

Вариации изотопного состава меди и цинка в платиноидно-медно-никелевых рудах Норильской провинции (Россия)

К. Н. Малич¹, И. Ю. Баданина¹, Н. Г. Солошенко¹, С. Ф. Служеникин²

¹Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, 620110, г. Екатеринбург,
ул. Академика Вонсовского, 15, e-mail: dunite@yandex.ru

²Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, 119017, г. Москва,
пер. Старомонетный, 35

Поступила в редакцию 29.02.2024 г., принята к печати 13.03.2024 г.

Объект исследования. Минеральные ассоциации сульфидов из массивных и вкрапленных сульфидных платиноидно-медно-никелевых (ЭПГ-Cu-Ni) и малосульфидных платиноидных руд Норильской провинции, вмещающей богатейшие комплексные месторождения платиноидов, никеля и меди. **Цель.** Изучение вариаций изотопного состава Cu и Zn в сульфидах промышленно-рудноносных (Хараелахского и Норильск-1), рудоносных (Зуб-Маркшейдерского и Вологодчанского) и слаборудноносных (Нижнеталнахского и Нижненорильского) интрузивов в целях выявления источников рудного вещества и совершенствования подходов при прогнозировании месторождений стратегических видов минерального сырья. **Методы.** Химический состав сульфидов изучен с помощью рентгеноспектрального микроанализа (микроанализаторы СAMEСА SX 100 и JXA-8200 JEOL). Аналитическая методика определения $\delta^{65}\text{Cu}$ и $\delta^{66}\text{Zn}$ включала в себя растворение образцов в смеси кислот HCl и HNO₃, селективное хроматографическое выделение Cu и Zn из раствора с последующим определением изотопных отношений $^{65}\text{Cu}/^{63}\text{Cu}$ и $^{66}\text{Zn}/^{64}\text{Zn}$ на масс-спектрометре Neptune Plus. **Результаты.** Проанализированные образцы характеризуются минеральными ассоциациями сульфидов, состоящими главным образом из халькопирита, пирротина, пентландита, троилита, кубанита и галенита. Сульфидные ЭПГ-Cu-Ni руды месторождений Октябрьское и Норильск-1, ассоциирующие с промышленно-рудноносными интрузивами (Хараелах и Норильск-1), демонстрируют дискретные диапазоны значений $\delta^{65}\text{Cu}$ от –2.42 до –1.40 и от –0.33 до 0.60‰ соответственно, которые отличаются от значений $\delta^{65}\text{Cu}$ для сульфидов из других месторождений и рудопоявлений Норильской провинции (данные по 36 анализам). При этом изотопный состав меди для сульфидных минералов массивных и вкрапленных руд Хараелахского интрузива обладает сходными “изотопно-легкими” характеристиками. Наиболее выраженный сдвиг в сторону “изотопно-тяжелой” меди установлен в горизонте малосульфидных руд интрузива Норильск-1 ($\delta^{65}\text{Cu} = 0.51\text{--}0.60\text{‰}$). Изотопный состав Zn ($\delta^{66}\text{Zn}$) для изученных образцов сульфидов промышленно-рудноносных, рудоносных и слаборудноносных интрузивов, за исключением одного образца ($0.73 \pm 0.14\text{‰}$), характеризуется сходными “изотопно-легкими” значениями ($-0.65 \dots -0.03\text{‰}$). **Выводы.** Выявленные вариации изотопного состава Cu и Zn в изученных сульфидных ассоциациях из всех типов руд отражают их первичную характеристику; тем не менее для Октябрьского ЭПГ-Cu-Ni месторождения, характеризующегося наиболее “изотопно-легким” составом меди ($\delta^{65}\text{Cu} = -1.9 \pm 0.34\text{‰}$), нельзя исключить возможность ассимиляции внешнего источника Cu при формировании сульфидных ЭПГ-Cu-Ni руд. Сопряженный характер изотопных параметров Cu и Zn оказался слабоинформативным прогнозным индикатором обнаружения богатых сульфидных руд, прежде всего, из-за схождения изотопного состава Zn в рудном веществе из различно рудоносных интрузивов Норильской провинции.

Ключевые слова: сульфидные ЭПГ-Cu-Ni руды, малосульфидные платиноидные руды, Cu-Zn изотопные системы, источники вещества, условия образования, Норильская провинция

Источник финансирования

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания ИГГ УрО РАН (№№ госрегистрации 122022600107-1 и 123011800012-9) при использовании оборудования ЦКП “Геоаналитик” ИГГ УрО РАН (соглашение № 075-15-2021-680)

Для цитирования: Малич К.Н., Баданина И.Ю., Солошенко Н.Г., Служеникин С.Ф. (2024) Вариации изотопного состава меди и цинка в платиноидно-медно-никелевых рудах Норильской провинции (Россия). *Литосфера*, 24(2), 300-325. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2024-24-2-300-325>

For citation: Malitch K.N., Badanina I.Yu., Soloshenko N.G., Sluzhenikin S.F. (2024) Copper and zinc isotopic variations in Ni-Cu-PGE ores of the Noril'sk Province (Russia). *Lithosphere (Russia)*, 24(2), 300-325. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2024-24-2-300-325>

Copper and zinc isotopic variations in Ni-Cu-PGE ores of the Noril'sk Province (Russia)

Kreshimir N. Malitch¹, Inna Yu. Badanina¹, Nataliya G. Soloshenko¹,
Sergey F. Sluzhenikin²

¹A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, UB RAS, 15 Academician Vonsovsky st.,
Ekaterinburg 620110, Russia, e-mail: dunite@yandex.ru

²Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, RAS,
35 Staromonetny lane, Moscow 119017, Russia

Received 29.02.2024, accepted 13.03.2024

Research subject. Mineral assemblages of sulfides from massive and disseminated sulfide nickel-copper-platinum-group element (Ni-Cu-PGE) and low-sulfide PGE ores of the Noril'sk Province, which hosts the richest complex deposits of platinum-group metals, nickel, and copper. **Aim.** In order to identify sources of ore material and explore new forecasting approaches for Ni-Cu-PGE deposits, we study the Cu- and Zn isotopic compositions of sulfides from economic Kharaelakh and Noril'sk-1 intrusions containing unique and large sulphide Ni-Cu-PGE deposits (Oktyabr'sk and Noril'sk-1, respectively), subeconomic Zub-Marksheider and Vologochan intrusions containing small- to medium-size Ni-Cu-PGE deposits, and non-economic Nizhny Talnakh and Nizhny Noril'sk intrusions containing low grade disseminated Ni-Cu mineralization. **Results.** The analyzed samples are characterized by sulfide mineral assemblages, which contain mainly chalcopyrite, pyrrhotite, pentlandite, troilite, cubanite, and galena. Sulfide Ni-Cu-PGE ores of the Oktyabr'sk and Noril'sk-1 deposits, associated with economic intrusions (i.e., Kharaelakh and Noril'sk-1), demonstrate distinct $\delta^{65}\text{Cu}$ values from -2.42 to -1.40‰ and from -0.33 to 0.60‰ , respectively, which differ from the $\delta^{65}\text{Cu}$ values for sulfides from other Ni-Cu-PGE deposits and ore occurrences of the Noril'sk Province (data comprise 36 analyses). We note that the Cu-isotopic composition for sulfide minerals of massive and disseminated ores from the Kharaelakh intrusion has similar "isotope-light" characteristics. The most pronounced shift towards "isotope-heavy" copper was found in the horizon of low-sulfide PGE ores of the Noril'sk-1 intrusion ($\delta^{65}\text{Cu} = 0.51\text{--}0.60\text{‰}$). The isotopic composition of Zn ($\delta^{66}\text{Zn}$) for the studied sulfide samples from economic, subeconomic, and non-economic intrusions, with the exception of one sample ($0.73 \pm 0.14\text{‰}$), is characterized by similar "isotope-light" values (from -0.65 to -0.03‰). **Conclusions.** The revealed variations in the Cu- and Zn-isotopic composition in the studied sulfide assemblages from all types of ores reflect their primary characteristics; however, for the unique Oktyabr'sk Ni-Cu-PGE deposit, characterized by the most "isotopically light" composition of copper ($\delta^{65}\text{Cu} = -1.9 \pm 0.34\text{‰}$), the possibility of assimilation of an external source of Cu during the formation of sulfide Ni-Cu-PGE ores cannot be excluded. The combined use of Cu and Zn isotopic parameters proved to be a weakly informative predictive indicator for the detection of high-grade sulfide ores, primarily due to the similarity of the Zn isotopic composition of the ore material in all investigated intrusions of the Noril'sk Province.

Keywords: sulfide Ni-Cu-PGE ores, low-sulfide PGE ores, Cu-Zn isotope systems, source of ore material, formation conditions, Noril'sk Province

Funding information

This investigation was supported by Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation and was carried out as part of the state assignment of IGG UB RAS (No. 122022600107-1 and 123011800012-9) using the re-equipment and comprehensive development of the "Geoanalitik" shared research facilities of IGG UB RAS (Agreement No. 075-15-2021-680)

Acknowledgements

The authors are grateful to N.S. Chebykin and T.G. Okuneva for assistance during mineralogical and geochemical studies and anonymous reviewers for their constructive comments that led to improvement of the manuscript.

ВВЕДЕНИЕ

Сульфидные платиноидно-медно-никелевые месторождения Норильской провинции вмещают богатейшие комплексные руды на Земле, содержащие 15% земных ресурсов сульфидного Ni и 27% ресурсов Pd наряду с другими стратегическими металлами. По экспертным оценкам имеющихся и отработанных исторических запасов Норильских месторождений, общая стоимость всех металлов в ценах 2020 г. превышает 1.3 трл долл., где до-

ля платиноидов составляет около 60% (Barnes et al., 2020). Уникальные месторождения платиноидов, никеля и меди приурочены к трем промышленно-рудноносным интрузивам (Хараелакскому, Талнахскому и Норильск-1).

Происхождение интрузивов норильского типа объяснялось разными механизмами (моделями): дифференциацией одной магмы (Зенько, 1983), внедрением различных магм (Туганова, 1991; Czamanske et al., 1995), моделью магматических проводников (Радько, 1991; Naldrett et al.,

1995), корово-мантийным взаимодействием (Пушкарёв, 1997; Pushkarev, 1999), ассимиляцией (Li et al., 2003) и метасоматическими моделями для руд (Золотухин и др., 1975) и интрузивов (Зотов, 1979), и др. Ни одна из этих идей не является преобладающей, и даже соавторы придерживаются разных точек зрения (Czamanske et al., 1995; Arndt et al., 2003; Malitch et al., 2014; Sluzhenikin et al., 2014; и др.).

Появление новых методов исследований, прежде всего изотопно-геохимических, предопределяет необходимость постоянного совершенствования существующих моделей образования и критериев прогнозирования сульфидных ЭПГ-Cu-Ni месторождений. На основе Os-, Pb- и Cu-изотопных составов сульфидных ЭПГ-Cu-Ni руд признается важная роль промежуточных магматических камер при образовании ЭПГ-Cu-Ni месторождений Норильской провинции (Wooden et al., 1992; Walker et al., 1994; Arndt et al., 2003; Спиридонов, 2010; Malitch, Latypov, 2011; Malitch et al., 2014; Малич и др., 2018; Isotope Geology..., 2019). В отличие от большого числа опубликованных S-изотопных данных, которые позволили охарактеризовать различные источники вещества сульфидных ЭПГ-Cu-Ni руд (Grinenko, 1985; Гриненко, 1990; Wooden et al., 1992; Туганова, 2000; Li et al., 2003; Ripley et al., 2003, 2010; Ripley, Li, 2003, 2013; Malitch, Latypov, 2011; Малич и др., 2018; Isotope Geology..., 2019; и др.), изотопная систематика меди в сульфидном веществе интрузивов норильского типа до сих пор остается слабоизученной, а данные по изотопному составу цинка отсутствуют. Первые результаты изучения изотопного состава меди выявили значительные $\delta^{65}\text{Cu}$ вариации (от -2.3 до $+1.0\text{‰}$) в сульфидных рудах промышленно-рудноносных интрузивов провинции (Malitch et al., 2014). Дискретный характер изотопных составов меди и серы для сульфидных ЭПГ-Cu-Ni руд промышленно-рудноносных интрузивов использован (Malitch et al., 2018) в качестве нового изотопно-геохимического индикатора прогноза богатых руд при оценке оруденения в слабоизученных ультрамафит-мафитовых интрузивах Полярной Сибири.

Цель настоящей работы – исследование изотопного состава меди и цинка в различных сульфидных минералах из массивных и вкрапленных сульфидных ЭПГ-Cu-Ni и малосульфидных платиноидных руд Норильской провинции, вмещающей богатейшие комплексные месторождения платиноидов, никеля и меди. Выявленные изотопно-геохимические особенности сульфидов сопоставляются с таковыми некоторых других генетических типов рудных месторождений и глобальных резервуаров. Мы полагаем, что изотопно-геохимические особенности сульфидных ЭПГ-Cu-Ni и малосульфидных платиноидных руд Норильской провинции могут быть использованы при проведении поисково-оценочных работ и прогнозной оценке

сульфидного и малосульфидного типов оруденения в наиболее перспективных объектах Полярной Сибири.

КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИНТРУЗИВОВ, СУЛЬФИДНЫХ ЭПГ-CU-NI И МАЛОСУЛЬФИДНЫХ РУД И МЕСТОПОЛОЖЕНИЕ ОБРАЗЦОВ

Норильская провинция большинством отечественных и зарубежных исследователей (Добрецов, 1997; Pirajno, 2007; Богатилов и др., 2010; Добрецов и др., 2010; и др.) рассматривается как особая часть Сибирского гигантского траппового суперплюма, хотя прямая генетическая связь рудоносных норильских интрузивов с траппами для многих специалистов неочевидна. По данным О.А. Дюжикова с соавторами (1988), Норильский рудный район находится в западном окончании Енисейско-Оленёкского рудного пояса и приурочен к области тройного сочленения рифтов, обусловивших высокую степень флюидо-магматической проницаемости земной коры и эволюцию рудообразующих систем.

Геологическая позиция, петрологические особенности и рудоносность интрузивных образований Норильской провинции детально охарактеризованы в работах М.Н. Годлевского (1959), В.В. Золотухина с соавторами (1975), А.Д. Генкина с соавторами (1981), В.В. Дистлера с соавторами (1988), В.А. Люлько с соавторами (1994), В.В. Рябова с соавторами (2000), С.Ф. Служеникина (2000), Е.В. Тугановой (2000), Д.А. Додина (2002), А. Налдретта (Naldrett, 2004), А.П. Лихачева (2006), Н.А. Криволицкой (Krivolutskaia, 2016), В.А. Радько (2016), К.Н. Малича с соавторами (2018) и мн. др. (см. табл. 3.1 в (Малич и др., 2018)).

По степени перспективности на платиноидно-медно-никелевые руды ультрамафит-мафитовые интрузивы Норильской провинции выделяются в составе трех геолого-экономических типов: промышленно-рудноносного, вмещающего уникальные и крупные месторождения (Норильск-1, Талнахское и Октябрьское); рудоносного, с которым ассоциируют мелкие (резервные) месторождения с забалансовыми запасами сульфидных платиноидно-медно-никелевых руд (Зуб-Маркшейдерское, Черногорское, Имангдинское и Вологодчанское); слаборудоносного с Cu-Ni сульфидной минерализацией без платиноидов (интрузивы Нижнеталнахский, Нижненорильский, Зеленогневский и др.).

Геологическое положение исследованных нами ультрамафит-мафитовых интрузивов в пределах Норильской провинции показаны на рис. 1–3. Изотопно-геохимические результаты базируются на изучении сульфидного вещества из 1) уни-

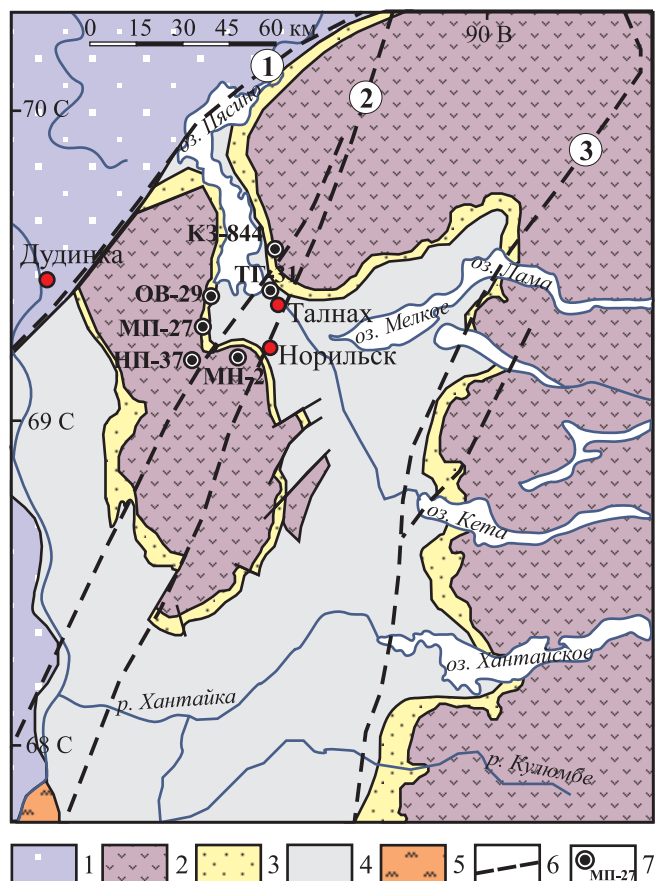


Рис. 1. Обзорная геологическая схема Норильской провинции с местоположением разведочных скважин, выбранных для изотопно-геохимических исследований ультрамафит-мафитовых интрузивов (составленная геологами ОАО “Норильскгеология”, упрощенная и частично измененная).

1 – мезозойско-кайнозойский комплекс рыхлых отложений; 2 – верхнепермско-нижнетриасовый вулканогенный (базальтоидный) комплекс; 3 – верхнепалеозойский (C_2 – P_2) комплекс терригенных отложений (тунгусская серия); 4 – нижнесреднепалеозойский комплекс аргилито-мергелево-карбонатных сульфатосодержащих отложений (C – D_3); 5 – верхнепротерозойские образования; 6 – зоны разломов: Северохараелакского (1), Норильско-Хараелакского (2), Имангдинско-Летнинского (3) и др.; 7 – расположение скважин с опорными разрезами ультрамафит-мафитовых интрузивов различных типов: промышленно-рудноносного (скв. КЗ-844 – Хараелакский, скв. МН-2 – Норильск-1), рудноносного (скв. ОВ-29 – Вологочанский, МП-27 – Зуб-Маркшейдерский), слаборудноносного (скв. ТГ-31 – Нижнеталнахский, НП-37 – Нижненорильский).

Fig. 1. Schematic geological map of the Noril'sk Province showing drill core locations of the studied mafic-ultramafic intrusions (modified after data by Noril'skgeologiya).

1 – Mesozoic and Cenozoic sedimentary rocks; 2 – Upper Permian – Lower Triassic volcanic rocks; 3 – Upper Paleozoic (C_2 – P_2) Tunguska Supergroup terrigenous rocks; 4 – Lower-Middle Paleozoic sulphate-bearing argillite-marl-carbonate sediments (C – D_3); 5 – Upper Proterozoic rocks;

6 – fault zones: North Kharaelakh (1), Noril'sk-Kharaelakh (2), Imangda-Letninsky (3) and others; 7 – location of drill holes with reference cross-sections of ultramafic-mafic intrusions: economic (drill hole K3-844 – Kharaelakh, МН-2 – Noril'sk-1), subeconomic (drill hole ОВ-29 – Vologochan, МП-27 – Zub-Marksheider), and non-economic (drill hole ТГ-31 – Nizhny Talnakh, НП-37 – Nizhny Noril'sk).

кальных ЭПГ-Cu-Ni месторождений Октябрьское и Норильск-1, ассоциирующих с *промышленно-рудноносными* интрузивами Хараелакский (скв. КЗ-844, рис. 3 и 4; рудник Октябрьский) и Норильск-1 (скв. МН-2, рис. 5), 2) крупных *резервных* ЭПГ-Cu-Ni месторождений, связанных с Зуб-Маркшейдерским (скв. МП-27) и Вологочанским (скв. ОВ-29) интрузивами, 3) *слаборудноносных* непромышленных Нижнеталнахского (скв. ТГ-31) и Нижненорильского (скв. НП-37) интрузивов Норильской провинции (табл. 1). Схемы отбора образцов, минералого-петрохимические и изотопно-геохимические особенности пород изученных интрузивов приведены более детально в наших работах (Malitch et al., 2010, 2013; Малич и др., 2010, 2018; Служеникин и др., 2020, 2023).

Изученные руды *промышленно-рудноносных* Хараелакского и Норильск-1 ультрамафит-мафитовых интрузивов представлены тремя главными типами.

Первый тип характеризуют массивные сульфидные ЭПГ-Cu-Ni руды Октябрьского месторождения, которое тяготеет к нижнему экзоконтакту Хараелакского интрузива (см. рис. 3). В западной части Хараелакской залежи Октябрьского месторождения в центральных частях (по латерали), а в разрезе в верхнем контакте залежи расположены руды с минералами группы халькопирита (талнахит, моихукит, путоранит) – 55–60 об. %, кубанитом – 10–15, пентландитом – 20–25, троилитом – до 5 и магнетитом – 5 об. %. Пегматоидные галенит-халькопиритовые (талнахитовые, борнитовые) массивные руды развиты в верхнем зальбанде залежей руд, богатых медью (шахта № 1 рудника Октябрьский).

Второй тип представлен вкрапленными рудами интрузивов Норильск-1 и Хараелак, расположенными в нижних частях интрузивов, сложенных ультраосновными породами (плагноклазсодержащими дунитами, верлитами) и различными разновидностями основных пород (габброидами, меланотроктолитами, габбро-троктолитами, плагнопироксенитами и др.) с такситовой текстурой (см. рис. 4 и 5).

Третий тип образует малосульфидный обогащенный платиноидами горизонт, приуроченный к лейкогаббро с линзами ультрамафитов и пород с такситовой текстурой в верхней части интрузива Норильск-1 (см. рис. 5). Для *рудноносных* Зуб-Маркшейдерского и Вологочанского ультрамафит-мафитовых интрузивов характерны вкраплен-

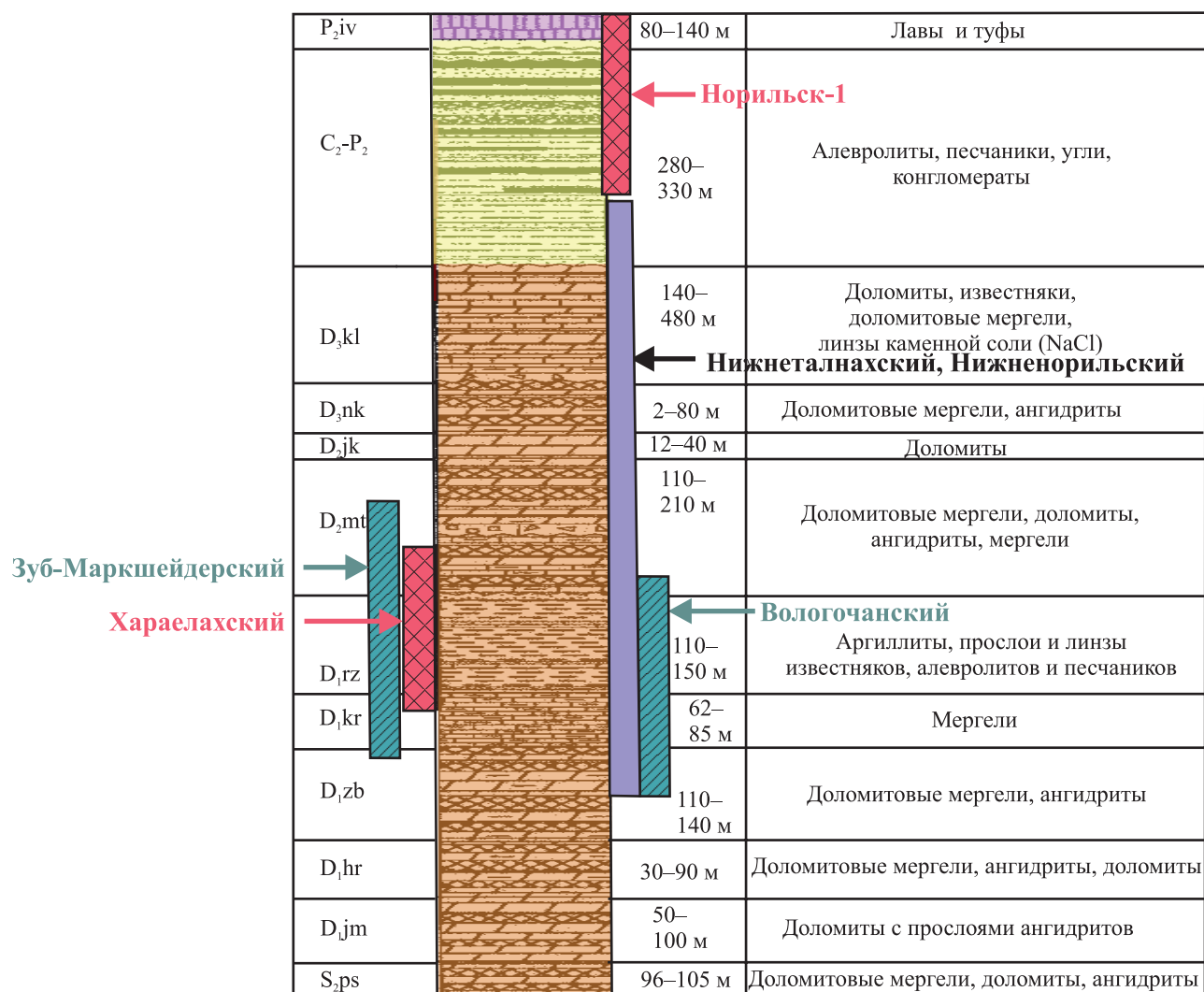


Рис. 2. Стратиграфический разрез, иллюстрирующий расположение различных рудоносных ультрамафит-мафитовых интрузивов Норильской провинции, по (Дюжиков и др., 1988; Czamanske et al., 1995).

Fig. 2. Stratigraphic section showing the positions of the economic, subeconomic and non-economic intrusions (modified after Dyuzhikov et al., 1988; Czamanske et al., 1995).

ные, реже прожилково-вкрапленные сульфидные ЭПГ-Cu-Ni руды, которые приурочены к средней и нижней частям разреза. Со слабурудоносными Нижнеталнахским и Нижненорильским мафит-ультрамафитовыми интрузивами связана рассеянная по всему разрезу медно-никелевая минерализация вкрапленного (редко шпирового) типа с некондиционными содержаниями меди и никеля и низкими концентрациями платиноидов (тысячные, реже, сотые доли г/т).

АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Химический состав минералов изучен с помощью рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) с использованием микроанализатора CAMECA SX-

100, оснащенного пятью волновыми спектрометрами в ЦКП “Геоаналитик”, ИГГ УрО РАН, г. Екатеринбург (оператор В.А. Булатов) и JXA-8200 JEOL ЦКП ИГЕМ-Аналитика (оператор С.Е. Борисовский). Анализ осуществлялся при ускоряющем напряжении 20 кВ, силе тока 20 нА, диаметре зонда 1 мкм. Время экспозиции на основные элементы составляло 10 с, на примесные – 20 с. В качестве стандартов использовались внутрилабораторные стандарты, по составу близкие к изучаемым минералам.

Методика определения $\delta^{65}\text{Cu}$ и $\delta^{66}\text{Zn}$ в сульфидах включала в себя растворение образцов, селективное хроматографическое выделение Cu и Zn из раствора с последующим определением изотопных отношений $^{65}\text{Cu}/^{63}\text{Cu}$ и $^{66}\text{Zn}/^{64}\text{Zn}$ на мультикол-

ЮЗ

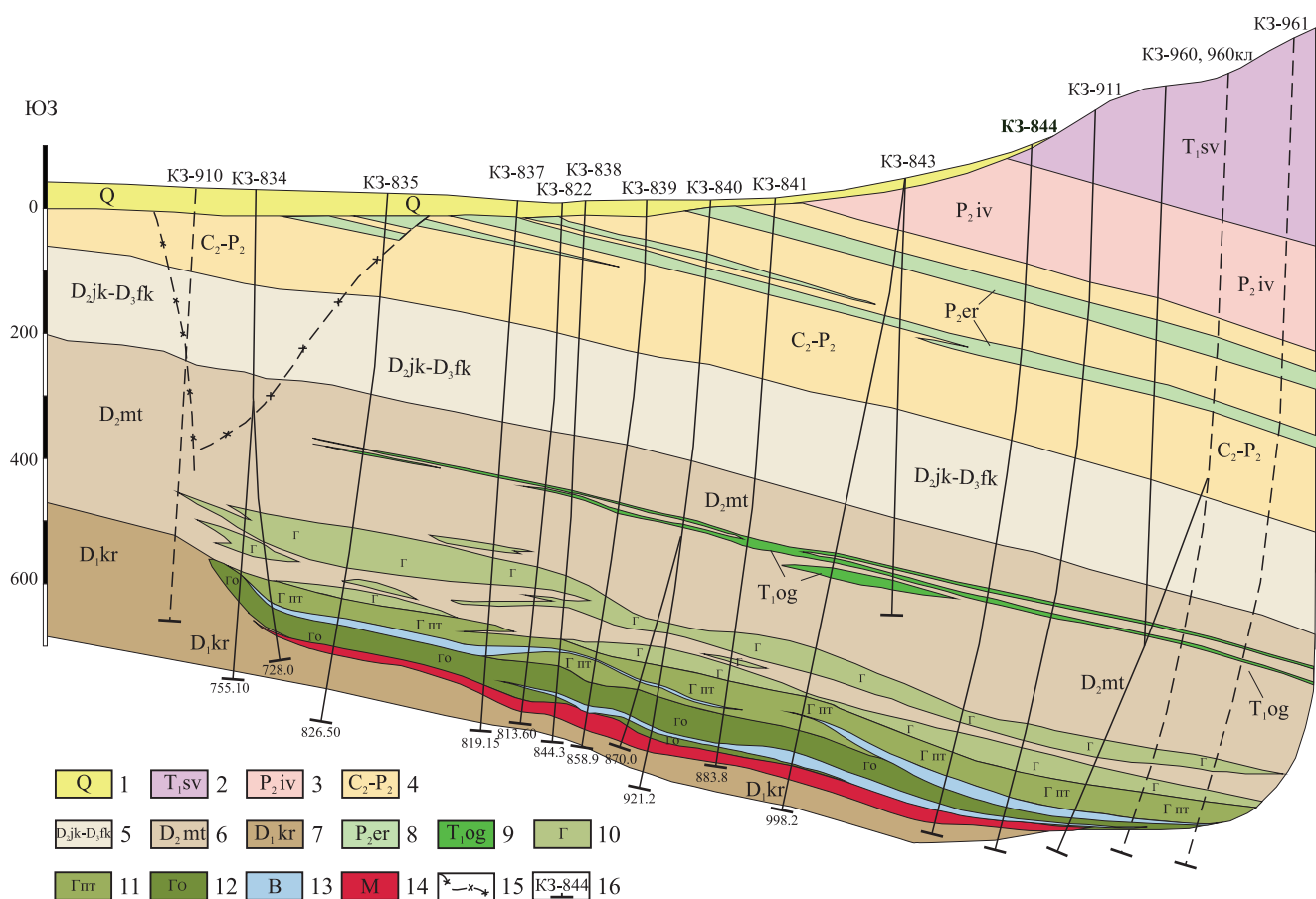


Рис. 3. Положение Хараелахского интрузива в разрезе западного участка Октябрьского месторождения (разрез составлен геологами ООО “Норильскгеология”).

1–7 – стратифицированные образования: 1 – четвертичные отложения; 2 – Сыверминская свита T_{sv}; 3 – Ивакинская свита P_{iv}; 4 – тунгусская серия (терригенно-осадочные угленосные породы C₂-P₂); 5–7 – терригенно-осадочные и сульфатно-карбонатные отложения D: 5 – Фокинская свита D₃fk – Юктинская свита D₂jk, 6 – Мантуровская свита D₂mt, 7 – Курейская свита D₁kr; 8–14 – интрузивные образования: 8 – Ергалахский интрузивный комплекс P_{er}, 9 – Оганерский интрузивный комплекс T_{og}; 10–14 – породы и руды Хараелахского интрузива: 10 – безоливиное габбро, 11 – ультраосновные породы, 12 – оливиновое габбро и троктолиты, 13 – вкрапленные сульфидные руды в интрузивных породах, 14 – массивные сульфидные руды; 15 – разломы; 16 – скважины детальной разведки.

Fig. 3. Geological cross-section of the Kharaelakh intrusion in the western part of the Oktyabr'sk deposit (compiled by geologists of Noril'skgeologiya).

1–7 – stratified formations: 1 – Quaternary deposits; 2 – Syverminsky suite T_{sv}; 3 – Ivakinsky suite P_{iv}; 4 – Tunguska series: terrigenous-sedimentary coal-bearing rocks C₂-P₂; 5–7 – terrigenous-sedimentary and sulphate-carbonate deposits D: 5 – Fokinsky suite, D₃fk – Yuktinsky suite, D₂jk, 6 – Manturovsky suite D₂mt, 7 – Kureysky suite D₁kr; 8–14 – intrusive formations: 8 – Ergalakhsky intrusive complex P_{er}; 9 – Oganersky intrusive complex T_{og}; 10–14 – rocks and ores of the Kharaelakh intrusion: 10 – olivine-free gabbro, 11 – ultramafic rocks, 12 – olivine gabbro and troctolites, 13 – disseminated sulfide ores in intrusive rocks, 14 – massive sulfide ores; 15 – faults; 16 – drill holes of detailed exploration.

латорном масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой Neptune Plus (Thermo Fisher). Детальное описание методики представлено в работе (Okuneva et al., 2022); разложение, хроматографическое выделение и измерение изотопных отношений проводились в блоке чистых помещений (класс 1000, ИСО 6) и ламинарных боксах (класс 100, ИСО 5). Все использованные реагенты и вода дважды очищались при температуре ниже темпе-

ратуры кипения в аппаратах фирмы Savillex. Стадия разложения сульфидов (0.00n мг) включала в себя их растворение в смеси кислот в соотношении HCl : HNO₃ = 3 : 1. Для хроматографического выделения чистой фракции Cu и Zn использовалась ионообменная смола AG MP-1 (Bio-Rad inc.) (Maréchal, Albarède, 2002), загруженная в полипропиленовые колонки диаметром 0.7 см, высотой 5 см и объемом 1.9 см³ (Triskem inc.). Испол-

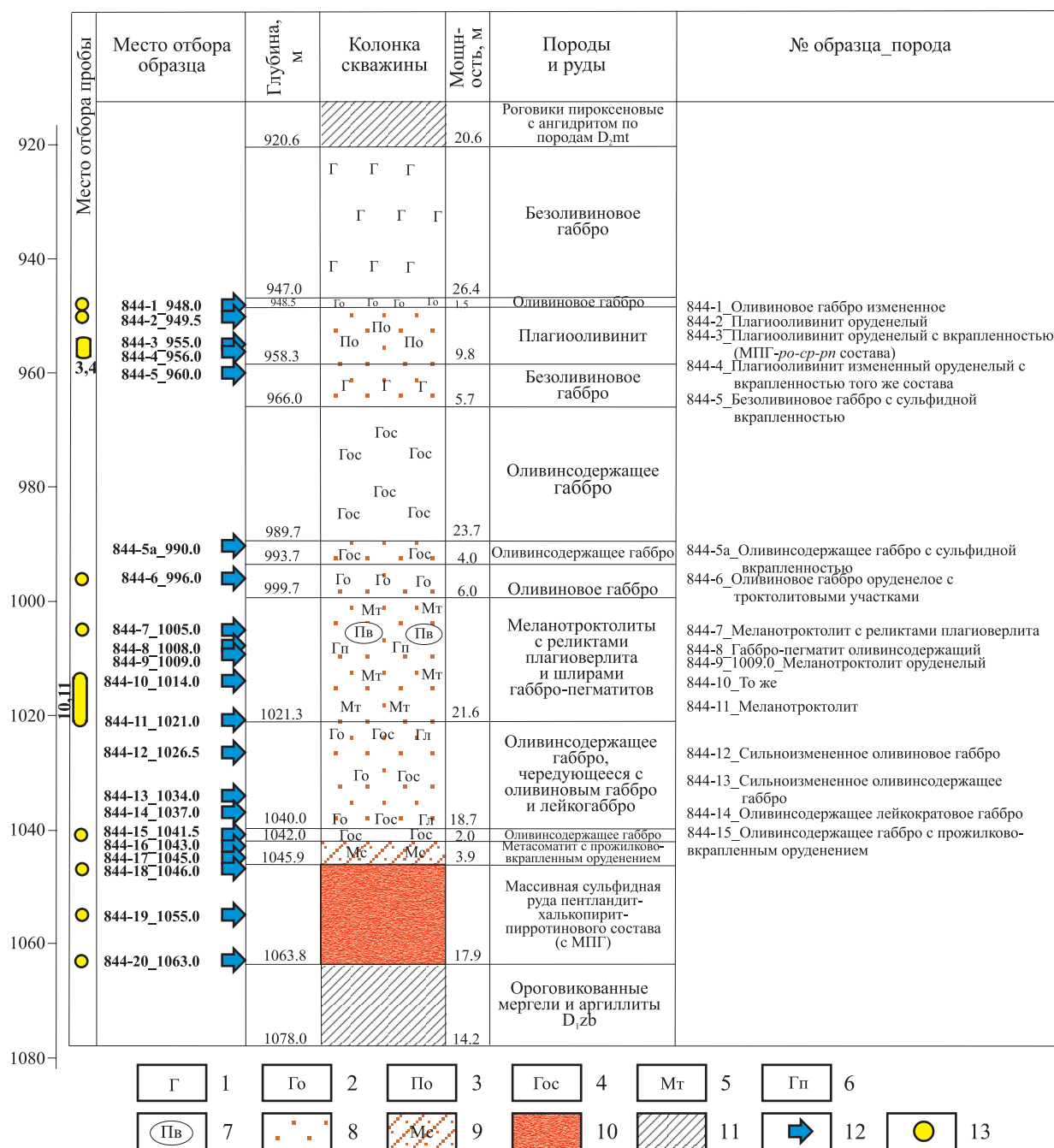
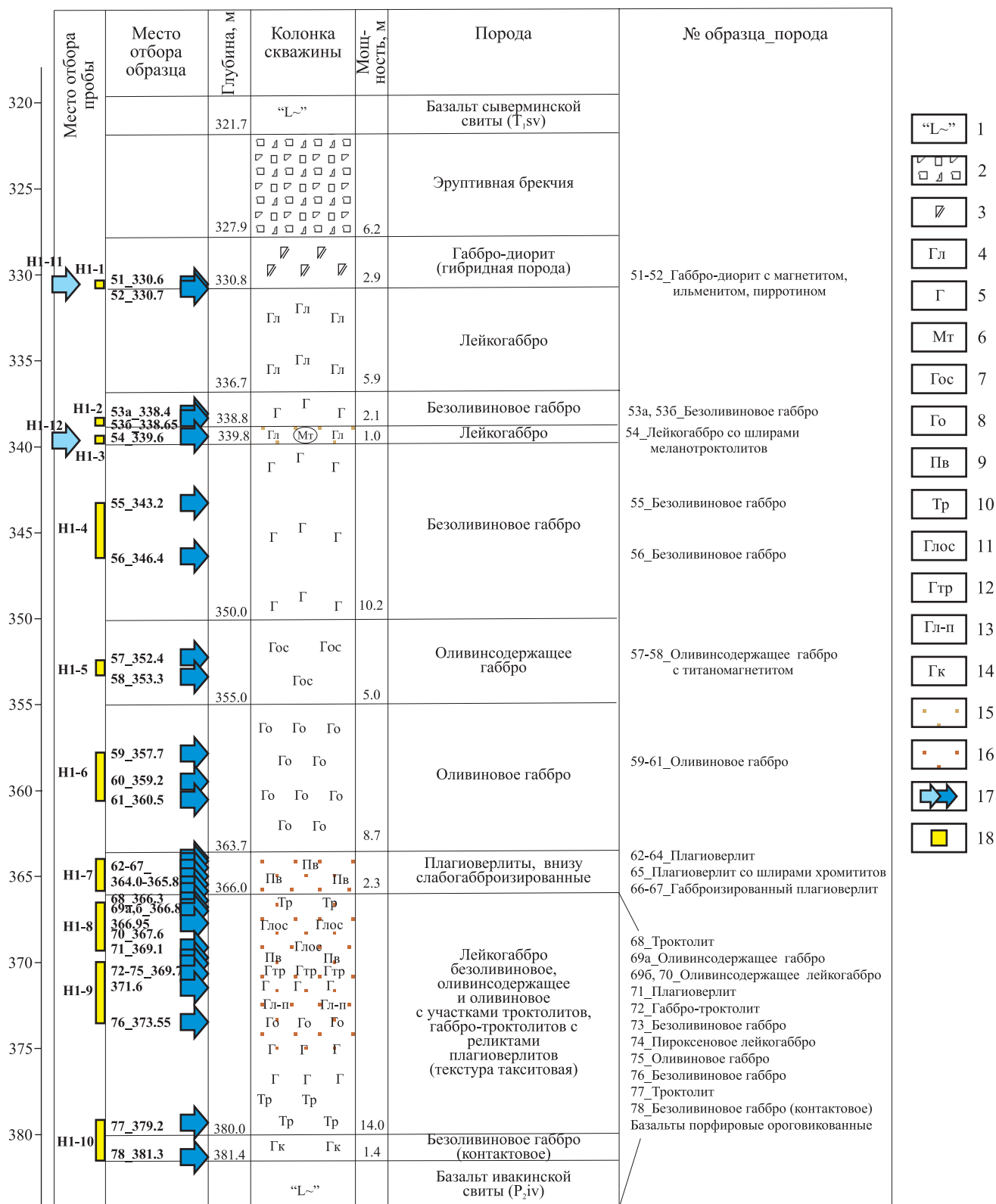


Рис. 4. Схема расположения образцов и минералого-технологических проб для минералого-геохимических и изотопных исследований по разрезу Хараелакского интрузива (скв. КЗ-844).

1 – безоливиновое габбро, 2 – оливиновое габбро, 3 – плагиооливинит, 4 – оливинсодержащее габбро, 5 – меланократовый троктолит, 6 – габбро-пегматит, 7 – реликты плагиоверлита, 8 – вкрапленные руды пентландит-халькопирит-пирротинового состава с МПГ, 9 – метасоматит с прожилково-вкрапленной минерализацией, 10 – массивные руды пентландит-халькопирит-пирротинового состава с МПГ, 11 – ороговикованные мергели и аргиллиты, 12 – место отбора образца на разрезе, 13 – место отбора минералого-технологической пробы для изотопного изучения.

Fig. 4. Cross-section of the Kharaelakh intrusion showing lithological units and location of the studied samples in rocks of the drill hole K3-844.

1 – olivine-free gabbro, 2 – olivine gabbro, 3 – plagioclase-bearing dunite, 4 – olivine-bearing gabbro, 5 – melanocratic troctolite, 6 – gabbro-pegmatite, 7 – relics of plagioclase-bearing wehrlite, 8 – disseminated ores of pentlandite-chalcocopyrite-pyrrhotite composition with PGM, 9 – metasomatite with veinlet-disseminated mineralization, 10 – massive ores of pentlandite-chalcocopyrite-pyrrhotite composition with PGM, 11 – hornfelsed marls and argillites, 12 – sampling site in the cross-section, 13 – placement site of samples for isotopic study.



17 – место образца на разрезе, 18 – место на разрезе минералого-технологической пробы для изотопно-геохимического изучения.

Fig. 5. Cross-section of the Noril’sk-1 intrusion showing lithological units and location of the studied samples in rocks of the drill hole MN-2.

1 – aphyric basalt, 2 – eruptive breccia, 3 – gabbro-diorite, 4 – leucogabbro, 5 – olivine-free gabbro, 6 – melanocratic troctolite, 7 – olivine-bearing gabbro, 8 – olivine gabbro, 9 – plagioclase-bearing wehrlite, 10 – troctolite, 11 – leucogabbro olivine-bearing, 12 – gabbro-troctolite, 13 – pyroxene-bearing leucogabbro, 14 – contact gabbro, 15 – low-sulfide horizon with PGM, 16 – disseminated sulfide mineralization of pentlandite-chalcopyrite-pyrrhotite composition with PGM, 17 – sample location in the geological section, 18 – location of the mineral-technological sample for isotope-geochemical study.

Таблица 1. Сводная информация по изученным образцам из различно рудоносных ультрамафит-мафитовых интрузивов Норильской провинции

Table 1. Summary information for the investigated samples from ultramafic-mafic intrusions of the Noril’sk Province

Скважина, рудник	Интрузив	Тип интрузива
КЗ-844, Октябрьский	Хараелахский	Промышленно-рудоносные (содержащие сульфидные массивные, прожилково-вкрапленные и вкрапленные ЭПГ-Cu-Ni руды и малосульфидные ЭПГ руды уникальных и крупных ЭПГ-Cu-Ni месторождений)
МН-2	Норильск-1	
ОВ-29	Вологочанский	Рудоносные (содержащие вкрапленные сульфидные ЭПГ-Cu-Ni руды средних и мелких ЭПГ-Cu-Ni месторождений, находящихся в резерве)
МП-27	Зуб-Маркшейдерский	
ТГ-31	Нижнеталнахский	Слаборудоносные (с вкрапленной непромышленной Cu-Ni минерализацией)
НП-37	Нижненорильский	

зованная нами оптимизированная схема хроматографического выделения аналитов описана в работе (Okuneva et al., 2022).

Измерение изотопных отношений $^{65}\text{Cu}/^{63}\text{Cu}$ и $^{66}\text{Zn}/^{64}\text{Zn}$ проводилось методом бреккетинга (“окаймляющего стандарта”) с использованием стандартных растворов изотопного состава Cu и Zn – NIST SRM 976 и JMC-Lyon на масс-спектрометре Neptune Plus, оборудованном автоматической системой ввода образцов ASX 110 FR (Teledyne CETAC) и микроаспылителем PFA (50 мкл/мин), подключенным к кварцевой распылительной камере. Измерения выполнялись в следующей последовательности: холостой опыт (3%-й раствор HNO_3) → стандарт NIST SRM 976 (или JMC-Lyon) → исследуемый образец (его 3%-й азотнокислый раствор) → стандарт NIST SRM 976 (или JMC-Lyon). Каждое единичное измерение изотопного состава Cu и Zn состояло из 60 циклов, полученных при 8-секундной интеграции с измерением базовой линии в течение 30 с. Точность определения значений $\delta^{65}\text{Cu} = [(^{65}\text{Cu}/^{63}\text{Cu})_{\text{обр}}/(^{65}\text{Cu}/^{63}\text{Cu})_{\text{std}} - 1] \times 1000\text{‰}$ и $\delta^{66}\text{Zn} = [(^{66}\text{Zn}/^{64}\text{Zn})_{\text{обр}}/(^{66}\text{Zn}/^{64}\text{Zn})_{\text{std}} - 1] \times 1000\text{‰}$ составляла $\pm 0.14\text{‰}$ (2 σ). Для контроля оценки правильности и долговременной воспроизводимости определения $\delta^{65}\text{Cu}$ и ^{66}Zn использовались международные стандартные образцы горных пород USGS AGV-2 и BHVO-2. Измеренные

значения $\delta^{65}\text{Cu}$ и $\delta^{66}\text{Zn}$ для AGV-2 составили 0.14 ± 0.04 (2 SD, n = 5), 0.20 ± 0.08 (2 SD, n = 8) и для BHVO-2 – $0.12 \pm 0.04\text{‰}$ (2 SD, n = 5), $0.21 \pm 0.06\text{‰}$ (2 SD, n = 8), что удовлетворительно согласуется с данными, представленными в базе (GeoRem database).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Минеральные ассоциации сульфидных типов руд

Массивные руды характеризуются минеральной ассоциацией сульфидов системы Fe–Ni–Cu–S. Большинство рудных тел образованы пирротиновыми рудами, состоящими из минералов группы пирротина (60–65 об. %), халькопирита (15–20 об. %), пентландита (10–15 об. %) и магнетита (≈ 5 об. %). Минеральная зональность пирротиновых руд проявляется в относительном увеличении в приконтактных и периферийных участках доли халькопирита (до 30–40 об. %) и сменой гомогенного гексагонального пирротина (Po_h), сростков троилита (Tr) и гексагональным пирротинном (Po_h), моноклинным пирротинном (Po_m) или сростками его с гексагональной разновидностью пирротина. В изученных образцах существенно пирротиновых массивных ЭПГ-Cu-Ni руд Хараелах-

ского интрузива (скв. КЗ-844; табл. 2, рис. 6а, б) пирротин преобладает над халькопиритом (*Ccp*), кубанитом (*Cbn*), пентландитом (*Pn*), троилитом (*Tr*), а также магнетитом (*Mag*). Среди минералов платиновой группы (МПГ), являющихся второстепенными составляющими руд, преобладают Pd-Pt сульфиды (брэггит и куперит), сперрит (PtAs₂) и минералы ряда атокит (Pd₃Sn)–рустенбергит (Pt₃Sn). Другие минеральные ассоциации сульфидов массивных руд Октябрьского месторождения (см. табл. 2, рис. 6в–д) представлены талнахитом (*Tlk*), кубанитом (*Cbn*), галенитом (*Gn*) и халькопиритом (*Ccp*). Галенит образует симплектитовые сростки с рудообразующими минералами – халькопиритом и талнахитом. Кроме данных минералов, в рудах присутствует пентландит (*Pn*) и реже (в халькопиритовых и талнахитовых разновидностях) – кубанит и пирротин. Минеральная ассоциация руд также включает в себя фрүдит, алтаит, аргентопентландит, паркерит, джерфшерит, гессит, алтаит, станнин, теллуrowисмутиды, маухерит, брейтгауптит и др.

Вкрапленные сульфидные ЭПГ-Cu-Ni руды промышленно-рудноносных интрузивов обычно обнаруживают зональность. В идеальном случае она выражается в смене низкосернистых парагенезисов сульфидов (*Tr* + *Cub* + железистый пентландит

(*Pn^{Fe}*) + *Tlk*; *Po_h* + *Cbn* + *Pn^{Fe}* + *Cp*), приуроченных к средним по мощности частям ультраосновного горизонта, вверх и вниз по разрезу все более высокосернистыми ассоциациями (*Po_h* + *Pn* + *Ccp*; *Po_h* + *Po_m* + *Pn* + *Ccp*; *Po_m* + никелевый пентландит (*Pn^{Ni}*) + *Ccp*; *Pn^{Ni}* + *Ccp*). В основном же сульфиды во вкрапленных рудах представлены парагенезисами *Po_h* + *Pn^{Fe}* + *Cbn* + *Ccp*; *Po_h* + *Po_m* + *Pn* + *Ccp*; *Po_m* + *Pn^{Ni}* + *Ccp* и редко, в основном в рудах месторождения Норильск-1, – *Pn^{Ni}* + *Cp*. Во вкрапленных рудах интрузива Норильск-1, особенно в нижних частях, первичные сульфиды в сильной степени замещены вторичными минералами. По пирротину развиваются никелевый и кобальтовый пирит, агрегат пирита (*Py*), марказита (*Mrc*) и магнетита. Пентландит замещается миллеритом (*Mr*).

Для малосульфидного ЭПГ горизонта характерна ассоциация с хромитом и Cl-F-OH-содержащими минералами (пренитом, флогопитом, биотитом, амфиболами, хлоритом, анальцимом, цеолитами, апатитом). Количество сульфидов обычно не превышает 3% от объема породы. Сульфиды представлены высокосернистыми парагенезисами – *Po_m* + *Pn^{Ni}* + *Ccp* (рис. 6е); *Pn^{Ni}* + *Ccp*; *Mr* + *Py* + *Cp*. Первичные сульфиды замещены пиритом, марказитом, миллеритом и вторичными силикатами. МПГ представлены сульфидами, теллуридами, теллури-

Таблица 2. Изотопные составы меди ($\delta^{65}\text{Cu}$, ‰) и цинка ($\delta^{66}\text{Zn}$, ‰) для вкрапленных и массивных сульфидных ЭПГ-Cu-Ni и малосульфидных ЭПГ руд месторождений Октябрьское и Норильск-1

Table 2. Copper ($\delta^{65}\text{Cu}$, ‰) and zinc ($\delta^{66}\text{Zn}$, ‰) isotopic compositions of disseminated and massive sulfide PGE-Cu-Ni and low-sulfide PGE ores of the Oktyabr'sk and Noril'sk-1 deposits

№ обр., рис.	Глубина, м	Тип сульфидных руд	Минеральная ассоциация	$\delta^{65}\text{Cu}$, ‰	$\delta^{66}\text{Zn}$, ‰
844-3	956.0	Вкрапленный	<i>Po</i> + <i>Pn</i> + <i>Ccp</i>	-2.07	-0.68
844-6	996.0	—	<i>Po</i> + <i>Pn</i> + <i>Ccp</i>	-1.40	-0.18
844-7	1005.0	—	<i>Po</i> + <i>Pn</i> + <i>Ccp</i>	-2.42	-0.47
844-11	1014.0	—	<i>Po</i> + <i>Pn</i> + <i>Ccp</i>	-1.88	-0.34
844-18	1046.0	Массивный	<i>Po</i> + <i>Pn</i> + <i>Ccp</i>	-2.07	-0.39
844-19, рис. 4а, б	1055.0	—	<i>Po</i> + <i>Pn</i> + <i>Ccp</i>	-1.85	-0.03
844-20	1063.0	—	<i>Po</i> + <i>Pn</i> + <i>Ccp</i>	-1.68	-0.50
1-1, рис. 4в	—	—	<i>Tlk</i> + <i>Ccp</i> + <i>Gn</i> + <i>Pn</i>	-1.58	-0.37
1-2	—	—	<i>Ccp</i> + <i>Cbn</i> + <i>Pn</i>	-1.50	-0.27
1-3, рис. 4г	—	—	<i>Ccp</i> + <i>Cbn</i> + <i>Pn</i> + <i>Gn</i>	-2.19	-0.36
1-4, рис. 4д	—	—	<i>Ccp</i> + <i>Gn</i>	-2.26	-0.15
H1-11	330.6	Вкрапленный	<i>Py</i>	0.54	-0.15
H1-2	338.4	—	<i>Po</i> + <i>Ccp</i> + <i>Pn</i>	0.56	-0.36
H1-3*	339.4	—	<i>Pn</i> + <i>Mr</i> + <i>Ccp</i> + <i>Py</i>	0.51	-0.51
H1-12*, рис. 4е	339.3	—	<i>Po</i> + <i>Ccp</i> + <i>Pn</i>	0.60	-0.21
H1-6	359.0	—	<i>Po</i> + <i>Ccp</i>	-0.33	-0.25
H1-7	365.0	—	<i>Po</i> + <i>Pn</i> + <i>Ccp</i>	0.20	0.73
H1-10	380.0	Вкрапленный	<i>Po</i> + <i>Pn</i> + <i>Ccp</i> + <i>Py</i>	-0.19	-0.40

Примечание. *Образцы H1-3 и H1-12 характеризуют малосульфидные руды в верхней части интрузива Норильск-1. *Po* – пирротин, *Pn* – пентландит, *Ccp* – халькопирит, *Tlk* – талнахит, *Gn* – галенит, *Cbn* – кубанит, *Mr* – миллерит, *Py* – пирит.

Note. *Samples H1-3 and H1-12 characterize PGE-rich low-sulfide ores in the upper part of the Noril'sk-1 intrusion. *Po* – pyrrhotite, *Pn* – pentlandite, *Ccp* – chalcopyrite, *Tlk* – talnakhite, *Gn* – galena, *Cbn* – cubanite, *Mr* – millerite, *Py* – pyrite.

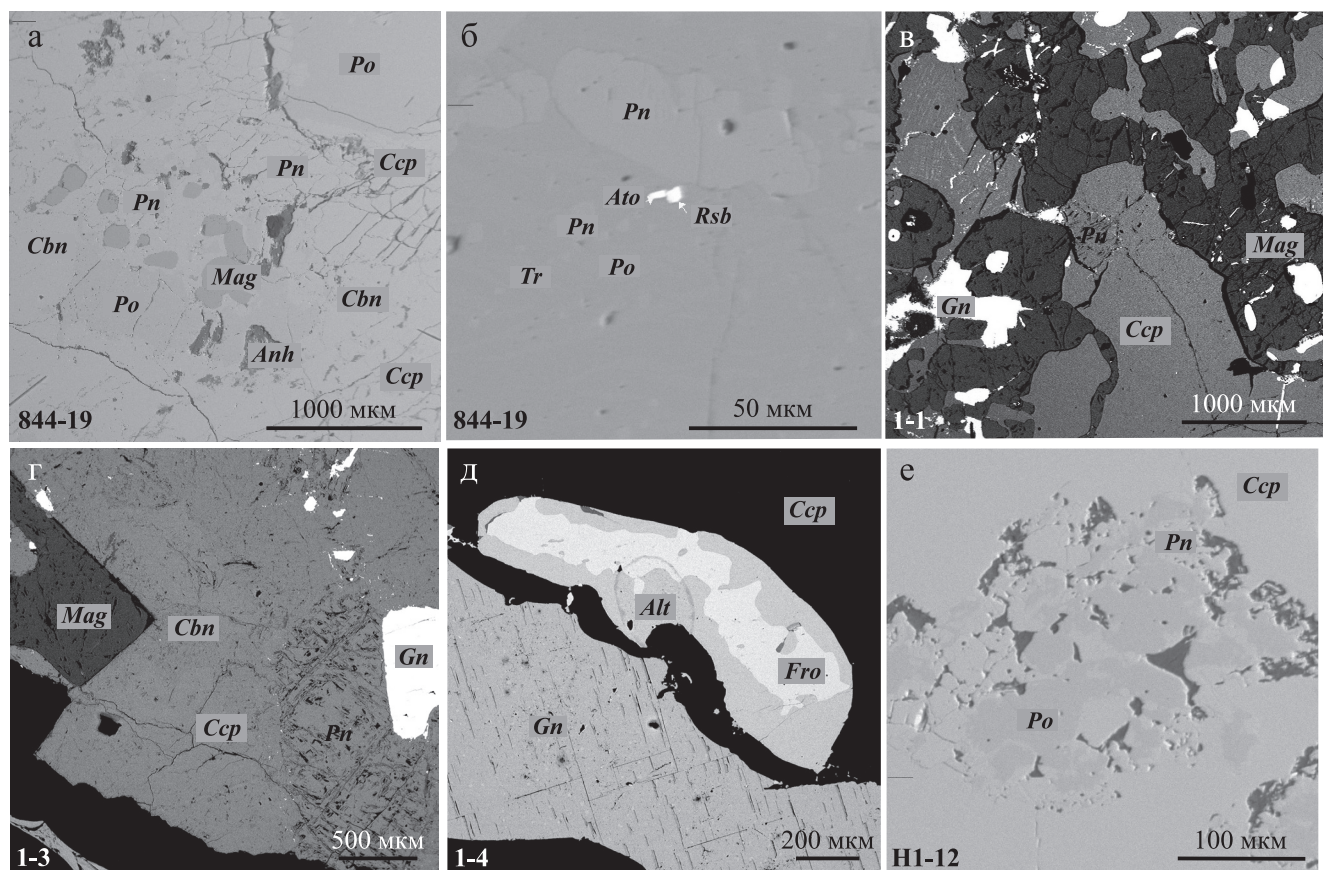


Рис. 6. Примеры минеральных ассоциаций в массивных сульфидных ЭПГ-Cu-Ni рудах Октябрьского месторождения (а-д) и малосульфидных ЭПГ рудах месторождения Норильск-1 (е).

а, б – обр. 844-19, в – обр. 1-1, г – обр. 1-3, д – обр. 1-4, е – обр. H1-12. Изображения в обратно-рассеянных электронах с вещественным контрастом. *Po* – пирротин, *Pn* – пентландит, *Ccp* – халькопирит, *Cbn* – кубанит, *Tr* – троилит, *Gn* – галенит, *Ato* – атокит, *Rsb* – рустенбергит, *Alt* – алтаит, *Fro* – фрудит, *Mag* – магнетит, *Anh* – ангидрит.

Fig. 6. Examples of mineral assemblages from massive sulfide Ni-Cu-PGE ores of the Oktyabr'sk deposit (a-e) and low-sulfide PGE ores of the Norilsk-1 deposit (f).

а, б – sample 844-19, в – sample 1-1, г – sample 1-3, д – sample 1-4, е – sample H1-12. Back-scattered electron images. *Po* – pyrrhotite, *Pn* – pentlandite, *Ccp* – chalcopyrite, *Cbn* – cubanite, *Tr* – troilite, *Gn* – galena, *Ato* – atokite, *Rsb* – rustenbergite, *Alt* – al-taite, *Fro* – froodite, *Mag* – magnetite, *Anh* – anhydrite.

висмутидами, станнидами, стибнидами, арсенидами и Pt-Fe сплавами.

Для вкрапленных сульфидных ЭПГ-Cu-Ni руд Зуб-Маркшейдерского и Вологодчанского интрузивов характерно несколько минеральных ассоциаций сульфидов. В щелочных метасоматитах и габбро-диоритах Зуб-Маркшейдерского интрузива сульфиды образованы ассоциациями $Pu + Mlr + Csp$, $Pu + \text{сфалерит} (Sp) + Ccp$, $Pu + Mrc + Ccp$. Ассоциации $Tr + Po_h + Pn^{Fe} + Cbn + Ccp \pm Tln \pm \text{путоранит}$ и $Po_h^{Fe} + Pn^{Fe} + Ccp$ характерны для руд в ультрамафитах и троктолитах Зуб-Маркшейдерского и Вологодчанского интрузивов. С троилитом ассоциирует железистый пентландит (до 41 мас. % Fe), а с гексагональным пирротинном – пентландит, в котором содержание железа и никеля примерно одина-

ковое (Служеникин и др., 2020). Минералы группы халькопирита представлены халькопиритом, железистым халькопиритом, путоранитом и талнахитом, составляя в этих рудах 10–30 об. % от всех сульфидов. В нижних частях основных рудных горизонтов появляется ассоциация сульфидов с моноклинным пирротинном.

Сульфидная Cu-Ni минерализация слабородносных Нижнеталнахского и Нижненорильского интрузивов характеризуется тремя минеральными ассоциациями: 1) пирротин гексагональный + халькопирит + пентландит; 2) троилит $\pm$ пирротин гексагональный + Fe-пентландит + Fe-халькопирит (путоранит) $\pm$ кубанит; 3) пирротин моноклинный + халькопирит + Ni-пентландит + сфалерит. Первая ассоциация свойственна для

верхних частей интрузивов, вторая – для пород богатых оливином и третья – для нижних эндоконтактов массивов.

Си-изотопные характеристики сульфидных руд

Изотопные составы меди в образцах сульфидных ЭПГ-Cu-Ni и малосульфидных платиноидных руд, ассоциирующих с различно рудоносными интрузивами Норильской провинции, приведены в табл. 2–5 и рис. 7. Все проанализированные образцы имеют значения $\delta^{65}\text{Cu}$ в диапазоне от -2.42 до $+0.60\text{‰}$.

Промышленно-рудоносные интрузивы. Массивные и вкрапленные сульфидные руды Октябрьского месторождения, ассоциирующие с Хараелахским интрузивом, обладают сходными “изотопно-легкими” характеристиками ($\delta^{65}\text{Cu}$ от -2.26 до -1.5 и от -2.42 до -1.40‰ соответственно; см. табл. 2, рис. 7). У массивных руд среднее значение $\delta^{65}\text{Cu} = -1.88\text{‰}$ и стандартное отклонение (CO) 0.30‰ ; отметим сходство изотопного состава меди для образцов массивных сульфидных ЭПГ-Cu-Ni руд Октябрьского месторождения (см. табл. 3), представленных пирротинном, халькопиритом и пентландитом (скв. КЗ-844: обр. 844-18, 844-19, 844-20) и для образцов, состоящих из минеральных ассоциаций халькопирита, кубанита, галенита, пентландита и некоторых других минералов (шахта № 1 рудника Октябрьский: обр. 1-1, 1-2, 1-3, 1-4). Значение $\delta^{65}\text{Cu}$ для сульфидного вещества вкрапленных руд Хараелахского интрузива в пределах погрешности идентично таковому массивных руд ($\delta^{65}\text{Cu} = -1.94 \pm 0.43$ и $-1.88 \pm 0.30\text{‰}$ соответственно; см. табл. 3). По изотопному составу меди сульфидные и малосульфидные руды месторождения

Норильск-1 (см. табл. 2 и 3, рис. 7), ассоциирующего с одноименным интрузивом, значительно отличаются от руд Октябрьского месторождения, характеризующаяся диапазоном значений $\delta^{65}\text{Cu}$ от -0.33 до $+0.6\text{‰}$ и средним значением $\delta^{65}\text{Cu}$ 0.27‰ при CO 0.39‰ ($n = 7$), с максимальным фактором “утяжеления” в горизонте малосульфидных руд ($\delta^{65}\text{Cu}$ от 0.51 до 0.60‰ и средним значением $\delta^{65}\text{Cu}$ $0.56 \pm 0.06\text{‰}$).

Рудоносные интрузивы. Образцы вкрапленных сульфидных руд Вологодчанского интрузива обладают значением $\delta^{65}\text{Cu}$ в диапазоне от -1.03 до -0.17‰ со средним значением -0.58‰ и CO 0.43‰ (см. табл. 4 и 5, рис. 7). Вкрапленные руды Зуб-Маркшейдерского интрузива обладают незначительными вариациями изотопного состава меди ($\delta^{65}\text{Cu}$ от 0.04 до 0.09‰) со средним значением $\delta^{65}\text{Cu}$ 0.07‰ и CO 0.03‰ (см. табл. 4 и 5, рис. 7), которые отличны от таковых Вологодчанского интрузива, а также других месторождений Норильской провинции.

Слаборудоносные интрузивы. Для образцов Нижнеталнахского интрузива выявлены значения $\delta^{65}\text{Cu}$ от -1.33 до -0.72‰ со средним $\delta^{65}\text{Cu}$ -1.05‰ и CO 0.25‰ (см. табл. 4 и 5, рис. 7), что близко к аналогичным значениям $\delta^{65}\text{Cu}$ для сульфидной минерализации Нижненорильского интрузива ($\delta^{65}\text{Cu}$ от -1.28 до -0.42‰ со средним $\delta^{65}\text{Cu}$ $-0.69 \pm 0.33\text{‰}$ ($n = 6$) (см. табл. 4 и 5, рис. 7).

Таким образом, большинство образцов из рудоносного Вологодчанского и слаборудоносных Нижнеталнахского и Нижненорильского интрузивов характеризуются значениями $\delta^{65}\text{Cu}$ в интервале от -1.33 до -0.17‰ , тогда как вкрапленные сульфидные руды Зуб-Маркшейдерского рудоносного интрузива обладают более узким диапазоном значе-

Таблица 3. Сравнительная характеристика изотопных составов меди для вкрапленных и массивных сульфидных ЭПГ-Cu-Ni и малосульфидных ЭПГ руд месторождений Октябрьское и Норильск-1

Table 3. Average copper and zinc isotopic characteristics of massive and disseminated sulfide Ni-Cu-PGE and PGE-rich low-sulfide ores at Oktyabr'sk and Noril'sk-1

Месторождение, интрузив	Тип руд	$\delta^{65}\text{Cu}$, ‰					$\delta^{66}\text{Zn}$, ‰				
		Mean	Min	Max	CO	n	Mean	Min	Max	CO	n
Октябрьское, Хараелахский	Вкрапленные (C)	-1.94	-2.42	-1.40	0.43	4	-0.42	-0.68	-0.18	0.21	4
	Массивные (Po)	-1.87	-2.07	-1.68	0.20	3	-0.31	-0.50	-0.03	0.25	3
	Массивные (Cr)	-1.88	-2.26	-1.50	0.40	4	-0.29	-0.37	-0.15	0.10	4
	Массивные (Po и Cr)	-1.88	-2.26	-1.50	0.30	7	-0.30	-0.50	-0.03	0.16	7
	Вкрапленные и массивные	-1.90	-2.42	-1.40	0.33	11	-0.34	-0.68	-0.03	0.18	11
Норильск-1	Вкрапленные (C)	0.16	-0.33	0.56	0.41	5	-0.29	-0.40	-0.15	0.11	4
	Вкрапленные (MC)	0.56	0.51	0.60	0.06	2	-0.36	-0.51	-0.21	0.21	2
	Вкрапленные (C и MC)	0.27	-0.33	0.60	0.39	7	-0.31	-0.51	-0.15	0.13	6

Примечание. Mean – среднее, min – минимальное значение, max – максимальное значение, CO – стандартное отклонение, n – количество анализов. C – сульфидные ЭПГ-Cu-Ni, MC – малосульфидные платиноидные.

Note. Mean – average value, min – minimum value, max – maximum value, CO – standard deviation, n – number of analyses. C – sulfide PGE-Cu-Ni, MS – low sulfide PGE.

Таблица 4. Изотопные составы меди ($\delta^{65}\text{Cu}$, ‰) и цинка ($\delta^{66}\text{Zn}$, ‰) для вкрапленных сульфидных ЭПГ-Cu-Ni руд рудоносных Зуб-Маркшейдерского и Вологодчанского интрузивов и Cu-Ni рудопроявлений слабуродоносных Нижнеталнахского и Нижненорильского интрузивов

Table 4. Copper ($\delta^{65}\text{Cu}$, ‰) and zinc ($\delta^{66}\text{Zn}$, ‰) isotopic compositions of disseminated sulfide Ni-Cu-PGE ores from the subeconomic Zub-Marksheider and Vologochan intrusions and sulfide Cu-Ni occurrences from the non-economic Nizhny Talnakh and Nizhny Noril'sk intrusions

Интрузив, скважина	№ обр.	Глубина, м	Порода	Минеральная ассоциация	$\delta^{65}\text{Cu}$, ‰	$\delta^{66}\text{Zn}$, ‰
Зуб-Маркшейдерский, скв. МП-27	27-1	11.0	Кварцевый норит	$Py + Ccp$	0.06	-0.54
	27-3	22.9	То же	$Py + Ccp$	0.04	-0.55
	27-4	27.9	Диорит	$Py + Mrc + Ccp$	0.09	-0.25
Вологодчанский, скв. ОВ-29	29-9	843.3	Габбро-троктолит	$Po + Pn + Ccp + Sp + Gn$	-0.17	-0.31
	29-16	862.6	Троктолит	$Po + Pn + Ccp$	-1.03	-0.05
	29-17	864.2	Габбро-троктолит	$Ccp + Po + Pn + Sp + Gn$	-0.55	-0.05
Нижнеталнахский, скв. ТГ-31	31-3	795.8	Меланотроктолит	$Tr + Pn + Ccp$	-0.72	-0.39
	31-9	819.4	Плагинерлит	$Tr + Pn + Cbn + Ccp$	-0.76	-0.49
	31-10	824.2	То же	$Tr + Pn + Ccp + Cbn$	-1.22	-0.65
	31-11	826.7	Меланотроктолит	$Tr + Pn + Ccp + Cbn$	-1.33	-0.21
	31-13	843.2	Плагинерлит	$Tr + Pn + Cp + Cbn$	-1.12	-0.49
	31-16	874.6	Меланотроктолит	$Tr + Pn + Ccp$	-1.14	-0.43
Нижненорильский, скв. НП-37	37-9а	1609.4	Лейкогаббро	$Po_m + Pn + Ccp + Sp$ $Po_h + P$	-0.43	-0.04
	37-9г	1614.0	Оливиновое габбро	$Po_h + Pn + Ccp + Sp$	-0.42	-0.54
	37-11а	1617.9	Габбро-троктолит	$Po_h + Pn + Ccp + Sp$	-0.58	-0.62
	37-12б	1621.5	Оливиновое габбро	$Po_h + Pn + Ccp$	-0.62	-0.14
	37-12в	1622.0	Безоливиновое габбро	$Po_m + Pn^{Ni} + Ccp$	-0.84	0.16
	37-13	1624.4	То же	$Po_h + Po_m + Pn^{Ni} + Ccp$	-1.28	-0.23

Примечание. Py – пирит, Ccp – халькопирит, Mrc – марказит, Tr – троилит, Po – пирротин, Pn – пентландит, Sp – сфалерит, Cbn – кубанит, Po_m – пирротин моноклинный, Po_h – пирротин гексагональный, Pn^{Ni} – никелевый пентландит.

Note. Py – pyrite, Ccp – chalcopyrite, Mrc – marcasite, Tr – troilite, Po – pyrrhotite, Pn – pentlandite, Sp – sphalerite, Cbn – cubanite, Po_m – monoclinic pyrrhotite, Po_h – hexagonal pyrrhotite, Pn^{Ni} – nickel-bearing pentlandite.

Таблица 5. Сравнительная характеристика изотопного состава меди и цинка для вкрапленных сульфидных ЭПГ-Cu-Ni руд рудоносных Зуб-Маркшейдерского и Вологодчанского интрузивов и Cu-Ni рудопроявлений слабуродоносных Нижнеталнахского и Нижненорильского интрузивов

Table 5. Average copper and zinc isotopic characteristics of disseminated sulfide Ni-Cu-PGE ores from the subeconomic Zub-Marksheider and Vologochan intrusions and sulfide Cu-Ni occurrences from the non-economic Nizhny Talnakh and Nizhny Noril'sk intrusions

Интрузив	$\delta^{65}\text{Cu}$, ‰					$\delta^{66}\text{Zn}$, ‰				
	Mean	Min	Max	CO	n	Mean	Min	Max	CO	n
Зуб-Маркшейдерский	0.07	0.04	0.09	0.03	3	-0.45	-0.55	-0.25	0.17	3
Вологодчанский	-0.58	-1.03	-0.17	0.43	3	-0.14	-0.31	-0.05	0.15	3
Нижнеталнахский	-1.05	-1.33	-0.72	0.25	6	-0.44	-0.65	-0.21	0.14	6
Нижненорильский	-0.69	-1.28	-0.42	0.33	6	-0.24	-0.62	0.16	0.30	6

Примечание. Условные обозначения – см. табл. 3.

Note. Symbols – see Table 3.

ний $\delta^{65}\text{Cu}$ – от 0.04 до 0.09‰ (см. рис. 7). Отметим также, что только сульфидные платиноидно-медно-никелевые руды двух промышленно-рудоносных интрузивов (Хараслахского и Норильск-1) демонстрируют отличные от других интрузивов дискретные диапазоны и при этом значительные вариации значений $\delta^{65}\text{Cu}$ – от -2.42 до -1.40 и от -0.33 до 0.6‰ соответственно (см. рис. 5).

Зн-изотопные характеристики сульфидных руд

Изотопные составы цинка в образцах сульфидных ЭПГ-Cu-Ni и малосульфидных платиноидных руд, ассоциирующих с различно рудоносными интрузивами Норильской провинции, приведены в табл. 2, 3 и на рис. 8. За исключением одного из 36 анализов, минеральные ассоциации сульфидов

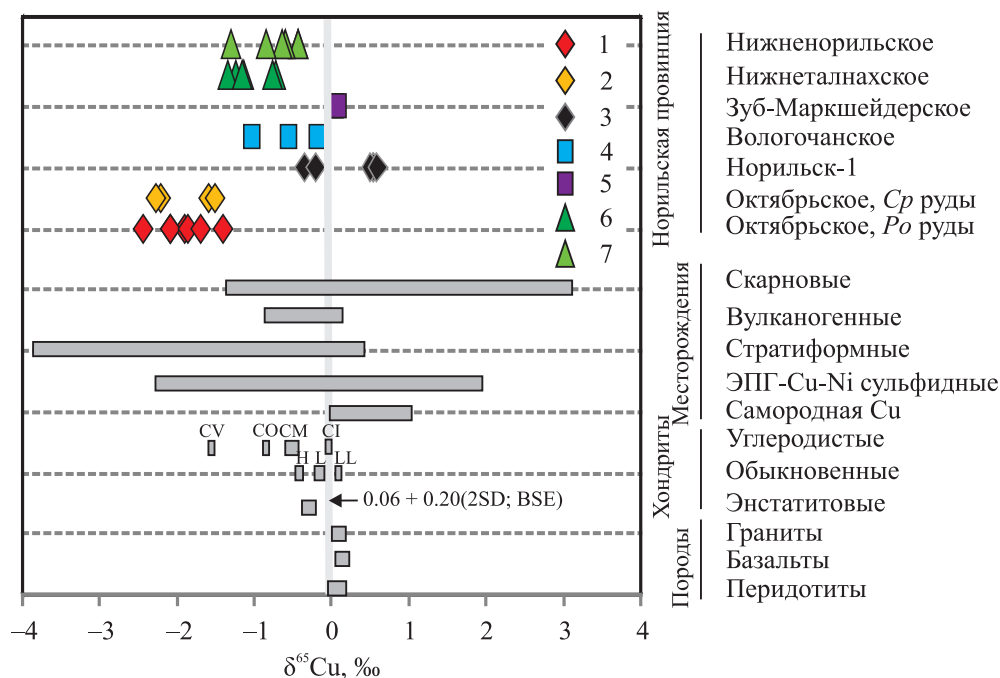


Рис. 7. Вариации изотопного состава $\delta^{65}\text{Cu}$ (‰), нормированного относительно стандарта NIST SRM 976, для различных пород, хондритовых метеоритов, рудных месторождений и сульфидных руд и рудопоявлений Норильской провинции.

1 и 2 – соответственно пирротиновые и халькопиритовые руды Октябрьского месторождения; 3 – сульфидные ЭПГ-Cu-Ni и малосульфидные ЭПГ руды месторождения Норильск-1; 4 и 5 – сульфидные руды соответственно Вологочанского и Зуб-Маркшейдерского месторождений; 6 и 7 – сульфидная Cu-Ni минерализация соответственно Нижнеталнахского и Нижненорильского интрузивов. Вертикальная линия серого цвета соответствует Cu-изотопному составу валовой силикатной Земли ($\delta^{65}\text{Cu} = 0.06 \pm 0.20\text{‰}$ (Liu et al., 2015)).

Fig. 7. Variations in the $\delta^{65}\text{Cu}$ (‰) values, normalized relative to the NIST SRM 976 standard, for various rocks, chondritic meteorites, ore deposits and sulfide ores and ore occurrences of the Noril'sk Province.

1 and 2 – pyrrhotite and chalcopyrite ores of the Oktyabrsky deposit, respectively; 3 – sulfide Ni-Cu-PGE and low-sulfide PGE ores of the Norilsk-1 deposit; 4 and 5 – sulfide ores of the Vologochan and Zub-Marksheyder deposits, respectively; 6 and 7 – sulfide Cu-Ni mineralization of the Nizhny Talnakh and Nizhny Noril'sk intrusions. Gray vertical line corresponds to the Cu-isotopic composition of Bulk Silicate Earth ($\delta^{65}\text{Cu} = 0.06 \pm 0.20\text{‰}$ (Liu et al., 2015)).

характеризуются значениями $\delta^{66}\text{Zn}$ в диапазоне от -0.68 до $+0.16\text{‰}$.

Промышленно-рудноносные интрузивы. В массивных рудах Октябрьского месторождения Харалахского интрузива $\delta^{66}\text{Zn} = -0.50 \dots -0.03\text{‰}$, среднее значение -0.37‰ и $\text{CO} = 0.16\text{‰}$ ($n = 7$); данные показатели близки таковым вкрапленных руд ($\delta^{66}\text{Zn} = -0.68 \dots -0.18\text{‰}$, среднее значение -0.42‰ и $\text{CO} = 0.21\text{‰}$ ($n = 4$); см. табл. 2 и 3, рис. 8). Необходимо отметить сходство изотопного состава цинка для образцов массивных сульфидных ЭПГ-Cu-Ni руд Октябрьского месторождения, образованных разными минеральными ассоциациями сульфидов (см. табл. 2 и 3). Действительно, среднее значение $\delta^{66}\text{Zn}$ для ассоциации сульфидов, представленных халькопиритом, пирротинном и пентландитом ($-0.31 \pm 0.25\text{‰}$; скв. КЗ-844: обр. 844-18, 844-19, 844-20), идентично таковому, характеризующему ассоциацию халькопирита, кубанита, галенита

и пентландита ($-0.29 \pm 0.10\text{‰}$; шахта № 1 рудника Октябрьский: обр. 1-1, 1-2, 1-3, 1-4). Сульфидные и малосульфидные руды месторождения Норильск-1, за исключением обр. Н1-7 ($\delta^{66}\text{Zn} = 0.73 \pm 0.14\text{‰}$), имеют диапазон значений $\delta^{66}\text{Zn}$ от -0.51 до -0.15‰ и среднее значение $\delta^{66}\text{Zn} -0.31\text{‰}$, $\text{CO} = 0.13\text{‰}$; данные показатели лишь незначительно отличаются от таковых руд Октябрьского месторождения ($\delta^{66}\text{Zn} = -0.42\text{‰}$ и $\text{CO} = 0.21\text{‰}$; см. табл. 3).

Рудноносные интрузивы. Вкрапленные сульфиды рудноносных Вологочанского и Зуб-Маркшейдерского интрузивов имеют незначительные вариации изотопного состава цинка ($\delta^{66}\text{Zn}$): от -0.31 до -0.05 и от -0.55 до -0.25 соответственно (см. табл. 4, рис. 8). Средние значения $\delta^{66}\text{Zn}$ для сульфидного вещества для названных интрузивов также различны (-0.14 ± 0.15 и $-0.45 \pm 0.17\text{‰}$ соответственно; см. табл. 5).

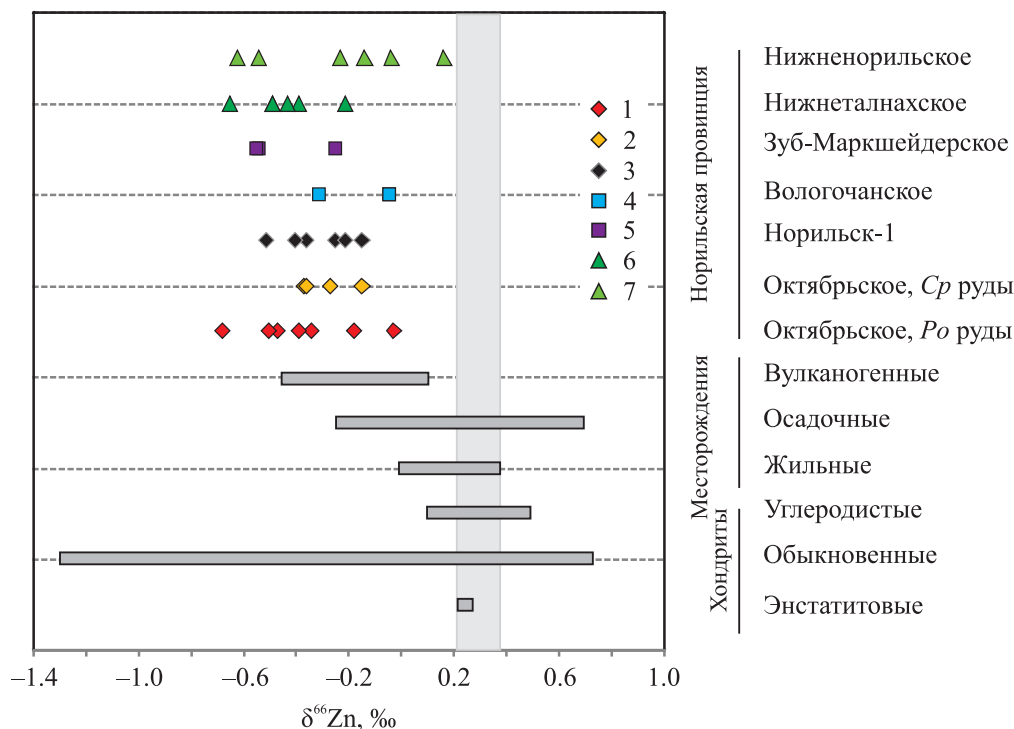


Рис. 8. Вариации изотопного состава $\delta^{66}\text{Zn}$ (‰), нормированного относительно стандарта JMC-Lyon, для хондритовых метеоритов, различных рудных месторождений, сульфидных руд и рудопроявлений Норильской провинции.

Условные обозначения – см. рис. 7. Вертикальная полоса серого цвета соответствует вариациям изотопного состава цинка для валовой силикатной Земли ($\delta^{66}\text{Zn} = 0.28 \pm 0.25$ ‰ (Chen et al., 2013)).

Fig. 8. Variations in the $\delta^{66}\text{Zn}$ (‰) values, normalized relative to the JMC-Lyon standard, for chondritic meteorites, various ore deposits, sulfide ores and ore occurrences of the Noril'sk Province.

The symbols – see Fig. 7. Vertical gray area corresponds to variations in the Zn-isotopic composition of Bulk Silicate Earth ($\delta^{66}\text{Zn} = 0.28 \pm 0.25$ ‰ (Chen et al., 2013)).

Слаборудоносные интрузивы. Для вкрапленной сульфидной минерализации Нижнеталнахского интрузива выявлены значения $\delta^{66}\text{Zn}$ от -0.65 до -0.21 ‰ со средним значением -0.44 ‰, $\text{CO} = 0.14$ ‰ ($n = 6$) (см. табл. 4 и 5, рис. 8), что близко к аналогичным значениям $\delta^{66}\text{Zn}$ для сульфидной минерализации Нижненорильского интрузива ($\delta^{66}\text{Zn} = -0.62 \dots +0.16$ ‰, среднее значение -0.24 ± 0.30 ‰ ($n = 6$); см. табл. 4 и 5, рис. 8).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Медь и цинк являются примерами стабильных изотопов переходных металлов (Luck et al., 2003, 2005; Albarède, 2004). Медь имеет два стабильных изотопа: ^{63}Cu и ^{65}Cu , которые встречаются в природе в пропорции 69.17 к 30.83% (Shields et al., 1965). Цинк имеет пять изотопов: ^{64}Zn , ^{66}Zn , ^{67}Zn , ^{68}Zn и ^{70}Zn , встречающихся в природе в следующих пропорциях: 48.63, 27.92, 4.10, 18.75 и 0.62% соответственно (Rosman, 1972). Именно с появлением многоколлекторной масс-спектрометрии с индуктивно

связанной плазмой (MC-ICP-MS) (Maréchal et al., 1999) стало возможным изучать изотопную геохимию переходных металлов в природных системах.

Генетические ограничения на происхождение сульфидных руд по Cu-изотопным данным

Являясь переходным металлом, медь умеренно сидерофильна и сильнохалькофильна; Cu присутствует в земной среде в трех степенях окисления: самородная Cu^0 , Cu^+ и Cu^{2+} . Так как медь чувствительна к окислительно-восстановительному воздействию, изотопные вариации Cu полезны для получения генетической информации об источниках веществ и процессах образования рудных месторождений. В целях выявления источников рудного вещества Cu-изотопный анализ сульфидов апробирован для широкого спектра геологических объектов, включая сульфидные платиноидно-медно-никелевые месторождения (Zhu et al., 2000; Larson et al., 2003; Malitch et al., 2014; Ripley et al., 2015; Zhao et al., 2017, 2019; Tang et al., 2020; и др.), пор-

фировые месторождения (Larson et al., 2003; Graham et al., 2004; Mathur et al., 2005, 2009, 2012; Asael et al., 2007; Wu et al., 2017), скарновые месторождения (Larson et al., 2003; Graham et al., 2004; Maher, Larson, 2007), вулканогенные массивные сульфидные отложения и современные черные курильщики (Zhu et al., 2000; Rouxel et al., 2004; Mason et al., 2005), другие гидротермальные отложения (месторождения самородной меди Мичигана (Larson et al., 2003)), осадочные Cu месторождения (Asael et al., 2007)) и др. Следуя работам (Larson et al., 2003; Mathur et al., 2009, 2012; см. также ссылки в них), можно отметить следующие особенности вариаций изотопного состава меди, характерные для различных рудообразующих систем: 1) Cu-содержащие минералы имеют близкие к нулю значения $\delta^{65}\text{Cu}$; 2) диапазон вариаций $\delta^{65}\text{Cu}$ в большинстве геологических образований превышает 1‰; 3) минералы, испытавшие низкотемпературные окислительно-восстановительные процессы, имеют значительно более переменные значения $\delta^{65}\text{Cu}$, чем минералы, образовавшиеся при высоких температурах.

Изотопный состав меди ($\delta^{65}\text{Cu}$) для валовой силикатной Земли (Bulk Silicate Earth (BSE); т. е. мантии и коры), составляющий $0.06 \pm 0.20\text{‰}$ (Liu et al., 2015) (см. рис. 7), базируется на представительной выборке мантийных перидотитов, коматитов, базальтах срединно-океанических хребтов (mid-ocean ridge basalts, MORB), базальтах океанических островов (ocean island basalts, OIB). Аналогичные или даже более узкие диапазоны значения $\delta^{65}\text{Cu}$ (см. рис. 7) зарегистрированы в мантийных перидотитах (от 0.0 до 0.18‰; (Ben Othman et al., 2006)), базальтах (от -0.10 до -0.03‰; (Luck et al., 2003)) и гранитах (-0.46 до 1.51‰, с основным кластером значений в пределах от -0.14 до $\leq 0.25\text{‰}$ и средним $\delta^{65}\text{Cu}$ $0.01 \pm 0.30\text{‰}$; $n = 30$, при исключении двух образцов, выходящих за пределы кластера основных данных (Li et al., 2009)). Эти результаты показывают, что фракционирование изотопов Cu в процессах земной дифференциации является незначительным. Тем не менее хондритовые метеориты демонстрируют значительную изменчивость Cu-изотопного состава (см. рис. 7). Углистые хондриты (Carbonaceous Chondrites) обладают значениями $\delta^{65}\text{Cu}$ в диапазоне от -1.5 до 0.0‰ (Luck et al., 2003): при этом каждая группа от CV ($-1.45 \pm 0.04\text{‰}$) до CI ($0.02 \pm 0.12\text{‰}$) имеет разные средние значения $\delta^{65}\text{Cu}$ (см. рис. 7). Для обыкновенных хондритов (Ordinary Chondrites) характерен меньший диапазон вариаций (см. рис. 7), при этом группы H, L и LL также имеют разные средние значения $\delta^{65}\text{Cu}$, характеризующаясь более “изотопно-тяжелыми” составами с уменьшением содержания Fe. Группам энстатитовых хондритов (EH и EL) свойствен близкий изотопный состав Cu, который не выходит за пределы диапазона составов обыкновенных хондритов ($\delta^{65}\text{Cu} = 0.25 \pm 0.09$; см. рис. 7). Эти данные

свидетельствуют о фракционировании изотопных составов меди (Luck et al., 2003, 2005).

Значимые $\delta^{65}\text{Cu}$ вариации, достигающие около 3‰ (от -2.42 до +0.6‰), выявленные в сульфидных рудах ЭПГ-Cu-Ni месторождений Октябрьское и Норильск-1 (см. рис. 7), сопоставимы с таковыми в высокотемпературных сульфидах, образованных мантийными магмами (от -2.30 до 1.84‰ (Malitch et al., 2014; Ripley et al., 2015; Zhao et al., 2017; 2019; Малич и др., 2018; Tang et al., 2020)), а также в халькопиритах стратиформных осадочных (от -3.81 до 0.45‰ (Asael et al., 2007, 2009, 2012)) и скарновых (от -1.5 до 3.0‰ (Maher, Larson, 2007; Wang et al., 2017)) месторождений. При этом вариации изотопного состава меди в массивных и вкрапленных сульфидных рудах Хараелахского интрузива характеризуются сходными значениями “изотопно-легкими” характеристиками ($\delta^{65}\text{Cu}$ от -2.3 до -0.9‰ (Malitch et al., 2014)) и $\delta^{65}\text{Cu}$ от -2.42 до -1.40‰ (настоящая статья)). Для большинства сульфидных вкрапленных и массивных руд Талнахского интрузива наблюдается незначительное “облегчение” изотопного состава меди ($\delta^{65}\text{Cu}$ варьируется от -1.1 до 0.0‰ (Malitch et al., 2014)). “Изотопно-тяжелая” медь установлена во вкрапленных ЭПГ-Cu-Ni сульфидных рудах интрузива Норильск-1 ($\delta^{65}\text{Cu}$ от -0.1 до +0.6‰ (Malitch et al., 2014) и от -0.33 до +0.6‰ (настоящая статья)), с максимальным фактором утяжеления в горизонте малосульфидных платиноидных руд ($\delta^{65}\text{Cu} = 0.56 \pm 0.06\text{‰}$). По данным Cu-изотопной систематики, вкрапленные сульфидные руды других ультрамафит-мафитовых интрузивов Норильской провинции (см. рис. 7) попадают в относительно узкий кластер значений $\delta^{65}\text{Cu}$ (от -1.1 до 0‰), типичный для массивных и вкрапленных руд промышленно-рудноносного Талнахского месторождения (среднее $\delta^{65}\text{Cu} = -0.24 \pm 0.25$ и $-0.7 \pm 0.4\text{‰}$ соответственно (Malitch et al., 2014)) и хондритовых метеоритов (Luck et al., 2003, 2005).

Различные процессы могут вызывать наблюдаемые изменения в Cu-изотопном составе сульфидных ассоциаций, включая 1) наличие магм (сульфидных жидкостей) с различным изотопным составом, 2) магматическое и (или) 3) немагматическое фракционирование изотопов меди. Показано, что окислительно-восстановительные реакции играют важную роль во фракционировании изотопов Cu при низких температурах (Zhu et al., 2002; Graham et al., 2004; Rouxel et al., 2004; Asael et al., 2006; Markl et al., 2006). В общем случае вариации изотопного состава меди в первичных и вторичных Cu-содержащих минералах могут быть обусловлены фракционированием между различными сложными соединениями в растворе (Maréchal, Albarède, 2002) или связаны с влиянием изотопно-различных флюидов при гидротермальных процессах (Graham et al., 2004). Также показано, что окислительно-восстановительные реакции продуцируют бога-

тые Cu минералы в различных валентных состояниях, т. е. Cu^+ и Cu^{2+} , и могут дополнительно варьироваться в зависимости от насыщенности раствора (Mason et al., 2005). В порфировых медных рудах значения $\delta^{65}\text{Cu}$ составляют значительный диапазон – от -16.96 до $+9.98\text{‰}$ (Mathur et al., 2009; см. также ссылки в этой работе): халькопирит из первичной высокотемпературной минерализации имеет относительно ограниченный кластер значений $\delta^{65}\text{Cu}$ – от $+1$ до -1‰ , тогда как вторичные минералы, образованные при низкотемпературных процессах, имеют значения $\delta^{65}\text{Cu}$ от -16.96 до $+9.98\text{‰}$ (Mathur et al., 2009). Вторичный халькозин обладает относительно тяжелым изотопным составом меди, при этом $\delta^{65}\text{Cu}$ изменяется от -0.3 до 6.5‰ , тогда как минералы выщелачивания, в которых доминируют Fe-оксиды (ярозит, гематит и гетит), характеризуются относительно легким составом меди ($\delta^{65}\text{Cu}$ от -9.9 до 0.14‰ (Mathur et al., 2009)), что свидетельствует о вторичной природе изотопных вариаций. Окислительно-восстановительные процессы считаются ответственными за “изотопно-легкую” медь халькопирита в стратиформных осадочных месторождениях меди, где Cu-сульфиды образуются при взаимодействии Cu-содержащих растворов с H_2S при бактериальном восстановлении внутриводной воды, содержащей сульфаты (Asael et al., 2007).

Принято считать, что значительное изменение изотопных составов меди является результатом вторичных процессов. В данном контексте сдвиг значений $\delta^{65}\text{Cu}$ для сульфидных руд Октябрьского месторождения (от -2.42 до -1.40‰) может быть связан с ассимиляцией внешнего источника меди. Таким внешним источником меди могла быть самородная медь Арылахского месторождения Норильской провинции, для которой характерен “изотопно-легкий” состав меди ($\delta^{65}\text{Cu} = -1.9 \pm 0.15\text{‰}$ (Малич и др., 2018)). Другим внешним источником меди для сульфидных ЭПГ-Cu-Ni месторождений Норильской провинции могли являться стратиформные месторождения меди, подобные установленным в протерозойских осадочных образованиях в Игарском поднятии (Ржевский и др., 1980, 1988). Кроме того, сдвиг значений $\delta^{65}\text{Cu}$ для сульфидных руд Хараелакского месторождения (от -2.4 до -1.4‰) может быть связан с магматическим фракционированием изотопов меди (Malitch et al., 2014), однако возможность подобного фракционирования необходимо подтвердить экспериментально.

Таким образом, особенности изотопного состава меди в сульфидных рудах, сформировавших Талнахское месторождение ($\delta^{65}\text{Cu} = -0.55 \pm 0.41\text{‰}$ (Malitch et al., 2014)) и месторождение Норильск-1 ($\delta^{65}\text{Cu} = 0.27 \pm 0.39\text{‰}$), отражают их первичную характеристику. Для Октябрьского месторождения, характеризующегося наиболее “изотопно-легким” составом меди ($\delta^{65}\text{Cu} = -1.90 \pm 0.33\text{‰}$), весьма ве-

роятно участие внешнего источника меди при формировании сульфидных ЭПГ-Cu-Ni руд.

Генетические ограничения на происхождение сульфидных руд по Zn-изотопным данным

Начиная с исследования (Maréchal et al., 1999), открывшего эру высокоточных измерений изотопного состава цинка, Zn-изотопные исследования коснулись главным образом области космохимии, океанографии, окружающей среды и медицины.

Например, изотопы цинка использованы для выявления причины различий в содержании летучих элементов в хондритах (Luck et al., 2005; Albarède, 2009). Отрицательная корреляция между $\delta^{66}\text{Zn}$ и $1/\text{Zn}$ послужила убедительным доказательством того, что испарение является причиной изменчивости содержания Zn в разных группах хондритов (см. рис. 8); это позволило сделать вывод, что вариации содержаний летучих элементов в родительских телах хондритов вызваны космическими (небулярными) процессами (Luck et al., 2005). Незначительные вариации изотопного состава цинка ($\delta^{66}\text{Zn} = 0.08\text{--}0.36\text{‰}$), установленные в образцах горных пород и минералов (Wilkinson, 2023), обусловлены тем, что цинк обладает единственной степенью окисления, в отличие от других переходных металлов, в частности меди, для которой окислительно-восстановительные изменения могут вызывать значительное изотопное фракционирование. Предполагается, что изменения изотопного состава цинка контролируются тремя основными факторами: температурным градиентом (Mason et al., 2005), кинетическим фракционированием Рэлея (Wilkinson et al., 2005; John et al., 2008; Kelley et al., 2009; Gagnevin et al., 2012) и смешиванием нескольких источников цинка (Wilkinson et al., 2005).

Изотопный состав цинка ($\delta^{66}\text{Zn}$) магматических пород Земли характеризуется диапазоном в пределах $0.2\text{--}0.4\text{‰}$ (см. рис. 8) со средним оценочным значением $\delta^{66}\text{Zn}$ для валовой силикатной Земли (BSE), равным $0.28 \pm 0.25\text{‰}$ (Chen et al., 2013). Исследования изотопного состава цинка для рудных месторождений немногочисленны (см. рис. 8). Результаты по изотопному составу цинка для ЭПГ-Cu-Ni сульфидных руд уникальных месторождений Октябрьское и Норильск-1 в нашем исследовании в пределах соответствующих погрешностей оказались неотличимыми друг от друга (среднее $\delta^{66}\text{Zn} -0.34 \pm 0.18\text{‰}$ и $-0.31 \pm 0.13\text{‰}$ соответственно; см. табл. 3). Средние значения $\delta^{66}\text{Zn}$ для ЭПГ-Cu-Ni сульфидных руд уникальных месторождений также близки таковым для руд крупных месторождений Вологодчанское и Зуб-Маркшейдерское (среднее $\delta^{66}\text{Zn} -0.14 \pm 0.15$ и $-0.45 \pm 0.17\text{‰}$ соответственно; см. табл. 5) и сульфидной Cu-Ni минерализации слабрудноносных Нижнеталнахского и Нижненорильского мафит-ультрамафитовых

интрузивов (среднее $\delta^{66}\text{Zn}$ -0.44 ± 0.14 и $-0.24 \pm 0.30\text{‰}$ соответственно; см. табл. 5). Полученные результаты в целом сопоставимы с Zn-изотопными данными ($\delta^{66}\text{Zn}$) для вулканогенных массивных сульфидных месторождений (Volcanogenic Massive Sulfide (VMS) deposits; от -0.43 до 0.08‰ (Mason et al., 2005)) и несколько отличны от осадочных Zn-Pb стратиформных (от -0.26 до 0.71‰ (Wilkinson et al., 2005; Kelley et al., 2009; Zhou et al., 2014)) и Zn-Pb жильных (от -0.03 до 0.38‰ (Wang et al., 2017)) месторождений (см. рис. 8).

Природа положительной Zn-изотопной аномалии для сульфидной ассоциации из плагиоверлитов интрузива Норильск-1 ($\delta^{66}\text{Zn} = 0.73 \pm 0.14\text{‰}$, SE) пока не имеет объяснения и требует дальнейшего исследования. При исключении данного значения из проанализированной выборки образцов ($n = 36$) среднее значение $\delta^{66}\text{Zn}$ для Норильской провинции составляет $0.33 \pm 0.20\text{‰}$. Мы полагаем, что особенности изотопного состава цинка в сульфидных ЭПГ-Cu-Ni рудах и рудопроявлениях Норильской

провинции отражают их первичную характеристику и не являются результатом смешения источников рудного вещества или магматического фракционирования.

Изотопно-геохимические индикаторы прогноза богатых сульфидных руд

На протяжении всей истории открытия и изучения Норильской провинции велся непрерывный поиск надежных критериев прогноза месторождений цветных и благородных металлов, связанных с ультрамафит-мафитовыми интрузивами. Главными из них являются глубинные, структурные, магматические и литолого-стратиграфические критерии. Важны также петрохимические, минералогические, метаморфические, литогеохимические, гидрогеохимические и другие признаки (см., например, (Ляхницкая, Туганова, 1977; Поисковые критерии..., 1978; Металлогеническая карта..., 1987; Туганова, 2000; Добрецов и др., 2010; Малич и

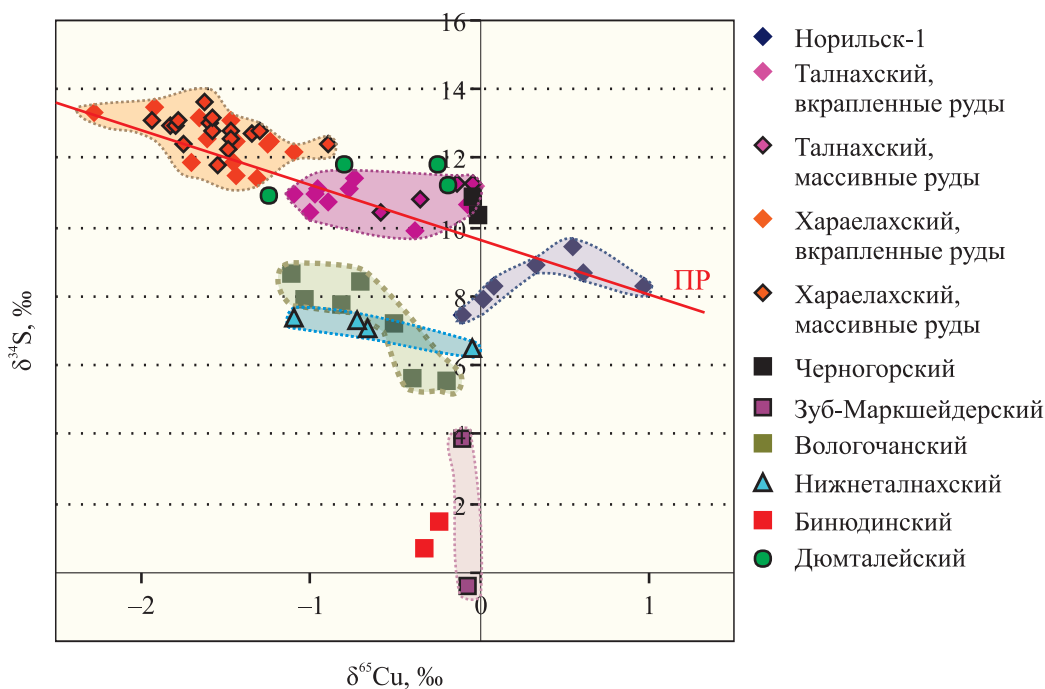


Рис. 9. Вариации изотопного состава серы и меди в координатах $\delta^{34}\text{S}$ – $\delta^{65}\text{Cu}$ для сульфидных ЭПГ-Cu-Ni руд промышленно-рудноносных (Норильск-1, Талнахском, Хараелахском), рудоносных (Черногорском, Зуб-Маркшейдерском, Вологочанском) интрузивов и сульфидной минерализации потенциально рудоносных (Бинюдинском, Дюмталейском) и слаборудоносных (Нижнеталнахском) интрузивов Полярной Сибири, по (Malitch, 2021).

ПР – тренд S-Cu изотопных составов промышленно-рудноносных интрузивов.

Fig. 9. Sulfur and copper isotopic variations in coordinates $\delta^{34}\text{S}$ – $\delta^{65}\text{Cu}$ for sulfide Ni-Cu-PGE ores and accumulations from economic (Noril'sk-1, Talnakh, Kharaelakh), subeconomic (Chernogorsk, Zub-Marksheider, Vologochan), prospective (Binyuda, Dyumtaley) and non-economic (Nizhny Talnakh) intrusions of Polar Siberia (after (Malitch, 2021)).

ПР denotes the trend of S-Cu isotope compositions for economic intrusions.

др., 2018; Лихачёв, 2020)). Использование оригинальных подходов позволило предложить новые изотопно-геохимические индикаторы прогноза месторождений стратегических видов минерального сырья (Малич и др., 2018; Malitch et al., 2018; Isotope Geology..., 2019; Malitch, 2021). На основе сочетания изотопных составов осмия, серы и меди выявлены интрузивные тела с вкрапленными сульфидными рудами, обладающими параметрами рудного вещества, за счет которых были сформированы промышленные платиноидно-медно-никелевые месторождения.

В частности, установленная дискретность изотопного состава меди и серы в сульфидных ЭПГ-Cu-Ni рудах *промышленно-рудноносных* интрузивов позволила оценить перспективы выявления богатых сульфидных ЭПГ-Cu-Ni руд в слабоизученных рудоносных и потенциально рудоносных интрузивах Полярной Сибири (рис. 9). *Промышленно-рудноносные* интрузивы в координатах $\delta^{34}\text{S}$ - $\delta^{65}\text{Cu}$ образуют специфический тренд составов (тренд ПР на рис. 9), от “изотопно-легкой” меди и “изотопно-тяжелой” серы Хараелахского интрузива до “изотопно-тяжелой” меди и менее “изотопно-тяжелой” серы интрузива Норильск-1. К этому тренду составов близки (см. рис. 9) вкрап-

ленные ЭПГ-Cu-Ni руды Черногорского (перекрываются с полем изотопных составов сульфидов Талнахского интрузива), а также Дюмталейского (частично перекрываются с полем талнахских сульфидов) интрузивов, наиболее перспективных на обнаружение богатых ЭПГ-Cu-Ni руд. В данном контексте сопряженный характер изотопных параметров меди и цинка (рис. 10) является слабоинформативным прогнозным индикатором для обнаружения богатых сульфидных руд прежде всего из-за сходства изотопного состава цинка в рудном веществе из различно рудоносных интрузивов Норильской провинции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Впервые охарактеризованы изотопные вариации цинка и меди для уникальных и крупных сульфидных ЭПГ-Cu-Ni месторождений Октябрьское и Норильск-1, средних и мелких ЭПГ-Cu-Ni месторождений Вологодчанское и Зуб-Маркшейдерское и сульфидной Cu-Ni минерализации Нижнеталнахского и Нижненорильского мафит-ультрамафитовых интрузивов Норильской провинции.

2. Проанализированные образцы сложены минеральными ассоциациями сульфидов, которые пред-

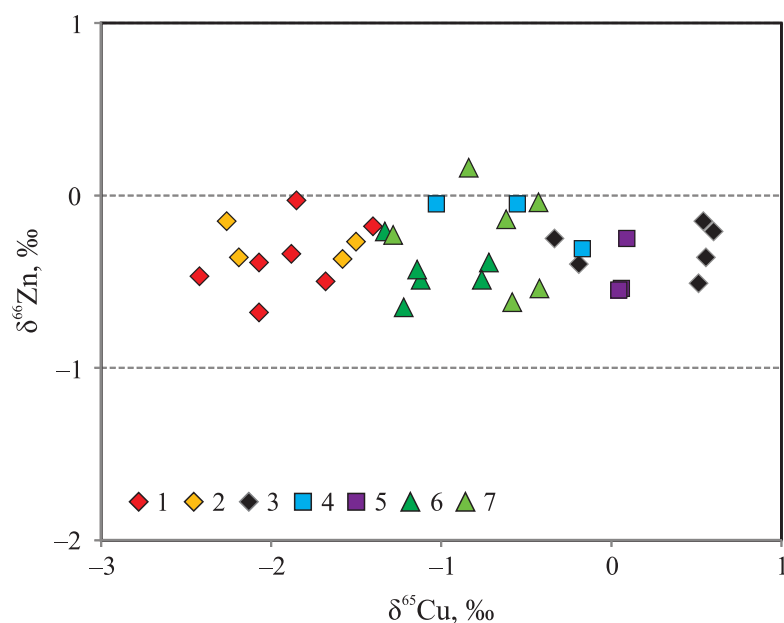


Рис. 10. Вариации изотопного состава цинка и меди в координатах $\delta^{66}\text{Zn}$ - $\delta^{65}\text{Cu}$ для пирротитовых (1) и халькопиритовых (2) руд Октябрьского месторождения, сульфидных ЭПГ-Cu-Ni и малосульфидных ЭПГ руд месторождения Норильск-1 (3), сульфидных ЭПГ-Cu-Ni руд Вологодчанского (4) и Зуб-Маркшейдерского (5) месторождений, сульфидной Cu-Ni минерализации Нижнеталнахского (6) и Нижненорильского (7) интрузивов Норильской провинции.

Fig. 10. Zinc and copper isotopic variations in coordinates $\delta^{66}\text{Zn}$ - $\delta^{65}\text{Cu}$ for pyrrhotite (1) and chalcopyrite (2) ores of the Oktyabr'sk deposit, sulfide PGE-Cu-Ni and low-sulfide PGE ores of the Noril'sk-1 deposit (3), sulfide Ni-Cu-PGE ores of the Vologochan (4) and Zub-Marksheider (5) deposits, and sulfide Cu-Ni mineralization of the Nizhny Talnakh (6) and Nizhny Noril'sk (7) intrusions of the Noril'sk Province.

ставлены пирротиновыми и халькопиритовыми рудами Октябрьского месторождения, ассоциирующими с Хараелахским интрузивом, сульфидными ЭПГ-Cu-Ni и малосульфидными ЭПГ рудами месторождения Норильск-1, сульфидными ЭПГ-Cu-Ni рудами Вологочанского и Зуб-Маркшейдерского месторождений, связанных с одноименными интрузивами, а также сульфидной Cu-Ni минерализацией Нижнеталнахского и Нижненорильского мафит-ультрамафитовых интрузивов Норильской провинции.

3. Сульфидные ЭПГ-Cu-Ni руды месторождений Октябрьское и Норильск-1 демонстрируют отличные от других месторождений и рудопроявлений дискретные диапазоны значений $\delta^{65}\text{Cu}$ от -2.42 до -1.40 и от -0.33 до 0.60‰ соответственно. При этом изотопный состав меди для сульфидных минералов массивных и вкрапленных руд месторождения Октябрьское обладает сходными “изотопно-легкими” характеристиками. Наиболее выраженный сдвиг в сторону “изотопно-тяжелой” меди установлен в горизонте малосульфидных руд месторождения Норильск-1 ($\delta^{65}\text{Cu}$ от 0.51 до 0.60‰).

4. Изотопный состав цинка ($\delta^{66}\text{Zn}$) для изученных образцов сульфидов, ассоциирующих с промышленно-рудноносными, рудоносными и слабодуктоносными интрузивами, за исключением одного образца ($0.73 \pm 0.14\%$), характеризуется сходными “изотопно-легкими” значениями (в диапазоне от -0.65 до +0.16‰) со средним значением $\delta^{66}\text{Zn}$ $0.33 \pm 0.20\%$ ($n = 35$).

5. Выявленные вариации изотопного состава меди и цинка в изученных сульфидных ассоциациях из всех типов руд отражают их первичную характеристику; тем не менее для Хараелахского интрузива, имеющего наиболее “изотопно-легкий” состав меди ($\delta^{65}\text{Cu} = -1.9 \pm 0.34\%$), нельзя исключить возможность ассимиляции внешнего источника меди при формировании сульфидных ЭПГ-Cu-Ni руд.

6. Сопряженный характер изотопных параметров меди и цинка оказался слабоинформативным прогностным индикатором для обнаружения богатых сульфидных руд главным образом из-за сходства изотопного состава цинка в рудном веществе из различно рудоносных интрузивов Норильской провинции.

Благодарности

Авторы признательны Н.С. Чебыкину и Т.Г. Окуновой за помощь при проведении минералого-геохимических исследований и анонимным рецензентам за конструктивные замечания, которые способствовали улучшению рукописи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Богатиков О.А., Коваленко В.И., Шарков Е.В. (2010) Магматизм, тектоника, геодинамика Земли: связь во времени и в пространстве. М.: Наука, 605 с.

Генкин А.Д., Дистлер В.В., Гладышев Г.Д., Филимонова А.А., Евстигнеева Т.Л., Коваленкер В.А., Лапутина И.П., Смирнов А.В., Гроховская Т.Л. (1981) Сульфидные медно-никелевые руды норильских месторождений. М.: Наука, 234 с.

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

Гриненко Л.Н. (1990) Источники вещества и условия формирования сульфидных медно-никелевых руд по изотопно-геохимическим данным. *Геология медно-никелевых месторождений СССР*. Л.: Наука, 57-66.

Дистлер В.В., Гроховская Т.Л., Евстигнеева Т.Л., Служеникин С.Ф., Филимонова А.А., Дюжиков О.А., Лапутина И.П. (1988) Петрология сульфидного магматического рудообразования. М.: Наука, 232 с.

Добрецов Н.Л. (1997) Пермо-триасовый магматизм и осадконакопление в Евразии как отражение суперплюма. *Докл. РАН*, **354**(2), 220-223.

Добрецов Н.Л., Борисенко А.С., Изох А.Э., Жмодик С.М. (2010) Термохимическая модель пермо-триасовых мантийных плюмов Евразии как основа для выявления закономерностей формирования и прогноза медно-никелевых, благородно- и редкометалльных месторождений. *Геология и геофизика*, **51**(9), 1159-1187.

Додин Д.А. (2002) Металлогения Таймыро-Норильского района. СПб.: Наука, 822 с.

Дюжиков О.А., Дистлер В.В., Струнин Б.М., Мкртычян А.К., Шерман М.Л., Служеникин С.Ф., Лурье А.М. (1988) Геология и рудоносность Норильского района. М.: Наука, 279 с.

Зенько Т.Е. (1983) Механизм формирования норильских расслоенных рудоносных интрузивов. *Изв. АН СССР. Сер. геол.*, (11), 21-39.

Золотухин В.В., Рябов В.В., Васильев Ю.Р., Шатков В.А. (1975) Петрология Талнахской рудоносной дифференцированной трапповой интрузии. Новосибирск: Наука, 432 с.

Зотов И.А. (1979) Генезис трапповых интрузивов и метаморфических образований Талнаха. М.: Наука, 155 с.

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

Лихачев А.П. (2020) Опоискованность Норильского района и возможности открытия в нем новых Pt-Cu-Ni месторождений. *Отчет. геология*, (2), 3-16.

Люлько В.А., Федоренко В.А., Дистлер В.В., Служеникин С.Ф., Кунилов В.Е., Стехин А.И., Рябикин В.А., Симонов О.Н., Зенько Т.Е. (1994) Геология и рудные месторождения Норильского района. Путеводитель VII Международного платинового симпозиума. (Ред. В.В. Дистлер, В.Е. Кунилов). М.: Московский контакт, 43 с.

Ляхницкая И.В., Туганова Е.В. (1977) Региональные и локальные закономерности размещения медно-никелевых сульфидных месторождений. Л.: Недра, 77 с.

Малич К.Н., Баданина И.Ю., Туганова Е.В. (2010) Магматическая эволюция ультрамафит-мафитовых интрузивов Норильской провинции (Россия): вещественные и геохронологические данные. *Литосфера*, (5), 37-63.

Малич К.Н., Баданина И.Ю., Туганова Е.В. (2018) Рудоносные ультрамафит-мафитовые интрузивы Полярной Сибири: возраст, условия образования, критерии

- прогноза. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 287 с.
- Металлогеническая карта северо-запада Сибирской платформы. М-б 1 : 500 000. (1987) (Гл. ред. Н.С. Малич). Карта на 16 л. Объяснит. записка. Л.: Картограф. фабрика ВСЕГЕИ, 149 с.
- Поисковые критерии сульфидных руд норильского типа. (1978) (Ред. В.С. Соболев). Новосибирск: Наука, 167 с.
- Пушкарев Ю.Д. (1997) Два типа взаимодействия корового и мантийного вещества и новый подход к проблемам глубинного рудообразования. *Докл. АН*, **335**(4), 524-526.
- Радько В.А. (1991) Модель динамической дифференциации интрузивных траппов северо-запада Сибирской платформы. *Геология и геофизика*, **32**(11), 19-27.
- Радько В.А. (2016) Фации интрузивного и эффузивного магматизма Норильского района. СПб.: Картограф. фабрика ВСЕГЕИ, 226 с.
- Ржевский В.Ф., Габлина И.Ф., Васильовская Л.В., Лурье А.М. (1988) Генетические особенности Гравийского месторождения меди. *Литология и полез. ископаемые*, (2), 86-97.
- Ржевский В.Ф., Мирошников А.Е., Душаткин А.Б., Шклярник Г.К. (1980) Меденосность верхнедевонских отложений Игарского района. *Процессы осадочного и вулканогенно-осадочного накопления цветных металлов (Сибирь и Дальний Восток)*. (Ред. Ю.П. Казанский, Л.Ф. Наркелюн). Новосибирск: Наука, 81-84.
- Рябов В.В., Шевко А.Я., Гора М.П. (2000) Магматические образования Норильского района. Т. 1. Петрология траппов. Новосибирск: Нонапрель, 408 с.
- Служеникин С.Ф. (2000) Малосульфидное платиновое оруденение в дифференцированных базит-гипербазитовых интрузивах Норильского района. Автореф. дисс. ... канд. геол.-мин. наук. М.: ИГЕМ РАН, 26 с.
- Служеникин С.Ф., Дистлер В.В., Дюжиков О.А., Кравцов В.Ф., Кунилов В.Е., Лапутина И.П., Туровцев Д.М. (1994) Малосульфидное платиновое оруденение в норильских дифференцированных интрузивах. *Геология рудн. месторождений*, **36**(3), 195-217.
- Служеникин С.Ф., Малич К.Н., Туровцев Д.М., Григорьева А.В., Баданина И.Ю. (2020) Зубовский тип дифференцированных базит-гипербазитовых интрузивов Норильского района: петрогеохимические характеристики и рудоносность. *Петрология*, **28**(5), 511-544.
- Служеникин С.Ф., Малич К.Н., Юдовская М.А., Туровцев Д.М., Анциферова Т.Н., Михалев С.К., Баданина И.Ю., Солошенко Н.Г. (2023) Нижнеталнахский тип интрузивов в Норильском рудном районе. *Петрология*, **31**(5), 482-509.
- Спиридонов Э.М. (2010) Рудно-магматические системы Норильского рудного поля. *Геология и геофизика*, **51**(9), 1356-1378.
- Туганова Е.В. (1991) Петролого-геодинамическая модель образования сульфидных Cu-Ni месторождений. *Геология и геофизика*, **32**(6), 3-11.
- Туганова Е.В. (2000) Формационные типы, генезис и закономерности размещения сульфидных платиноидно-медно-никелевых месторождений. СПб.: ВСЕГЕИ, 102 с.
- Albarède F. (2004) The stable isotope geochemistry of copper and zinc. *Rev. Mineral. Geochem.*, **55**, 409-427.
- Albarède F. (2009) Volatile accretion history of the terrestrial planets and dynamic implications. *Nature*, **461**, 1227-1233.
- Arndt N.T., Czamanske G.K., Walker R.J., Chauvel C., Fedorenko V.A. (2003) Geochemistry and origin of the intrusive hosts of the Noril'sk-Talnakh Cu-Ni-PGE sulfide deposits. *Econ. Geol.*, **98**, 495-515.
- Asael D., Matthews A., Bar-Matthews M., Halicz L. (2007) Copper isotope fractionation in sedimentary copper mineralization (Timna Valley, Israel). *Chem. Geol.*, **243**, 238-254.
- Asael D., Matthews A., Bar-Matthews M., Harlavan Y., Segal I. (2012) Tracking redox controls and sources of sedimentary mineralization using copper and lead isotopes. *Chem. Geol.*, **310-311**, 23-35.
- Asael D., Matthews A., Butler I., Rickard A.D., Bar-Matthews M., Halicz L. (2006) $^{65}\text{Cu}/^{63}\text{Cu}$ fractionation during copper sulphide formation from iron sulphides in aqueous solution. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **70**(18S), A23.
- Asael D., Matthews A., Oszczepalski S., Bar-Matthews M., Halicz L. (2009) Fluid speciation controls of low temperature copper isotope fractionation applied to the Kupferschiefer and Timna ore deposits. *Chem. Geol.*, **262**, 147-158.
- Barnes S.J., Malitch K.N., Yudovskaya M.A. (2020) Introduction to a Special Issue on the Noril'sk-Talnakh Ni-Cu-platinum group element deposits. *Econ. Geol.*, **115**(6), 1157-1172.
- Ben Othman D., Luck J.M., Bodinier J.L., Arndt N.T., Albarède F. (2006) Cu-Zn isotopic variations in the Earth's mantle. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **70**(18S), A46.
- Chen H., Savage P., Teng F.Z., Helz R.T., Moynier F. (2013) Zinc isotope fractionation during magmatic differentiation and the isotopic composition of the bulk Earth. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **369-370**, 34-42.
- Czamanske G.K., Zen'ko T.E., Fedorenko V.A., Calk L.C., Budahn J.R., Bullock J.H. Jr., Fries T.L., King B.S., Siems D.F. (1995) Petrography and geochemical characterization of ore-bearing intrusions of the Noril'sk type, Siberia; with discussion of their origin. *Res. Geol., Spec. Iss.*, **18**, 1-48.
- Gagnevin D., Boyce A.J., Barrie C.D., Menuge J.F., Blakeman R.J. (2012) Zn, Fe and S isotope fractionation in a large hydrothermal system. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **88**, 183-198.
- Graham S., Pearson N., Jackson S., Griffin W., O'Reilly S.Y. (2004) Tracing Cu and Fe from source to porphyry: in situ determination of Cu and Fe isotope ratios in sulfides from the Grasberg Cu-Au deposit. *Chem. Geol.*, **207**, 147-169.
- Grinenko L.N. (1985) Sources of sulfur of the nickeliferous and barren gabbro-dolerite intrusions of the northwest Siberian platform. *Int. Geol. Rev.*, **28**, 695-708.
- Isotope Geology of the Noril'sk deposits. (2019) (Ed. O. Petrov). Cham, Springer Nature, 306 p.
- John S.G., Rouxel O.J., Craddock P.R., Engwall A.M., Boyle E.A. (2008) Zinc stable isotopes in seafloor hydrothermal vent fluids and chimneys. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **269**, 17-28.
- Kelley K.D., Wilkinson J.J., Chapman J.B., Crowther H.L., Weiss D.J. (2009) Zinc isotopes in sphalerite from base

- metal deposits in the Red Dog district, northern Alaska. *Econ. Geol.*, **104**, 767-773.
- Krivolutskaya N.A. (2016) Siberian traps and Pt-Cu-Ni deposits in the Noril'sk Area. Cham, Springer International Publishing Switzerland, 364 p.
- Larson P.B., Maher K., Ramos F.C., Chang Z.S., Gaspar M., Meinert L.D. (2003) Copper isotope ratios in magmatic and hydrothermal ore-forming environments. *Chem. Geol.*, **201**(3-4), 337-350.
- Li C., Ripley E.M., Naldrett A.J. (2003) Compositional variations of olivine and sulfur isotopes in the Noril'sk and Talnakh intrusions, Siberia: implications for ore-forming processes in dynamic magma conduits. *Econ. Geol.*, **98**, 69-86.
- Li W.-Q., Jackson S.E., Pearson N.J., Alard O., Chappell B.W. (2009) The Cu isotopic signature of granites from the Lachlan Fold Belt, SE Australia. *Chem. Geol.*, **258**, 38-49.
- Liu S.-A., Huang J., Liu J., Wörner G., Yang W., Tang Y.-J., Chen Y., Tang L., Zheng J., Li S. (2015) Copper isotopic composition of the silicate Earth. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **427**, 95-103.
- Luck J.-M., Ben Othman D., Albarède F. (2005) Zn and Cu isotopic variations in chondrites and iron meteorites: early solar nebula reservoirs and parent-body processes. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **69**, 5351-5363.
- Luck J.-M., Ben Othman D., Barrat J.A., Albarède F. (2003) Coupled ^{63}Cu and ^{16}O excesses in chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **67**, 143-151.
- Maher K.C., Larson P.B. (2007) Variation in copper isotope ratios and controls on fractionation in hypogene skarn mineralization at Corocochuayco and Tintaya, Peru. *Econ. Geol.*, **102**, 225-237.
- Malitch K.N. (2021) Forecasting criteria for sulphide PGE-copper-nickel deposits of the Noril'sk province. *Lithosphere (Russia)*, **21**(5), 660-682.
- Malitch K.N., Belousova E.A., Griffin W.L., Badanina I.Yu. (2013) Hafnium-neodymium constraints on source heterogeneity of the economic ultramafic-mafic Noril'sk-1 intrusion (Russia). *Lithos*, **164-167**, 36-46.
- Malitch K.N., Belousova E.A., Griffin W.L., Badanina I.Yu., Latypov R.M., Sluzhenikin S.F. (2018) New insights on the origin of ultramafic-mafic intrusions and associated Ni-Cu-PGE sulphide deposits of the Noril'sk and Taimyr provinces, Russia: Evidence from radiogenic- and stable-isotope data. *Processes and ore deposits of ultramafic-mafic magmas through space and time*. (Eds S. Mondal, W.L. Griffin). 1st ed. Amsterdam, Elsevier, 197-238.
- Malitch K.N., Belousova E.A., Griffin W.L., Badanina I.Yu., Pearson N.J., Presnyakov S.L., Tuganova E.V. (2010) Magmatic evolution of the ultramafic-mafic Kharaelakh intrusion (Siberian craton, Russia): Insights from trace-element, U-Pb and Hf-isotope data on zircon. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **159**, 753-768.
- Malitch K.N., Latypov R.M. (2011) Re-Os and S-isotope constraints on age and source heterogeneity of Ni-Cu-PGE sulfide ores: a case study at the Talnakh ore junction (Russia). *Canad. Miner.*, **49**(6), 1653-1677.
- Malitch K.N., Latypov R.M., Badanina I.Yu., Sluzhenikin S.F. (2014) Insights into ore genesis of Ni-Cu-PGE sulfide deposits of the Noril'sk province (Russia): Evidence from copper and sulfur isotopes. *Lithos*, **204**, 172-187.
- Maréchal C., Albarède F. (2002) Ion-exchange fractionation of copper and zinc isotopes. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **66**, 1499-1509.
- Maréchal C.N., Télouk P., Albarède F. (1999) Precise analysis of copper and zinc isotopic compositions by plasma-source mass spectrometry. *Chem. Geol.*, **156**, 251-273.
- Markl G., Lahaye Y., Schwinn G. (2006) Copper isotopes as monitors of redox processes in hydrothermal mineralization. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **70**, 4215-4228.
- Mason T.F.D., Weiss D.J., Chapman J.B., Wilkinson A.J., Tessalina V.G., Spiro A., Horstwood A.S.A., Spratt O., Coles A.J. (2005) Zn and Cu isotopic variability in the Alexandrinka volcanic-hosted massive sulphide (VHMS) ore deposit, Urals, Russia. *Chem. Geol.*, **221**, 170-187.
- Mathur R., Ruiz J., Casselman M.J., Megaw P., van Egmond R. (2012) Use of Cu isotopes to distinguish primary and secondary Cu mineralization in the Canariaco Norte porphyry copper deposit, Northern Peru. *Mineral. Depos.*, **47**, 755-762.
- Mathur R., Ruiz J., Titley S., Liermann L., Buss H., Brantley S. (2005) Cu isotopic fractionation in the supergene environment with and without bacteria. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **69**(22), 5233-5246.
- Mathur R., Titley S., Barra F., Brantley S., Wilson M., Phillips A., Munizaga F., Makshev V., Vervoort J., Hart G. (2009) Exploration potential of Cu isotope fractionation in porphyry copper deposits. *J. Geochem. Explor.*, **102**, 1-6.
- Naldrett A.J. (2004) Magmatic sulfide deposits: Geology, geochemistry and exploration. Heidelberg, Berlin: Springer Verlag, 728 p.
- Naldrett A.J., Fedorenko V.A., Lightfoot P.C., Kunilov V.I., Gorbachev N.S., Doherty W., Johan Z. (1995) Ni-Cu-PGE deposits of Noril'sk region, Siberia: Their formation in conduits for flood basalt volcanism. *Trans. Inst. Min. Metall.*, **104**, B18-B36.
- Okuneva T.G., Karpova S.V., Streletskaia M.V., Soloshenko N.G., Kiseleva D.V. (2022) The method for Cu and Zn isotope ratio determination by MC-ICP-MS using the AG-MP-1 resin. *Geodynam. Tectonophys.*, **13**(2s), 0615. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2s-0615>
- Pirajno F. (2007) Mantle plumes, associated intraplate tectono-magmatic processes and ore systems. *Episodes*, **30**(1), 6-19.
- Pushkarev Yu.D. (1999) The nature of super large ore deposits: a concept of crust-mantle interaction within the mantle. *Mineral Deposits: Processes to Processing*. Balkema, Rotterdam, 1291-1294.
- Ripley E.M., Dong S., Li C., Wasylenski L.E. (2015) Cu isotope variations between conduit and sheet-style Ni-Cu-PGE sulfide mineralization in the Midcontinent Rift System, North America. *Chem. Geol.*, **414**, 59-68.
- Ripley E.M., Li C. (2013) Sulfide saturation in mafic magmas: is external sulfur required for magmatic Ni-Cu-(PGE) ore genesis? *Econ. Geol.*, **108**, 45-58.
- Ripley E.M., Li C. (2003) Sulfur isotope exchange and metal enrichment in the formation of magmatic Cu-Ni-(PGE) deposits. *Econ. Geol.*, **98**, 635-641.
- Ripley E.M., Li C., Moore C.H., Schmitt A.K. (2010) Micro-scale S isotope studies of the Kharaelakh intrusion, Noril'sk region, Siberia: Constraints on the genesis of coexisting anhydrite and sulfide minerals. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **74**, 634-644.
- Ripley E.M., Lightfoot P.C., Li C., Elswick E.R. (2003) Sulfur isotopic studies of continental flood basalts in the

- Noril'sk region: Implications for the association between lavas and ore-bearing intrusions. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **67**, 2805-2817.
- Rosman K.J.R. (1972) A survey of the isotopic and elemental abundance of zinc. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **36**(7), 801-819.
- Rouxel O., Fouquet Y., Ludden J.N. (2004) Copper isotope systematics of the Lucky Strike, Rainbow, and Logatchev seafloor hydrothermal fields on the Mid-Atlantic Ridge. *Econ. Geol.*, **99**, 585-600.
- Shields W.R., Goldich S.S., Garner E.L., Murphy T.J. (1965) Natural variations in the abundance ratio and the atomic weight of copper. *J. Geophys. Res.*, **70**, 479-491.
- Sluzhenikin S.F., Krivolutsкая N.A., Rad'ko V.A., Malitch K.N., Distler V.V., Fedorenko V.A. (2014) Ultramafic-mafic intrusions, volcanic rocks and PGE-Cu-Ni sulfide deposits of the Noril'sk province, Polar Siberia. Field trip guidebook. 12th International Platinum Symposium. Ekaterinburg, Russia: Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IGG UB RAS), 80 p.
- Tang D., Qin K., Su B., Mao Y., Evans N.J., Niu Y., Kang Z. (2020) Sulfur and copper isotopic signatures of chalcopyrite at Kalatongke and Baishiquan: Insights into the origin of magmatic Ni-Cu sulfide deposits. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **275**, 209-228.
- Walker R.J., Morgan J.W., Horan M.F., Czamanske G.K., Krogstad E.J., Fedorenko V.A., Kunilov V.E. (1994) Re-Os isotopic evidence for an enriched-mantle source for the Noril'sk-type, ore-bearing intrusion, Siberia. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **58**, 4179-4197.
- Wang D., Sun X., Zheng Y., Wu S., Xia S., Chang H., Yu M. (2017) Two pulses of mineralization and genesis of the Zhaxikang Sb-Pb-Zn-Ag deposit in southern Tibet: constraints from Fe-Zn isotopes. *Ore Geol. Rev.*, **84**, 347-363.
- Wilkinson J.J. (2023) The potential of Zn isotopes in the science and exploration of ore deposits. (Eds D. Huston, J. Gutzmer) *Isotopes in Economic Geology, Metallogenes and Exploration*. Cham: Springer, 451-463.
- Wilkinson J.J., Weiss D.J., Mason T.F.D., Coles B.J. (2005) Zinc isotope variation in hydrothermal systems: preliminary evidence from the Irish Midlands ore field. *Econ. Geol.*, **100**, 583-590.
- Wooden J.L., Czamanske G.K., Bouse R.M., Likhachev A.P., Kunilov V.E., Lyul'ko V. (1992) Pb isotope data indicate a complex mantle origin for the Noril'sk-Talnakh ores, Siberia. *Econ. Geol.*, **87**, 1153-1165.
- Wu L.-Y., Hu R.-Z., Li X.-F., Liu S.-A., Tang Y.-W., Yong-Yong Tang Y.-Y. (2017) Copper isotopic compositions of the Zijinshan high-sulfidation epithermal Cu-Au deposit, South China: Implications for deposit origin. *Ore Geol. Rev.*, **83**, 191-199.
- Zhao Y., Xue C.J., Liu S.A., Mathur R., Zhao X.B., Yang Y.Q., Dai J.F., Man R.H., Liu X.M. (2019) Redox reactions control Cu and Fe isotope fractionation in a magmatic Ni-Cu mineralization system. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **249**, 42-58.
- Zhao Y., Xue C., Liu S.-A., Symons D.T.A., Zhao X., Yang Y., Ke J. (2017) Copper isotope fractionation during sulfide-magma differentiation in the Tulaergen magmatic Ni-Cu deposit, NW China. *Lithos*, **286-287**, 206-215.
- Zhou J.-X., Huang Z.-L., Zhou M.-F., Zhu X.-K., Muchez P. (2014) Zinc, sulfur and lead isotopic variations in carbonate-hosted Pb-Zn sulfide deposits, southwest China. *Ore Geol. Rev.*, **58**, 41-54.
- Zhu X.K., Guo Y., Williams R.J.P., O'Nions R.K., Matthews A., Burgess B.K., Salvato B. (2002) Mass fractionation processes of transition metal isotopes. *Earth. Planet. Sci. Lett.*, **200**, 47-62.
- Zhu X.K., O'Nions R.K., Guo Y., Belshaw N.S., Rickard D. (2000) Determination of natural Cu-isotope variation by plasma-source mass spectrometry: implications for use as geochemical tracers. *Chem. Geol.*, **163**, 139-149.

REFERENCES

- Albarède F. (2004) The stable isotope geochemistry of copper and zinc. *Rev. Mineral. Geochem.*, **55**, 409-427.
- Albarède F. (2009) Volatile accretion history of the terrestrial planets and dynamic implications. *Nature*, **461**, 1227-1233.
- Arndt N.T., Czamanske G.K., Walker R.J., Chauvel C., Fedorenko V.A. (2003) Geochemistry and origin of the intrusive hosts of the Noril'sk-Talnakh Cu-Ni-PGE sulfide deposits. *Econ. Geol.*, **98**, 495-515.
- Asael D., Matthews A., Bar-Matthews M., Halicz L. (2007) Copper isotope fractionation in sedimentary copper mineralization (Timna Valley, Israel). *Chem. Geol.*, **243**, 238-254.
- Asael D., Matthews A., Bar-Matthews M., Harlavan Y., Segal I. (2012) Tracking redox controls and sources of sedimentary mineralization using copper and lead isotopes. *Chem. Geol.*, **310-311**, 23-35.
- Asael D., Matthews A., Butler I., Rickard A.D., Bar-Matthews M., Halicz L. (2006) $^{65}\text{Cu}/^{63}\text{Cu}$ fractionation during copper sulphide formation from iron sulphides in aqueous solution. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **70**(18S), A23.
- Asael D., Matthews A., Oszczepalski S., Bar-Matthews M., Halicz L. (2009) Fluid speciation controls of low temperature copper isotope fractionation applied to the Kupferschiefer and Timna ore deposits. *Chem. Geol.*, **262**, 147-158.
- Barnes S.J., Malitch K.N., Yudovskaya M.A. (2020) Introduction to a Special Issue on the Noril'sk-Talnakh Ni-Cu-platinum group element deposits. *Econ. Geol.*, **115**(6), 1157-1172.
- Ben Othman D., Luck J.M., Bodinier J.L., Arndt N.T., Albarède F. (2006) Cu-Zn isotopic variations in the Earth's mantle. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **70**(18S), A46.
- Bogatikov O.A., Kovalenko V.I., Sharkov E.V. (2010) Magmatism, tectonics, geodynamics of the Earth: connections in time and space. Moscow, Nauka Publ., 605 p. (In Russ.)
- Chen H., Savage P., Teng F.Z., Helz R.T., Moynier F. (2013) Zinc isotope fractionation during magmatic differentiation and the isotopic composition of the bulk Earth. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **369-370**, 34-42.
- Czamanske G.K., Zen'ko T.E., Fedorenko V.A., Calk L.C., Budahn J.R., Bullock J.H. Jr., Fries T.L., King B.S., Siems D.F. (1995) Petrography and geochemical characterization of ore-bearing intrusions of the Noril'sk type, Siberia; with discussion of their origin. *Res. Geol., Spec. Iss.*, **18**, 1-48.
- Distler V.V., Grokhovskaya T.L., Evstigneeva T.L., Sluzhenikin S.F., Filimonova A.A., Dyuzhikov O.A., Laputi-

- na I.P. (1988) Petrology of magmatic sulphide ore formation. Moscow, Nauka Publ., 232 p. (In Russ.)
- Dobretsov N.L. (1997) Permo-Triassic magmatism and sedimentation in Eurasia as expression of a mantle superplume. *Dokl. Earth Sci.*, **354**(4), 497-500 (translated from *Doklady RAN*, **354**(2), 220-223).
- Dobretsov N.L., Borisenko A.S., Izokh A.E., Zhmodik S.M. (2010) Thermochemical model of Permo-Triassic mantle plumes of Eurasia as a basis for identifying patterns of formation and forecasting copper-nickel, noble and rare metal deposits. *Geol. Geophys.*, **51**(9), 1159-1187. (In Russ.)
- Dodin D.A. (2002) Metallogeny of the Taimyr-Noril'sk region. St.Petersburg, Nauka Publ., 822 p. (In Russ.)
- Dyuzhikov O.A., Distler V.V., Strunin B.M., Mkrtchyan A.K., Sherman M.L., Sluzhenikin S.F., Lur'e A.M. (1988) Geology and ore content of the Noril'sk region. Moscow, Nauka Publ., 279 p. (In Russ.)
- Exploration criteria for Noril'sk-type sulphide ores. (1978) (Ed. V.S. Sobolev). Novosibirsk, Nauka Publ., 167 p. (In Russ.)
- Gagnevin D., Boyee A.J., Barrie C.D., Menuge J.F., Blake-man R.J. (2012) Zn, Fe and S isotope fractionation in a large hydrothermal system. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **88**, 183-198.
- 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. (1981) Sulphide copper-nickel ores of the Noril'sk deposits. Moscow, Nauka Publ., 234 p. (In Russ.)
- Godlevskii M.N. (1959) Traps and ore-bearing intrusions of the Noril'sk region. Moscow, Gostekhmetizdat Publ., 68 p. (In Russ.)
- Graham S., Pearson N., Jackson S., Griffin W., O'Reilly S.Y. (2004) Tracing Cu and Fe from source to porphyry: in situ determination of Cu and Fe isotope ratios in sulfides from the Grasberg Cu-Au deposit. *Chem. Geol.*, **207**, 147-169.
- Grinenko L.N. (1985) Sources of sulfur of the nickeliferous and barren gabbro-dolerite intrusions of the northwest Siberian platform. *Int. Geol. Rev.*, **28**, 695-708.
- Grinenko L.N. (1990) Substance sources and conditions of formation of sulphide copper-nickel ores deduced from isotope-geochemical data. *Geology of copper-nickel deposits of the USSR*. Leningrad, Nauka Publ., 57-66. (In Russ.)
- Isotope Geology of the Noril'sk deposits. (2019) (Ed. O. Petrov). Cham, Springer Nature, 306 p.
- John S.G., Rouxel O.J., Craddock P.R., Engwall A.M., Boyle E.A. (2008) Zinc stable isotopes in seafloor hydrothermal vent fluids and chimneys. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **269**, 17-28.
- Kelley K.D., Wilkinson J.J., Chapman J.B., Crowther H.L., Weiss D.J. (2009) Zinc isotopes in sphalerite from base metal deposits in the Red Dog district, northern Alaska. *Econ. Geol.*, **104**, 767-773.
- Krivolutskaya N.A. (2016) Siberian traps and Pt-Cu-Ni deposits in the Noril'sk Area. Cham, Springer International Publishing Switzerland, 364 p.
- Larson P.B., Maher K., Ramos F.C., Chang Z.S., Gaspar M., Meinert L.D. (2003) Copper isotope ratios in magmatic and hydrothermal ore-forming environments. *Chem. Geol.*, **201**(3-4), 337-350.
- Li C., Ripley E.M., Naldrett A.J. (2003) Compositional variations of olivine and sulfur isotopes in the Noril'sk and Talnakh intrusions, Siberia: implications for ore-forming processes in dynamic magma conduits. *Econ. Geol.*, **98**, 69-86.
- Li W.-Q., Jackson S.E., Pearson N.J., Alard O., Chappell B.W. (2009) The Cu isotopic signature of granites from the Lachlan Fold Belt, SE Australia. *Chem. Geol.*, **258**, 38-49.
- Likhachev A.P. (2006) Ni-Cu-PGE and PGE deposits. Moscow, Eslan Publ., 496 p. (In Russ.)
- Likhachev A.P. (2020) Search coverage of the Noril'sk region and the possibility of discovering new Pt-Cu-Ni deposits. *Otechestvennaya Geologiya*, (2), 3-16. (In Russ.)
- Liu S.-A., Huang J., Liu J., Wörner G., Yang W., Tang Y.-J., Chen Y., Tang L., Zheng J., Li S. (2015) Copper isotopic composition of the silicate Earth. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **427**, 95-103.
- Luck J.-M., Ben Othman D., Albarède F. (2005) Zn and Cu isotopic variations in chondrites and iron meteorites: early solar nebula reservoirs and parent-body processes. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **69**, 5351-5363.
- Luck J.-M., Ben Othman D., Barrat J.A., Albarède F. (2003) Coupled ^{63}Cu and ^{16}O excesses in chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **67**, 143-151.
- Lyakhnitskaya I.V., Tuganova E.V. (1977) Regional and local regularities of distribution of Cu-Ni sulphide deposits. Leningrad, Nedra Publ., 77 p. (In Russ.)
- Lyul'ko V.A., Fedorenko V.A., Distler V.V., Sluzhenikin S.F., Kunilov V.E., Stekhin A.I., Ryabikin V.A., Simonov O.N., Zen'ko T.E. (1994) Geology and ore deposits of the Noril'sk region: Guidebook of the VII International Platinum Symposium. Moscow-Noril'sk. Moscow, Moskovskii Kontakt Publ., 43 p. (In Russ.)
- Maher K.C., Larson P.B. (2007) Variation in copper isotope ratios and controls on fractionation in hypogene skarn mineralization at Corocochaucayco and Tintaya, Peru. *Econ. Geol.*, **102**, 225-237.
- Malitch K.N. (2021) Forecasting criteria for sulphide PGE-copper-nickel deposits of the Noril'sk province. *Lithosphere (Russia)*, **21**(5), 660-682.
- Malitch K.N., Badanina I.Yu., Tuganova E.V. (2010) Magmatic evolution of ultramafic-mafic intrusions of the Noril'sk province (Russia): compositional and geochronological data. *Lithosphere (Russia)*, (5), 37-63. (In Russ.)
- Malitch K.N., Badanina I.Yu., Tuganova E.V. (2018) Ore-bearing ultramafic-mafic intrusions of Polar Siberia: age, origin and prediction criteria. Ekaterinburg, IGG UB RAS, 287 p. (In Russ.)
- Malitch K.N., Belousova E.A., Griffin W.L., Badanina I.Yu. (2013) Hafnium-neodymium constraints on source heterogeneity of the economic ultramafic-mafic Noril'sk-1 intrusion (Russia). *Lithos*, **164-167**, 36-46.
- Malitch K.N., Belousova E.A., Griffin W.L., Badanina I.Yu., Latypov R.M., Sluzhenikin S.F. (2018) New insights on the origin of ultramafic-mafic intrusions and associated Ni-Cu-PGE sulphide deposits of the Noril'sk and Taimyr provinces, Russia: Evidence from radiogenic- and stable-isotope data. *Processes and ore deposits of ultramafic-mafic magmas through space and time*. (Eds S. Mondal, W.L. Griffin). 1st ed. Amsterdam, Elsevier, 197-238.
- Malitch K.N., Belousova E.A., Griffin W.L., Badanina I.Yu., Pearson N.J., Presnyakov S.L., Tuganova E.V. (2010) Magmatic evolution of the ultramafic-mafic Kharaelakh

- intrusion (Siberian craton, Russia): Insights from trace-element, U-Pb and Hf-isotope data on zircon. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **159**, 753-768.
- Malitch K.N., Latypov R.M. (2011) Re-Os and S-isotope constraints on age and source heterogeneity of Ni-Cu-PGE sulfide ores: a case study at the Talnakh ore junction (Russia). *Canad. Miner.*, **49**(6), 1653-1677.
- Malitch K.N., Latypov R.M., Badanina I.Yu., Sluzhenikin S.F. (2014) Insights into ore genesis of Ni-Cu-PGE sulfide deposits of the Noril'sk province (Russia): Evidence from copper and sulfur isotopes. *Lithos*, **204**, 172-187.
- Maréchal C., Albarède F. (2002) Ion-exchange fractionation of copper and zinc isotopes. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **66**, 1499-1509.
- Maréchal C.N., Télouk P., Albarède F. (1999) Precise analysis of copper and zinc isotopic compositions by plasma-source mass spectrometry. *Chem. Geol.*, **156**, 251-273.
- Markl G., Lahaye Y., Schwinn G. (2006) Copper isotopes as monitors of redox processes in hydrothermal mineralization. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **70**, 4215-4228.
- Mason T.F.D., Weiss D.J., Chapman J.B., Wilkinson A.J., Tessalina V.G., Spiro A., Horstwood A.S.A., Spratt O., Coles A.J. (2005) Zn and Cu isotopic variability in the Alexandrinka volcanic-hosted massive sulphide (VHMS) ore deposit, Urals, Russia. *Chem. Geol.*, **221**, 170-187.
- Mathur R., Ruiz J., Casselman M.J., Megaw P., van Egmund R. (2012) Use of Cu isotopes to distinguish primary and secondary Cu mineralization in the Canariaco Norte porphyry copper deposit, Northern Peru. *Mineral. Depos.*, **47**, 755-762.
- Mathur R., Ruiz J., Titley S., Liermann L., Buss H., Brantley S. (2005) Cu isotopic fractionation in the supergene environment with and without bacteria. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **69**(22), 5233-5246.
- Mathur R., Titley S., Barra F., Brantley S., Wilson M., Phillips A., Munizaga F., Maksaev V., Vervoort J., Hart G. (2009) Exploration potential of Cu isotope fractionation in porphyry copper deposits. *J. Geochem. Explor.*, **102**, 1-6.
- Metallogenic map of the north-western Siberian Platform. Scale 1 : 500 000. (1987) (Ed. N.S. Malitch). 16 sheets. Explanatory note. Leningrad, Cartographic Factory VSEGEI Publ., 149 p. (In Russ.)
- Naldrett A.J. (2004) Magmatic sulfide deposits: Geology, geochemistry and exploration. Heidelberg, Berlin, Springer Verlag, 728 p.
- Naldrett A.J., Fedorenko V.A., Lightfoot P.C., Kunilov V.I., Gorbachev N.S., Doherty W., Johan Z. (1995) Ni-Cu-PGE deposits of Noril'sk region, Siberia: Their formation in conduits for flood basalt volcanism. *Trans. Inst. Min. Metall.*, **104**, B18-B36.
- Okuneva T.G., Karpova S.V., Streletskaia M.V., Soloshenko N.G., Kiseleva D.V. (2022) The method for Cu and Zn isotope ratio determination by MC-ICP-MS using the AG-MP-1 resin. *Geodynam. Tectonophys.*, **13**(2s), 0615. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2s-0615>
- Pirajno F. (2007) Mantle plumes, associated intraplate tectono-magmatic processes and ore systems. *Episodes*, **30**(1), 6-19.
- Pushkarev Yu.D. (1999) The nature of super large ore deposits: a concept of crust-mantle interaction within the mantle. *Mineral Deposits: Processes to Processing*. Balkema, Rotterdam, 1291-1294.
- Pushkarev Yu.D. (1997) Two types of interaction of crustal and mantle materials and new approach to problems of deep-seated ore formation. *Dokl. RAN*, **355**(4), 524-526. (In Russ.)
- Rad'ko V.A. (2016) Facies of intrusive and effusive magmatism of the Noril'sk region. St.Petersburg, St.Petersburg Cartographic Factory VSEGEI Publ., 226 p. (In Russ.)
- Rad'ko V.A. (1991) Model of dynamic differentiation of intrusive traps in the northwestern Siberian platform. *Sov. Geol. Geophys.*, **32**, 15-20. (In Russ.)
- Ripley E.M., Dong S., Li C., Wasylenki L.E. (2015) Cu isotope variations between conduit and sheet-style Ni-Cu-PGE sulfide mineralization in the Midcontinent Rift System, North America. *Chem. Geol.*, **414**, 59-68.
- Ripley E.M., Li C. (2013) Sulfide saturation in mafic magmas: is external sulfur required for magmatic Ni-Cu-(PGE) ore genesis? *Econ. Geol.*, **108**, 45-58.
- Ripley E.M., Li C. (2003) Sulfur isotope exchange and metal enrichment in the formation of magmatic Cu-Ni-(PGE) deposits. *Econ. Geol.*, **98**, 635-641.
- Ripley E.M., Li C., Moore C.H., Schmitt A.K. (2010) Micro-scale S isotope studies of the Kharaelakh intrusion, Noril'sk region, Siberia: Constraints on the genesis of coexisting anhydrite and sulfide minerals. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **74**, 634-644.
- Ripley E.M., Lightfoot P.C., Li C., Elswick E.R. (2003) Sulfur isotopic studies of continental flood basalts in the Noril'sk region: Implications for the association between lavas and ore-bearing intrusions. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **67**, 2805-2817.
- Rosman K.J.R. (1972) A survey of the isotopic and elemental abundance of zinc. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **36**(7), 801-819.
- Rouxel O., Fouquet Y., Ludden J.N. (2004) Copper isotope systematics of the Lucky Strike, Rainbow, and Logatchev seafloor hydrothermal fields on the Mid-Atlantic Ridge. *Econ. Geol.*, **99**, 585-600.
- Ryabov V.V., Shevko A.Yu., Gora M.P. (2000) Igneous formations of the Noril'sk region. V. 1. Petrology of traps. Novosibirsk, Nonaprel' Publ., 408 p. (In Russ.)
- Rzhevskii V.F., Gablina I.F., Vasilovskaya L.V., Lur'e A.M. (1988) Genetic features of the Gravel copper deposit. *Litol. Polez. Iskop.*, (2), 86-97. (In Russ.)
- Rzhevsky V.F., Miroshnikov A.E., Dushatkin A.B., Shklyarik G.K. (1980) Copper mineralization in the Upper Precambrian of the Igarka Area. *Processes governing the accumulation of sedimentary and volcanogenic-sedimentary deposits of nonferrous metals (Siberia and the Far East)*. Novosibirsk, Nauka Publ., 81-84. (In Russ.)
- Shields W.R., Goldich S.S., Garner E.L., Murphy T.J. (1965) Natural variations in the abundance ratio and the atomic weight of copper. *J. Geophys. Res.*, **70**, 479-491.
- Sluzhenikin S.F. (2000) Low-sulfide platinum mineralization in differentiated basic-ultrabasic intrusions of the Noril'sk region. Author's abstract diss. ... cand. geol.-min. sciences. Moscow, IGM RAN, 26 p. (In Russ.)
- Sluzhenikin S.F., Distler V.V., Dyuzhikov O.A., Kravtsov V.F., Kunilov V.E., Laputina I.P., Turovtsev D.M. (1994) Low-sulphide platinum mineralization of the Noril'sk differentiated intrusions. *Geol. Rud. Mestorozhd.*, **36**(3), 195-217. (In Russ.)
- Sluzhenikin S.F., Krivolutskaia N.A., Rad'ko V.A., Malitch K.N., Distler V.V., Fedorenko V.A. (2014) Ultramafic-mafic intrusions, volcanic rocks and PGE-Cu-Ni

- sulfide deposits of the Noril'sk province, Polar Siberia. Field trip guidebook. 12th International Platinum Symposium. Ekaterinburg, IGG UB RAS, 80 p.
- Sluzhenikin S.F., Malitch K.N., Turovtsev D.M., Grigor'eva A.V., Badanina I.Yu. (2020) Differentiated mafic-ultramafic intrusions of the Zubovsky type in the Noril'sk area: petrochemistry, geochemistry, and ore potential. *Petrology*, **28**(5), 458-489 (translated from *Petrologiya*, **28**(5), 511-544).
- Sluzhenikin S.F., Malitch K.N., Yudovskaya M.A., Turovtsev D.M., Antsiferova T.N., Mikhalev S.K., Badanina I.Yu., Soloshenko N.G. (2023) Low Talnakh type intrusions of the Noril'sk ore region. *Petrology*, **31**(5), 492-518. <https://doi.org/10.1134/S0869591123050065> (translated from *Petrologiya*, **31**(5), 482-509).
- Spiridonov E.M. (2010) Ore-magmatic systems of the Noril'sk ore field. *Geol. Geofiz.*, **51**(9), 1356-1378. (In Russ.)
- Tang D., Qin K., Su B., Mao Y., Evans N.J., Niu Y., Kang Z. (2020) Sulfur and copper isotopic signatures of chalcopyrite at Kalatongke and Baishiquan: Insights into the origin of magmatic Ni-Cu sulfide deposits. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **275**, 209-228.
- Tuganova E.V. (1991) Petrological geodynamical model of formation of sulfide copper-nickel deposits. *Geol. Geophys.*, **32**, 1-7 (translated from *Geol. Geofiz.*, **32**(6), 3-11).
- Tuganova E.V. (2000) Petrographic types, genesis and distribution patterns of sulphide Ni-Cu-PGE deposits. St. Petersburg, VSEGEI Publ., 102 p. (In Russ.)
- Walker R.J., Morgan J.W., Horan M.F., Czamanske G.K., Krogstad E.J., Fedorenko V.A., Kunilov V.E. (1994) Re-Os isotopic evidence for an enriched-mantle source for the Noril'sk-type, ore-bearing intrusion, Siberia. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **58**, 4179-4197.
- Wang D., Sun X., Zheng Y., Wu S., Xia S., Chang H., Yu M. (2017) Two pulses of mineralization and genesis of the Zhaxikang Sb-Pb-Zn-Ag deposit in southern Tibet: constraints from Fe-Zn isotopes. *Ore Geol. Rev.*, **84**, 347-363.
- Wilkinson J.J. (2023) The potential of Zn isotopes in the science and exploration of ore deposits. (Eds D. Huston, J. Gutzmer). *Isotopes in Economic Geology, Metallogenesis and Exploration*. Cham, Springer, 451-463.
- Wilkinson J.J., Weiss D.J., Mason T.F.D., Coles B.J. (2005) Zinc isotope variation in hydrothermal systems: preliminary evidence from the Irish Midlands ore field. *Econ. Geol.*, **100**, 583-590.
- Wooden J.L., Czamanske G.K., Bouse R.M., Likhachev A.P., Kunilov V.E., Lyul'ko V. (1992) Pb isotope data indicate a complex mantle origin for the Norilsk-Talnakh ores, Siberia. *Econ. Geol.*, **87**, 1153-1165.
- Wu L.-Y., Hu R.-Z., Li X.-F., Liu S.-A., Tang Y.-W., Yong-Yong Tang Y.-Y. (2017) Copper isotopic compositions of the Zijinshan high-sulfidation epithermal Cu-Au deposit, South China: Implications for deposit origin. *Ore Geol. Rev.*, **83**, 191-199.
- Zen'ko T.E. (1983) Mechanism of formation of the Noril'sk ore-bearing intrusions. *Izvestiya Akademii Nauk SSSR. Ser. Geol.*, (11), 21-39. (In Russ.)
- Zhao Y., Xue C.J., Liu S.A., Mathur R., Zhao X.B., Yang Y.Q., Dai J.F., Man R.H., Liu X.M. (2019) Redox reactions control Cu and Fe isotope fractionation in a magmatic Ni-Cu mineralization system. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **249**, 42-58.
- Zhao Y., Xue C., Liu S.-A., Symons D.T.A., Zhao X., Yang Y., Ke J. (2017) Copper isotope fractionation during sulfide-magma differentiation in the Tulaergen magmatic Ni-Cu deposit, NW China. *Lithos*, **286-287**, 206-215.
- Zhou J.-X., Huang Z.-L., Zhou M.-F., Zhu X.-K., Muchez P. (2014) Zinc, sulfur and lead isotopic variations in carbonate-hosted Pb-Zn sulfide deposits, southwest China. *Ore Geol. Rev.*, **58**, 41-54.
- Zolotukhin V.V., Ryabov Y.A., Vasil'ev Y.R., Shatkov V.A. (1975) Petrology of the Talnakh ore-bearing differentiated trap intrusion. Novosibirsk, Nauka Publ., 432 p. (In Russ.)
- Zotov I.A. (1979) Genesis of trap intrusions and metamorphic formations of Talnakh. Moscow, Nauka Publ., 155 p. (In Russ.)
- Zhu X.K., Guo Y., Williams R.J.P., O'Nions R.K., Matthews A., Burgess B.K., Salvato B. (2002) Mass fractionation processes of transition metal isotopes. *Earth. Planet. Sci. Lett.*, **200**, 47-62.
- Zhu X.K., O'Nions R.K., Guo Y., Belshaw N.S., Rickard D. (2000) Determination of natural Cu-isotope variation by plasma-source mass spectrometry: implications for use as geochemical tracers. *Chem. Geol.*, **163**, 139-149.