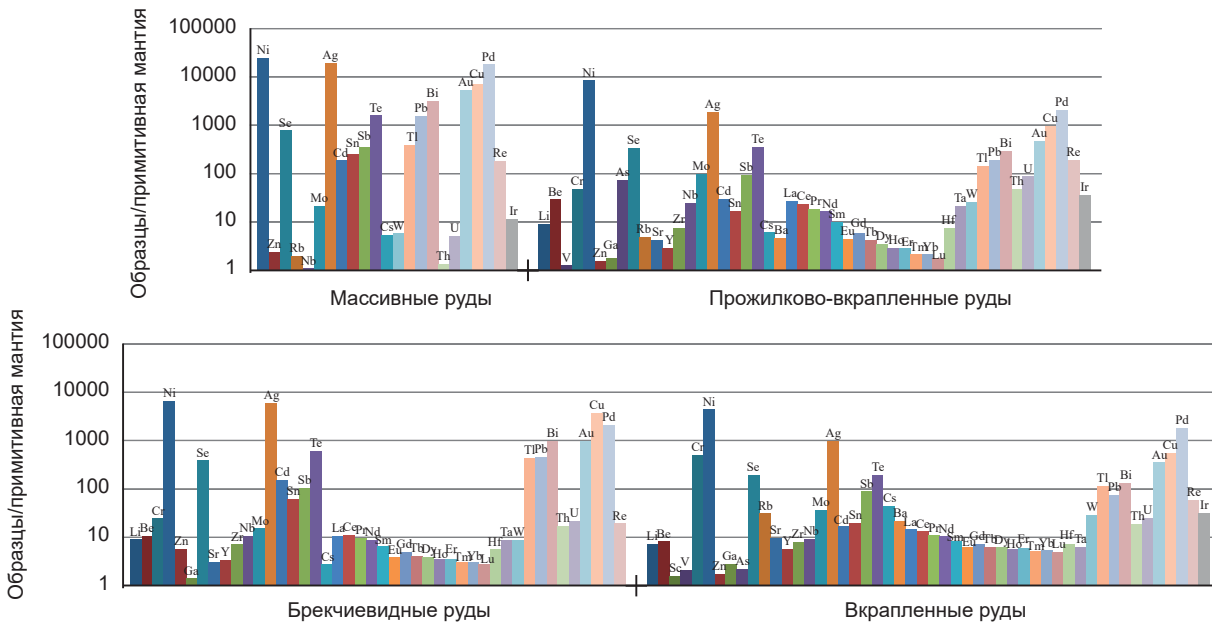


Рис. 3. Микроэлементы основных типов Cu-Ni руд Норильского района. Средние содержания, нормированные к примитивной мантии [11]  
 Fig. 3. Trace elements of the main types of Cu-Ni ores in the Norilsk region. Average contents normalized to primitive mantle [11]

лее бедны по сравнению с другими объектами (см. табл. 2).

Распределение микроэлементов в основных типах Cu-Ni руд Норильского района показаны на совмещенных диаграммах (рис. 3 и 4), где они нормированы по отношению к средним значениям для примитивной мантии [11].

По сравнению с примитивной мантией Cu-Ni норильские руды характеризуются явным обогащением халькофильными и сидерофильными, а также незначительным обогащением PЗЭ и радиоактивными элементами (см. рис. 3 и 4).

Коэффициенты обогащения рудных элементов достигают в массивном типе руд (см. рис. 3) нескольких десятков (Mo, Ir, Zn, Rb, W, Nb, Th, U, Ba, La, Ce, Pr), сотен (Sc, Sb, Sn, Re, Se, Cd, Ti), тысяч (Cu, Te, Pb, Bi, Au) и десятков тысяч (Ni, Pd, Ag) раз, что свидетельствует о геохимическом сродстве микроэлементов и их синхронном участии в рудообразовании. Кроме того, коэффициенты обогащения ряда элементов (Zn, Rb, Nb, Cs, W, Th, U) незначительно превышают единицу.

Распределение микроэлементов в других типах руд обладают большим сходством (см. рис. 3). Например, коэффициенты обогащения в прожилково-вкрапленных рудах достигают нескольких десятков (Be, Cr, As, Nb, Cd, Sn, Mo, Sb, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Ta, W, Yb, U, Ir), сотен (Se, Te, Ti, Pb, Bi, Au, Re), тысяч (Ni, Ag, Cu, Pd). Кроме того, эти руды незначительно (от 1 до 10 раз) обогащены Li, V, Zn, Ga, Rb, Sr, Y, Zr, Cs, Ba, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf. Практически аналогичным образом с небольшими вариациями микроэлементы распределены в брекчиевидном и вкрапленном типе руд, что свидетельствует о гео-

химическом сродстве микроэлементов и их синхронном участии в рудообразовании.

Рассмотрим в сравнительном плане распределение микроэлементов в прожилково-вкрапленных рудах Октябрьского и Талнахского месторождений (см. рис. 4, табл. 2). Средние содержания, по данным технологического опробования на фабрике [10], нормированы к примитивной мантии [11].

Коэффициенты обогащения проанализированных микроэлементов в октябрьской и талнахской руде достигают в основном сотен (S, Pt, Au, Se, Te, Pb, As, Sn, Mo) и тысяч (Ni, Cu, Ag, Pd) раз. Кроме того, более чем в 10 раз руды обогащены Rh и Ru, незначительно (от 1 до 10 раз) обогащены Ir, Os и Zn (см. рис. 4).

Таким образом, распределения основных микроэлементов в наших и фабричных пробах обладают большим сходством (см. рис. 3 и 4), что свидетельствует о высоком качестве выполненных анализов. Отметим, что в наших пробах не стояла задача определения полного спектра платиноидов.

Судя по рис. 3 и 5, распределения микроэлементов в основных типах Cu-Ni руд Норильского района, нормированных к примитивной мантии и верхней коре, обладают определенными сходством и различием. По сравнению со спектрами микроэлементов, нормированных к примитивной мантии (см. рис. 3), в нормированных к коре (см. рис. 5) исчезли W, Ta, Nb, PЗЭ. В массивном типе руд (см. рис. 5) коэффициенты обогащения микроэлементов достигают нескольких десятков (Sb, Pb), сотен (Cd, Re, Bi), тысяч (Ni, Ag, Cu, Au, Re) и сотен тысяч (Pd) раз. В других типах руд коэффициенты обогащения отмеченных выше микроэлементов заметно снижаются, иногда почти на порядок (см. рис. 5). Кроме того, массив-

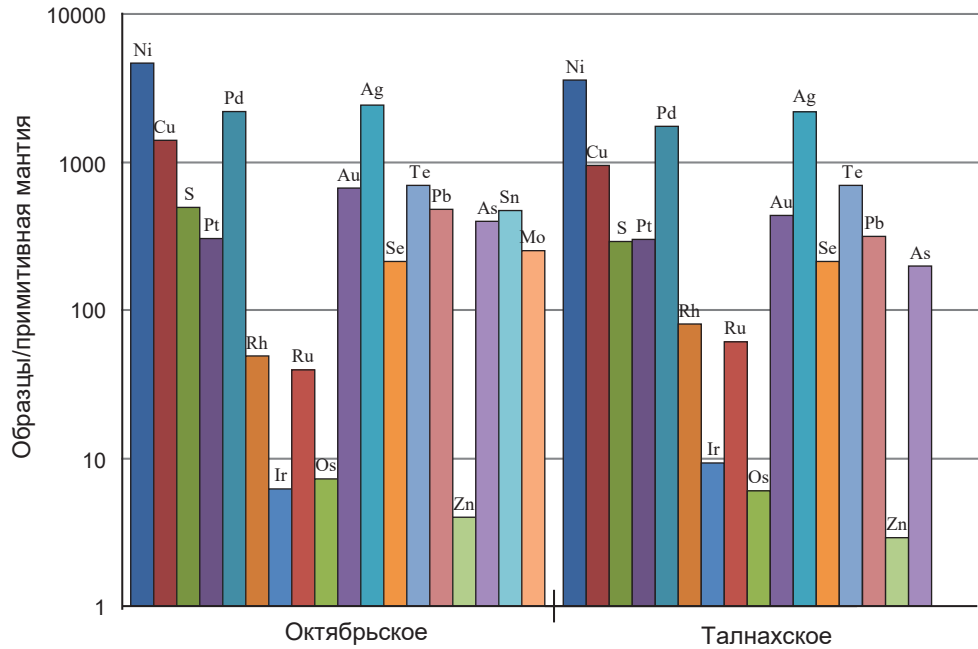


Рис. 4. Распределение извлекаемых микроэлементов в рудах Октябрьского и Талнахского месторождений. Средние содержания по данным технологического опробования [10], нормированные к примитивной мантии [11]

Fig. 4. Distribution of extracted trace elements in the ores of the Oktyabrskoye and Talnakhskoye deposits. Average grades, according to technological sampling [10], normalized to the primitive mantle [11]

ные руды незначительно обогащены Zn, Se, Tl, Te, Sn, прожилково-вкрапленные — V, Cr, Zn, As, Mo, Sb, Te, Pb, Bi, брекчиевидные — Sc, Cr, Zn, Sn, Sb, Te, Tl, Pb, вкрапленные — Sc, V, Zn, Cd, Sb, Bi, коэффициенты обогащения которых не превышают нескольких раз (см. рис. 5). Естественно, наиболее обогащены основными рудными элементами массивные руды.

Необходимо отметить довольно высокую обогащенность всех типов руд Bi, Re и Cd (см. рис. 5), которые потенциально промышленно значимы как высокотехнологичные металлы и могут быть перспективны для попутной добычи.

Концентрация редких земель в основных типах Cu-Ni руд Норильского района за исключением массивных руд превышает уровень стандарта хондрита [12], фракционирование РЗЭ слабое (см. табл. 3, рис. 6ж). Спектры распределения нормированных по хондриту РЗЭ имеют небольшой отрицательный уклон: суммарные содержания легких РЗЭ выше, чем тяжелых. Идентичность конфигураций трендов распределения проявляется

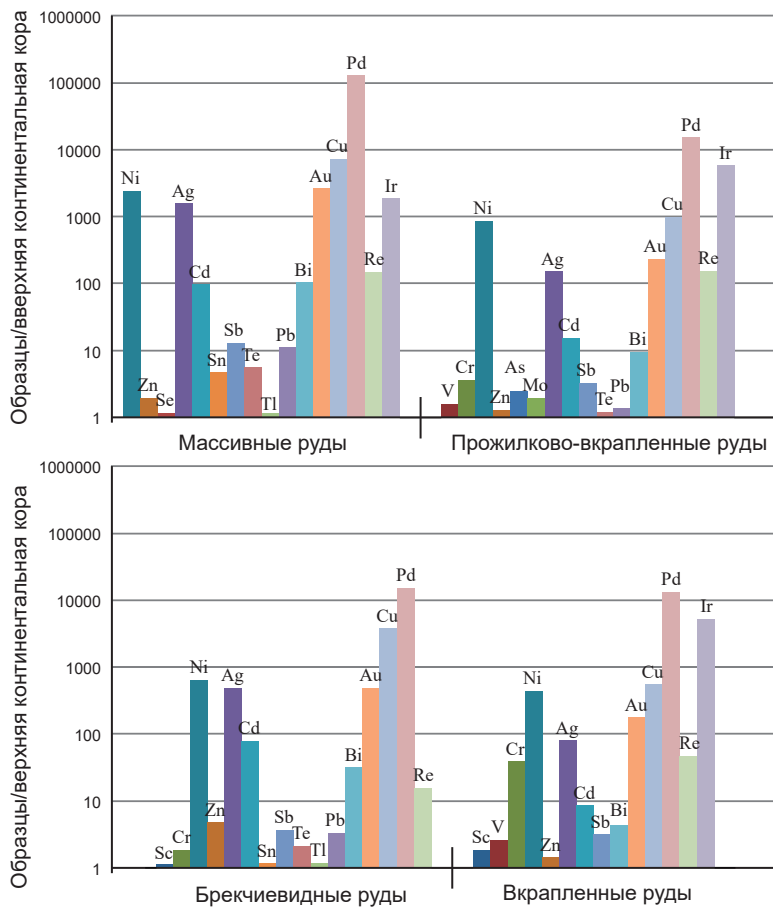


Рис. 5. Распределение микроэлементов в основных типах Cu-Ni руд Норильского района. Средние содержания, нормированные к континентальной коре [12]

Fig. 5. Distribution of trace elements in the main types of Cu-Ni ores in the Norilsk region. Average grades normalized to the continental crust [12]



для средних РЗЭ и тяжелых РЗЭ (см. рис. 6ж). Индикаторные показатели разных типов руд Норильского района имеют близкие значения (см. табл. 3). Наклонные и пологие участки спектров РЗЭ разных типов руд (рис. 6ж) обла- дают большим сходством между собой и со спектрами вмещаю- щих пород [14].

Концентрация РЗЭ в основ- ных типах Cu-Ni руд Норильского района характеризует условия их образования. Схожесть гео- метрии спектров РЗЭ массивных и прожилково-вкрапленных, брек- чиевидных, вкрапленных типов руд, содержащих значительную примесь вмещающих пород (см. табл. 2), указывает на унаследо- ванность состава РЗЭ в рудах от вмещающих пород. Это факт так- же подтверждает, что сумма РЗЭ массивных руд в 30 раз ниже, чем в других типах руд (см. табл. 3). По существу в массивных сульфид- ных рудах тяжелые и средние РЗЭ практически отсутствуют (рис. 6а).

Во вкрапленных рудах в пикри- товых и такситовых габбро-доле- ритах со значительным содержа- нием оливина спайдердиаграм- мы представляют собой плавные линии с незначительным фракци- онированием легких элементов (рис. 6ж). Во вкрапленных рудах в такситовых габбро-долеритах присутствует Eu аномалия — в Хараелахском (Октябрьское месторождение) и Талнахском (Талнахское месторождение) интрузивах она положительная, а в интрузиве Норильск I — отрицательная (рис. 6б, 6г и 6е). Еще одна особенность таксито- вых габбро-долеритов интрузи- ва Норильск I — более высокие концентрации редких земель по сравнению с Хараелахским и Тал- нахским интрузивами (см. табл. 3).

Для вмещающих контактово- метаморфических и метасомати- ческих пород с прожилково-вкра- пленными (экзоконтактовыми) рудами характерны более высо- кие концентрации редких земель и значительное фракциониро- вание легких и тяжелых редких элементов (см. рис. 6в). Это от- ражено и на диаграмме (La/Sm)

Таблица 3. Элементный состав (г/т) изученных образцов основных типов Cu-Ni руд Норильского района

Типы руд	Массивные руды	Прожилково-вкрапленные руды	Брекчиевые руды	Вкрапленные руды
Количество проб	7	6	4	15
Au	4,76	0,42	0,87	0,31
Ag	79,91	7,59	24,18	3,96
Pd	65,70	7,60	7,52	6,54
Ir	0,04	0,11	0,00	0,10
As	0,00	3,70	0,00	0,11
Sb	2,55	0,66	0,72	0,62
Cu	183 193,17	24 868,52	92 581,16	13 768,82
Ni	48 602,18	16 825,14	12 891,91	8 701,14
Pb	223,98	27,87	66,75	10,76
Zn	139,73	91,40	333,29	100,16
Re	0,06	0,06	0,01	0,02
Li	0,21	14,45	14,29	11,85
Be	0,01	1,57	0,58	0,44
Sc	0,29	4,30	11,70	20,25
V	15,64	93,63	35,57	155,89
Cr	1,01	127,33	64,45	1353,51
Bi	12,92	1,18	3,93	0,54
Ga	0,75	7,53	5,89	11,70
Se	59,23	25,81	29,41	14,59
Rb	0,90	2,23	0,25	14,13
Sr	2,95	66,85	49,64	153,18
Y	0,46	9,57	11,36	19,33
Zr	1,69	64,78	59,42	66,06
Nb	0,49	11,57	4,78	4,35
Mo	0,65	2,94	0,46	1,13
Cd	9,45	1,52	7,66	0,84
Sn	26,00	1,73	6,36	1,98
Te	12,99	2,83	4,91	1,54
Cs	0,09	0,10	0,04	0,70
Ba	3,53	23,79	2,16	112,70
La	0,30	13,64	5,36	7,56
Ce	0,77	31,82	14,91	17,67

$n$  — (Gd/Yb) $n$  (см. рис. 6з). Отличие спайдердиаграмм роговиков, сложенных в основном плагиоклазом и клинопироксеном (см. рис. 6в — прожилково-вкрапленные руды, ОУГ-2), от метасоматически измененных безполевошпатовых скарнов заключается в отсутствии ярко выраженных для скарнов европиевых минимумов (см. рис. 6в — прожилково-вкрапленные руды, СФ-18). Спектр образца СФ-18/845,8 отличается от апомонтителлитового метасоматита меньшим содержанием РЗЭ и близким соотношением легких и тяжелых РЗЭ (ЛРЭ/ТРЭ около единицы). Вероятно, это объясняется большей степенью переработки первичного материала.

Для безоливиновых роговиков и скарнов в брекчиевидных рудах, как и для прожилково-вкрапленных руд, характерны значительное фракционирование легких РЗЭ относительно тяжелых и резко выраженный европиевый минимум (см. рис. 6в и 6д).

В массивных рудах характер распределения РЗЭ также определяется составом ксенолитов в этих рудах. В пентландит-борнитовых рудах (PT-102/1614,4) это метасоматиты, сложенные железистыми вторичными силикатами — хлоритом и гизингеритом. Спайдердиаграмма довольно пологая с небольшим преобладанием легких элементов над тяжелыми и небольшим максимумом диспрозия (см. рис. 6а — массивные руды). В массивных халькопирит-пирротиновых рудах включения ксенолитов роговиков редки. Концентрация тяжелых редких элементов ниже порога чувствительности анализа, содержание легких элементов тоже невелико, но легкие элементы явно преобладают над тяжелыми, что и отражено на спайдердиаграмме массивных руд (см. рис. 6а и 6ж).

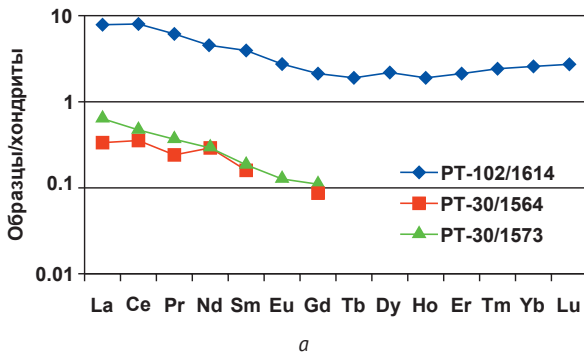
### Заключение

В результате выполненных исследований получены новые данные по составу и содержанию микроэлементов, включая РЗЭ в основных типах Cu-Ni руд Норильского района. Установлено,

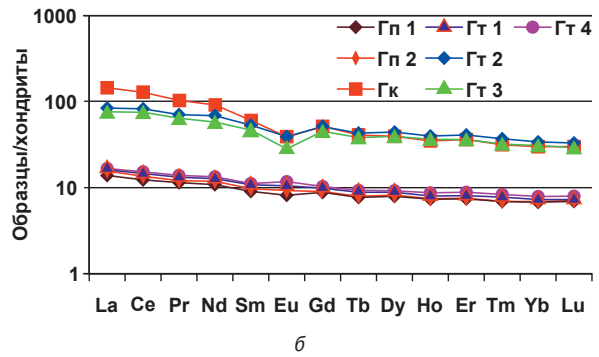
Типы руд	Массивные руды	Прожилково-вкрапленные руды	Брекчиевые руды	Вкрапленные руды
Pr	0,09	3,85	1,95	2,22
Nd	0,33	16,60	8,81	10,44
Sm	0,09	3,23	2,17	2,68
Eu	0,02	0,55	0,49	0,79
Gd	0,06	2,51	2,16	3,13
Tb	0,01	0,34	0,33	0,50
Dy	0,08	1,87	2,10	3,35
Ho	0,01	0,36	0,42	0,70
Er	0,05	0,98	1,23	2,06
Tm	0,01	0,12	0,16	0,29
Yb	0,06	0,74	1,06	1,84
Lu	0,01	0,10	0,15	0,27
Hf	0,04	1,71	1,28	1,64
Ta	0,02	0,66	0,26	0,20
W	0,07	0,31	0,10	0,34
Tl	0,78	0,29	0,88	0,23
Th	0,08	3,05	1,06	1,18
U	0,09	1,51	0,39	0,44
$\Sigma$ REE	1,88	76,70	41,30	53,49
$\Sigma$ LREE	1,59	69,69	33,68	41,36
$\Sigma$ HREE	0,29	7,01	7,62	12,13
$\Sigma$ LREE/ $\Sigma$ HREE	8,90	9,20	3,92	3,10
U/Th	0,13	0,44	0,28	0,44
Te/Se	0,35	0,14	0,16	0,10
Au/Ag	0,05	0,04	0,03	0,11
Eu/Eu*	0,13	0,74	0,76	1,03
Ce/Ce*	0,50	1,13	1,27	1,02
Eu/Sm	0,07	0,19	0,21	0,35
$\Sigma$ Ce	1,48	65,91	31,02	37,88
$\Sigma$ Y	0,28	8,86	7,68	11,15
$\Sigma$ Sc	0,13	1,94	2,61	4,45

**Примечание:** Eu/Eu\* = EuN/(SmN·GdN)<sup>1/2</sup>; Ce/Ce\* = CeN/((2LaN+SmN)/3), REE — РЗЭ, LREE — легкие РЗЭ, HREE — тяжелые РЗЭ.

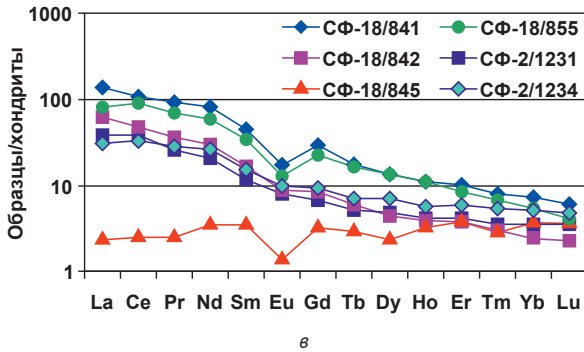
Массивные руды



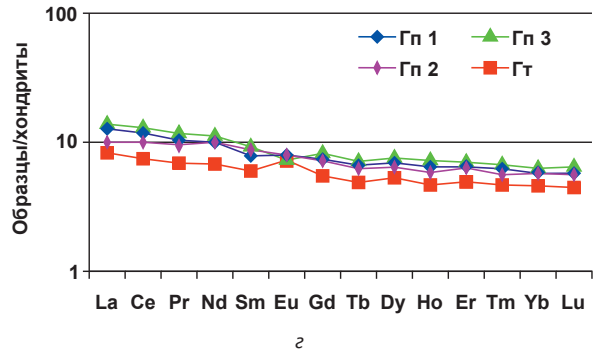
Вкрапленные руды (Норильск I, скв. МН-2)



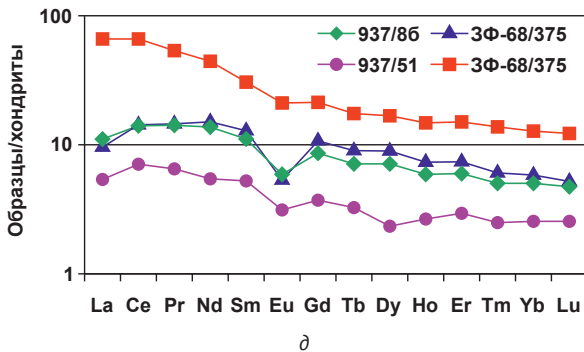
Прожилково-вкрапленные руды:  
СФ — в скарнах, ОУГ — в роговиках



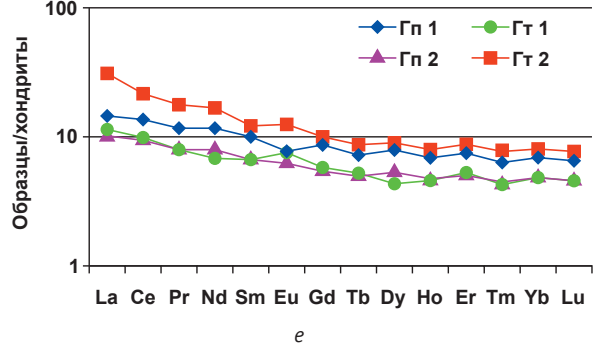
Вкрапленные руды  
(Октябрьское месторождение, скв. РТ-7)



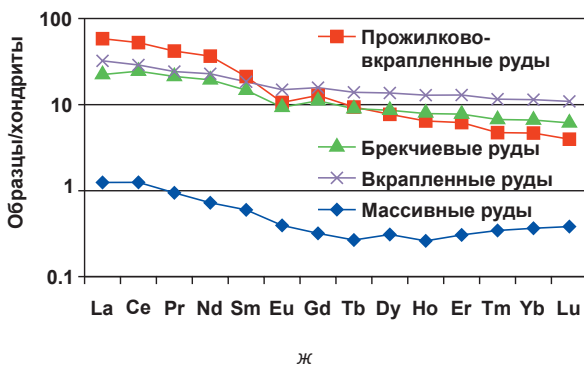
Брекчиевидные руды



Вкрапленные руды  
(Талнахское месторождение, скв. ОУГ-2)



Средние значения



Соотношение La/Sm к Gd/Yb

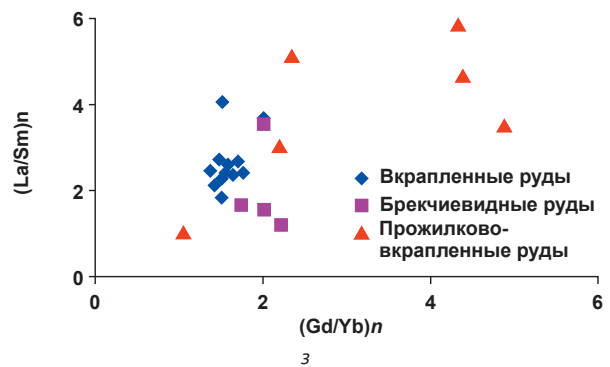


Рис. 6. Распределение РЗЭ, нормированные по хондритам [13], в основных типах Cu-Ni руд Норильского района. Номера проб на графиках см. в табл. 1  
Fig. 6. Distribution of REEs normalized by chondrites [13] in the main types of Cu-Ni ores in the Norilsk region. For sample numbers on the graphs, see Table 1

что основные типы руд (массивные, прожилково-вкрапленные, брекчиевидные и вкрапленные) существенно различаются по химическому составу и содержанию пороодо- и рудообразующих компонентов.

Выявлено обогащение руд широким спектром микроэлементов. По сравнению с примитивной мантией норильские руды характеризуются явным обогащением халькофильными и сидерофильными, а также незначительным обогащением РЗЭ и радиоактивными элементами. Коэффициенты обогащения рудных микроэлементов в октябрьской и талнахской руде достигают в основном сотен (S, Pt, Au, Se, Te, Pb, As, Sn, Mo) и тысяч (Ni, Cu, Ag, Pd) раз. Наиболее обогащены основными рудными элементами массивные и прожилково-вкрапленные руды.

Выявлена довольно высокая обогащенность всех типов руд Bi, Re и Cd, которые потенциально промышленно значимы как высокотехнологичные металлы и могут быть перспективны для попутной добычи.

Концентрация редких земель в основных типах Cu-Ni руд Норильского района за исключением массивных руд превышает уровень стандарта хондрита [12], фракционирование РЗЭ слабое. Спектры распределения нормированных по хондриту РЗЭ имеют небольшой отрицательный уклон: суммарные содержания легких РЗЭ выше, чем тяжелых.

Наклонные и пологие участки спектров РЗЭ разных типов руд обладают большим сходством между собой и со спектрами вмещающих пород. Схожесть геометрии спектров РЗЭ массивных и прожилково-вкрапленных, брекчиевидных, вкрапленных типов руд, содержащих значительную примесь вмещающих пород, указывает на унаследованность состава РЗЭ в рудах от вмещающих пород.

Для вмещающих контактово-метаморфических и метасоматических пород с прожилково-вкрапленными (экзоконтактовыми) рудами характерны более высокие концентрации редких земель и значительное фракционирование легких и тяжелых редких элементов. Для безоливиновых роговиков и скарнов в брекчиевидных рудах, так же как и для прожилково-вкрапленных руд, характерны значительное фракционирование легких РЗЭ относительно тяжелых и резко выраженный Eu минимум. В массивных рудах характер распределения РЗЭ определяется составом ксенолитов в этих рудах.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-05-70001 «Изучение геологических и геодинамических обстановок формирования крупных месторождений стратегических металлов Арктической зоны России: выводы для прогнозирования и поисков новых месторождений»).

Авторы выражают благодарность С. Ф. Служеникину за любезно предоставленную для исследований коллекцию образцов основных типов Cu-Ni руд Норильского района и за ценные критические замечания; Н. В. Сидоровой за подготовку проб к исследованиям.

## Литература

1. Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2018 году». — М.: ФГБУ «ВИМС», 2019. — 422 с.
2. Barnes S. J., Malitch K. N., Yudovskaya M. A. Introduction to a Special Issue on the Norilsk-Talnakh Ni-Cu-Platinum Group Element Deposits // *Economic Geology*. — 2020. — Vol. 115, № 6. — P. 1157—1172. — DOI: 10.5382/econgeo.4750.
3. Генкин А. Д., Дистлер В. В., Гладышев Г. Д. и др. Сульфидные медно-никелевые руды норильских месторождений. — М.: Наука, 1981. — 238 с.
4. Дистлер В. В., Гроховская Т. Л., Евстигнеева Т. Л. и др. Петрология сульфидного магматического рудообразования. — М.: Наука, 1988. — 232 с.
5. Додин Д. А., Служеникин С. Ф., Богомолов М. А. Руды и минералы Норильского района. — М.: Студия «Поляр. звезда», 2009. — 220 с.
6. Bortnikov N. S., Volkov A. V., Galyamov A. L. et al. Mineral Resources of High-tech Metals in Russia: State of the Art and Outlook // *Geology of Ore Deposits*. — 2016. — Vol. 58, № 2. — P. 83—103. — DOI: 10.1134/S1075701516020021.
7. Дистлер В. В., Служеникин С. Ф., Кабри Л. Дж. и др. Платиновые руды норильских расслоенных интрузивов: соотношение магматического и флюидного концентрирования благородных металлов // *Геология руд. месторождений*. — 1999. — Т. 41, № 3. — С. 241—265.
8. Дистлер В. В. Петролого-геохимические закономерности формирования платиноносных медно-никелевых руд: Дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. — М.: ИГЕМ РАН, 1985. — 450 с.
9. Sluzhenikin S. F. Platinum-Copper-Nickel and Platinum Ores of Norilsk Region and Their Ore Mineralization // *Russian J. of General Chemistry*. — 2011. — Vol. 8. — P. 1288—1301. — DOI: 10.1134/S1070363211060351.
10. Мирошникова Л. К. Геолого-геохимические предпосылки и признаки локализации медно-никелевого с платиноидами оруденения рудно-магматической системы Талнахского рудного узла: Дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. — М.: МГГРУ, 2017. — 321 с.
11. Lyubetskaya T., Korenaga J. Chemical composition of Earth's primitive mantle and its variance // *J. of Geophysical Research*. — 2007. — Vol. 112. — B03211. — DOI: 10.1029/2005JB004223,2007.
12. Тейлор С. Р., Мак-Леннан С. М. Континентальная кора: ее состав и эволюция. — М.: Мир, 1988. — 384 с.
13. McDonough W. F., Sun S. S. The Composition of the Earth // *Chemical Geology*. — 1995. — Vol. 120. — P. 223—253.
14. Sluzhenikin S. F., Malitch K. N., Turovtsev D. M. et al. Differentiated Mafic-Ultramafic Intrusions of the Zubovsky Type in the Noril'sk Region: Petrochemical and Geochemical Characteristics, and Ore Potential // *Petrology*. — 2020. — Vol. 28. — № 5. — P. 458—489. — DOI: 10.1134/S0869591120040074.

### Информация об авторах

**Григорьева Антонина Владимировна**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (119017, Россия, Москва, Старомонетный пер., д. 35), e-mail: grig357@mail.ru.

**Волков Александр Владимирович**, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (119017, Россия, Москва, Старомонетный пер., д. 35), e-mail: tma2105@mail.ru.

**Мурашов Константин Юрьевич**, младший научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (119017, Россия, Москва, Старомонетный пер., д. 35), e-mail: kostik.mur@mail.ru.

### Библиографическое описание данной статьи

Григорьева А. В., Волков А. В., Мурашов К. Ю. Редкие и редкоземельные элементы в Cu-Ni рудах Норильского района // Арктика: экология и экономика. — 2021. — Т. 11, № 1. — С. 76—89. — DOI: 10.25283/2223-4594-2021-1-76-89.

---

## RARE-EARTH ELEMENTS IN Cu-Ni ORES OF THE NORILSK REGION

Grigorieva A. V., Volkov A. V., Murashov K. Yu.

Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS (Moscow, Russian Federation)

The article was received on 27 October, 2020

### Abstract

The deposits of the Norilsk region are confined to the marginal northwestern part of the Siberian platform and are associated with the manifestation of the Early Mesozoic trap volcanism. Sulfide mineralization is concentrated in the intrusive facies of the volcano-intrusive complex. Four main types of Cu-Ni ores are distinguished according to textural features: massive, vein-disseminated, brecciated, and disseminated. The main types of Cu-Ni ores differ significantly from each other in the chemical composition and content of rock- and ore-forming components. The enrichment ratios of ore trace elements in the Oktyabrskaya and Talnakhskaya vein-disseminated ore mainly reach hundreds (S, Pt, Au, Se, Te, Pb, As, Sn, Mo) and thousands (Ni, Cu, Ag, Pd) times. A rather high enrichment of all types of Bi, Re and Cd ores has been revealed, which are potentially industrially significant as high-tech metals, and can be promising for associated mining. The amount of rare-earth elements (REE) in ores is several times less than in the upper crust and more than in the primitive mantle. The concentration of rare earths in the main types of ores, with the exception of massive ones, exceeds the level of the chondrite standard, and REE fractionation is weak. The distribution spectra of chondrite-normalized REEs have a slight negative slope: the total content of light REEs is higher than that of heavy ones. The similarity of the geometry of the REE spectra of massive, vein-disseminated, brecciated and disseminated types of ores containing a significant admixture of host rocks indicates the inheritance of the REE composition in ores from the host rocks. In the disseminated ores of common taxite gabbro-dolerites, the Eu anomaly is present in the Kharaelakhsky (Oktyabrskoye Deposit) and Talnakhsky (Talnakhskoye Deposit) intrusions, it is positive, and in the Norilsk I Intrusive (in the same rocks), it is negative. Higher concentrations of REEs and significant fractionation of light and heavy rare elements are typical for host contact-metamorphic and metasomatic rocks with vein-disseminated (exocontact) ores. For olivine-free hornfels and skarns in brecciated ores, as well as for vein-disseminated ores, significant fractionation of light REEs with relatively heavy ones and a pronounced Eu minimum are characteristic. In massive ores, the distribution of REEs is determined by the composition of xenoliths.

**Keywords:** *Norilsk region, copper-nickel deposits, geochemistry of ores, trace elements, rare earths.*

The research was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research, (Grant No. 18-05-70001 “Studying the geological and geodynamic conditions for the formation of large strategic metal deposits in the Arctic zone of Russia: conclusions for forecasting and prospecting for new deposits”).

The authors are grateful to S. F. Sluzhenikin for kindly providing the collection of samples of the main types of Cu-Ni ores of the Norilsk region and for valuable critical comments; to N. V. Sidorova — for technical assistance during the preparation of samples for research.

## Reference

1. Gosudarstvennyi doklad "O sostoyanii i ispol'zovanii mineral'no-syr'evykh resursov Rossiiskoi Federatsii v 2018 godu". [State report "On the state and use of mineral resources of the Russian Federation in 2018"]. Moscow, FGBU "VIMS", 2019. 422 p. (In Russian).
2. Barnes S. J., Malitch K. N., Yudovskaya M. A. Introduction to a Special Issue on the Norilsk-Talnakh Ni-Cu-Platinum Group Element Deposits. *Economic Geology*, 2020, vol. 115, no. 6, pp. 1157—1172. DOI: 10.5382/econgeo.4750.
3. Genkin A. D., Distler V. V., Gladyshev G. D., Filimonova A. A., Evstigneeva T. L., Kovalenker V. A., Laputina I. P., Smirnov A. V., Grokhovskaya T. L. Sul'fidnye medno-nikelevye rudy noril'skikh mestorozhdenii. [Sulfide Copper-Nickel Ores of the Norilsk Deposits]. Moscow, Nauka, 1981, 238 p. (In Russian).
4. Distler V. V., Grokhovskaya T. L., Evstigneeva T. L., Sluzhenikin S. F., Filimonova A. A., Dyuzhikov O. A. Petrologiya sul'fidnogo magmaticheskogo rudoobrazovaniya. [Petrology of Magmatic Sulfide Ore Formation]. Moscow, Nauka, 1988, 232 p. (In Russian).
5. Dodin D. A., Sluzhenikin S. F., Bogomolov M. A. Rudy i mineraly Noril'skogo raiona. [Ores and minerals of the Norilsk region]. Moscow, Studiya "Polyar. Zvezda", 2009, 220 p. (In Russian).
6. Bortnikov N. S., Volkov A. V., Galyamov A. L., Vikent'ev I. V., Aristov V. V., Lalomov A. V., Murashov K. Yu. Mineral Resources of High-tech Metals in Russia: State of the Art and Outlook. *Geology of Ore Deposits*, 2016, vol. 58, no. 2, pp. 83—103. DOI: 10.1134/S1075701516020021.
7. Distler V. V., Sluzhenikin S. F., Cabri L. J., Krivolutsкая N. A., Turovtsev D. M., Golovanova T. A. Platinovye rudy noril'skikh rassloennykh intruzivov: sootnoshenie magmaticheskogo i flyuidnogo kontsentrirovaniya blagorodnykh metallov. [Platinum ores of the Norilsk layered intrusions: the proportion of the magma and fluid concentration]. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii*, 1999, vol. 41, no. 3, pp. 241—265. (In Russian).
8. Distler V. V. Petrologo-geokhimicheskie zakonomernosti formirovaniya platinonosnykh medno-nikelevykh rud. [Petrological and geochemical regularities of formation of platinum-bearing copper-Nickel ores]. Dis. ... d-ra geologo-mineral. nauk. Moscow, IGEM RAN, 1985, 450 p. (In Russian).
9. Sluzhenikin S. F. Platinum-Copper-Nickel and Platinum Ores of Norilsk Region and Their Ore Mineralization. *Russian J. of General Chemistry*, 2011, vol. 8, pp. 1288—1301. DOI: 10.1134/S1070363211060351.
10. Miroshnikova L. K. Geologo-geokhimicheskie predposylki i priznaki lokalizatsii medno-nikelevogo s platinoidami orudneniya rudno-magmaticheskoi sistemy Talnakhskogo rudnogo uzla. [Geological and geochemical prerequisites and signs of localization of copper-Nickel with platinoids mineralization of the ore-magmatic system of the Talnakh ore node]. Dis. ... d-ra geologo-mineral. nauk. Moscow, MGGRU, 2017, 321 p. (In Russian).
11. Lyubetskaya T., Korenaga J. Chemical composition of Earth's primitive mantle and its variance. *J. of Geophysical Research*, 2007, vol. 112, B03211. DOI: 10.1029/2005JB004223,2007.
12. Teilor S. R., Mak-Lennan S. M. Kontinental'naya kora: ee sostav i evolyutsiya. [Continental crust: its composition and evolution]. Moscow, Mir, 1988, 384 p. (In Russian).
13. McDonough W. F., Sun S. S. The Composition of the Earth. *Chemical Geology*, 1995, vol. 120, pp. 223—253.
14. Sluzhenikin S. F., Malitch K. N., Turovtsev D. M., Grigorieva A. V., Badanina I. Yu. Differentiated Mafic-Ultramafic Intrusions of the Zubovsky Type in the Noril'sk Region: Petrochemical and Geochemical Characteristics, and Ore Potential. *Petrology*, 2020, vol. 28, no. 5, pp. 458—489. DOI: 10.1134/S0869591120040074.

## Information about the authors

**Grigorieva Antonina Vladimirovna**, PhD of Geology and Mineralogy, Senior Researcher, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, RAS (35, Staromonetnyi per., Moscow, Russia, 119017), e-mail: grig357@mail.ru.

**Volkov Alexander Vladimirovich**, Doctor of Geology and Mineralogy, Chief Researcher, Head of Laboratory, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, RAS (35, Staromonetnyi per., Moscow, Russia, 119017), e-mail: tma2105@mail.ru.

**Murashov Konstantin Yurievich**, Junior researcher, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, RAS (35, Staromonetnyi per., Moscow, Russia, 119017), e-mail: kostik.mur@mail.ru.

## Bibliographic description

**Grigorieva A. V., Volkov A. V., Murashov K. Yu.** Rare-earth elements in Cu-Ni ores of the Norilsk region. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. [Arctic: Ecology and Economy], 2021, vol. 11, no. 1, pp. 76—89. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-1-76-89. (In Russian).