

ИЗОТОПНО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ИНДИКАТОРЫ ПРОГНОЗА БОГАТЫХ СУЛЬФИДНЫХ ПЛАТИНОИДНО-МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ РУД ПОЛЯРНОЙ СИБИРИ

© 2024 г. К. Н. Малич

Объект и актуальность исследований. С ультрамафит-мафитовыми интрузивами Полярной Сибири связаны уникальные месторождения платиноидов, никеля и меди. Промышленное значение сульфидных платиноидно-медно-никелевых (ЭПГ-Cu-Ni) месторождений предопределяет необходимость выявления на их примере наиболее эффективных предпосылок и признаков прогноза для поиска подобных месторождений. *Результаты.* На примере различно рудоносных ультрамафит-мафитовых интрузивов и сульфидных ЭПГ-Cu-Ni руд Полярной Сибири предложены новые изотопно-геохимические критерии, позволяющие оценить перспективы выявления новых рудных объектов. Наиболее значимыми информационными параметрами при оценке рудоносности ультрамафит-мафитовых интрузивов являются изотопные составы осмия, меди и серы в Cu-Ni сульфидах. На основе сочетания изотопных составов осмия, серы и меди выявлены интрузивные тела, в которых вкрапленные сульфидные руды обладают сходными изотопными параметрами с богатыми рудами промышленных платиноидно-медно-никелевых месторождений. Наиболее перспективными на обнаружение богатых ЭПГ-Cu-Ni руд являются Черногорский и Дюмталейский ультрамафит-мафитовые интрузивы. *Выводы.* Изотопно-геохимические исследования позволили на принципиально новом уровне изучения вещества провести оценку перспектив выявления богатых платиноидно-медно-никелевых сульфидных руд в рудоносных и потенциально рудоносных интрузивах Полярной Сибири. Таким образом, апробирован новый критерий научного прогноза, позволяющий оценить перспективы выявления богатых сульфидных ЭПГ-Cu-Ni руд в ультрамафит-мафитовых интрузивах Полярной Сибири.

Ключевые слова: ультрамафит-мафитовые интрузивы, сульфидные платиноидно-медно-никелевые месторождения, Os-Cu-S изотопные системы, критерии прогноза, Норильская провинция, Таймырская провинция

ВВЕДЕНИЕ

Возрастающий спрос на элементы платиновой группы (ЭПГ) предопределяет необходимость расширения их минерально-сырьевой базы, что связано с выявлением новых источников платиноидов и использованием новых подходов при прогнозировании месторождений стратегических видов минерального сырья. В России главным по значимости источником платиновых металлов являются сульфидные платиноидно-медно-никелевые (ЭПГ-Cu-Ni) месторождения Норильского района, вмещающие богатейшие комплексные руды на Земле (рис. 1), 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 трлн долл., где доля платиноидов составляет около 60% [Barnes et al., 2020].

Самыми острыми и до сих пор нерешенными являются следующие вопросы: 1) об источниках силикатного и рудного вещества; 2) продолжительно-

сти образования пород и руд интрузивов; 3) взаимоотношении рудоносных интрузивов с вулканами; 4) характере взаимодействия между первичными магмами с континентальной корой и/или субконтинентальной литосферной мантией (SCLM). От решения данных вопросов зависит эффективность научного прогнозирования богатых ЭПГ-Cu-Ni руд. Появление новых методов исследований, прежде всего изотопно-геохимических, предопределяет необходимость постоянного совершенствования существующих моделей образования и критериев прогнозирования сульфидных ЭПГ-Cu-Ni месторождений.

В данной работе обобщены результаты прикладных исследований в рамках НИР (№ АААА-А18-118052590026-5 и 122022600107-1) государственного задания ИГГ УрО РАН.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Уникальные месторождения платиноидов, никеля и меди приурочены к трем промышленно-рудоносным интрузивам (Хараеласкому, Талнахскому и Норильск-1), расположенным в пределах

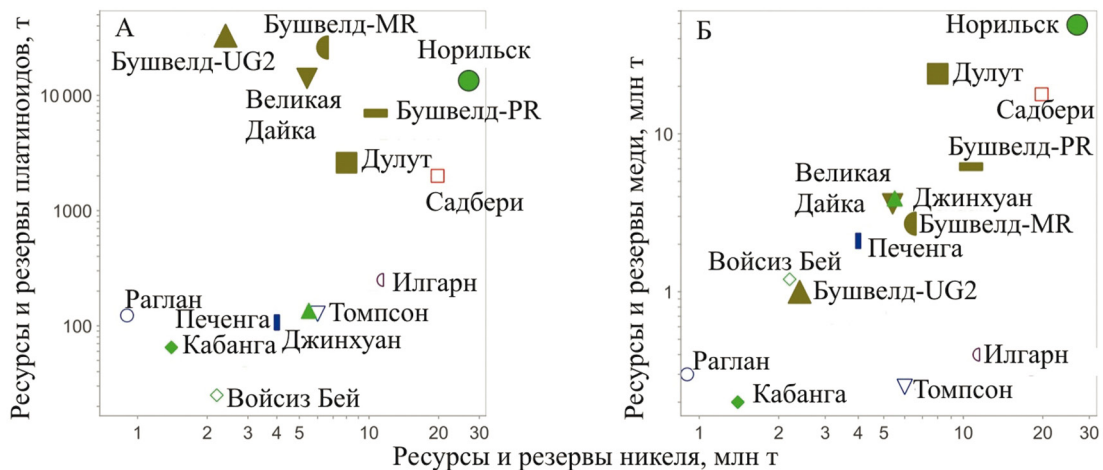


Рис. 1. Положение сульфидных ЭПГ-Cu-Ni месторождений в глобальной перспективе предполагаемых запасов (до добычи) и ресурсов для основных мировых групп магматических сульфидных месторождений, содержащих Ni, Cu и ЭПГ (Pt + Pd) [Barnes et al., 2020].

Норильско-Игарской палеорифтогенной системы на северо-западе Сибирской платформы. Платиноиды сосредоточены в сульфидных ЭПГ-Cu-Ni рудах, которые представлены двумя главными типами. Первый тип характеризует богатые (массив-

ные и “медистые”) платиноидно-медно-никелевые сульфидные руды промышленных месторождений, которые тяготеют обычно к нижнему контакту Талнахского и Хараелахского интрузивов (рис. 2). В структуре запасов они составляют 22.6% и обе-

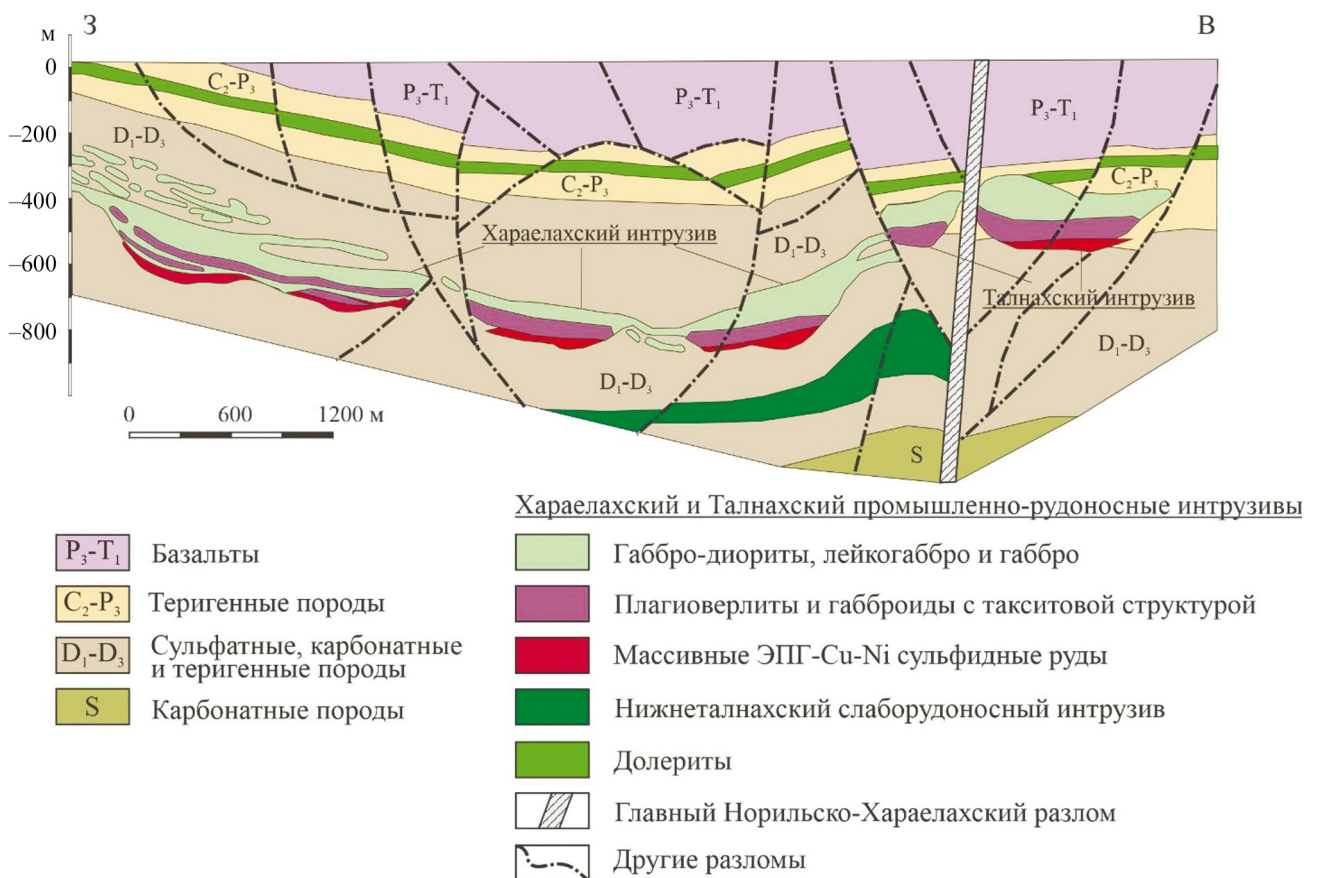


Рис. 2. Геологический разрез Талнахского рудного узла [Дюжиков и др., 1988 с изменениями].

спечивают 75.1% добычи платиноидов [Государственный доклад..., 2023]. Второй тип образован вкрапленными рудами, расположенными в нижних частях интрузивов, сложенных ультраосновными породами и разновидностями мафитов с такситовой текстурой. Их доля в запасах и добыче платиноидов составляет соответственно 77.4 и 24.9% [Государственный доклад..., 2023]. Среди сульфидов массивных и вкрапленных руд доминируют пирротин, халькопирит и пентландит.

Еще один тип руд приурочен к малосульфидному (МС) обогащенному платиноидами горизонту, который пока не вовлечен в эксплуатацию. Он имеет мощность от 2 до 50 м, встречается исключительно в верхних частях интрузивов вместе с линзами хромита и характеризуется [Служеникин, 2000] высоким содержанием ЭПГ (5.43 г/т в интрузиве Норильск-1, 5.94 г/т в Талнахском интрузиве); значе-

ние $\sum \text{ЭПГ/S}$ варьирует в пределах от 5 до 20, в отличие от 0.8–1.2 до 3 в медистых рудах талнахско-норильских сульфидных месторождений.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Петролого-геохимический анализ ультрамафит-мафитовых интрузивов, расположенных в различных частях стратиграфического разреза Норильской провинции (рис. 3), позволил ранжировать их по степени перспективности на платиноидно-медно-никелевые руды в составе трех геолого-экономических типов (табл. 1).

1. *Промышленно-рудоносные интрузивы* объединяют интрузивы ультрамафит-мафитового состава норильского (норильско-талнахского) типа, содержащие четко выраженный горизонт перидотитов и повышенное количество хрома, с ко-

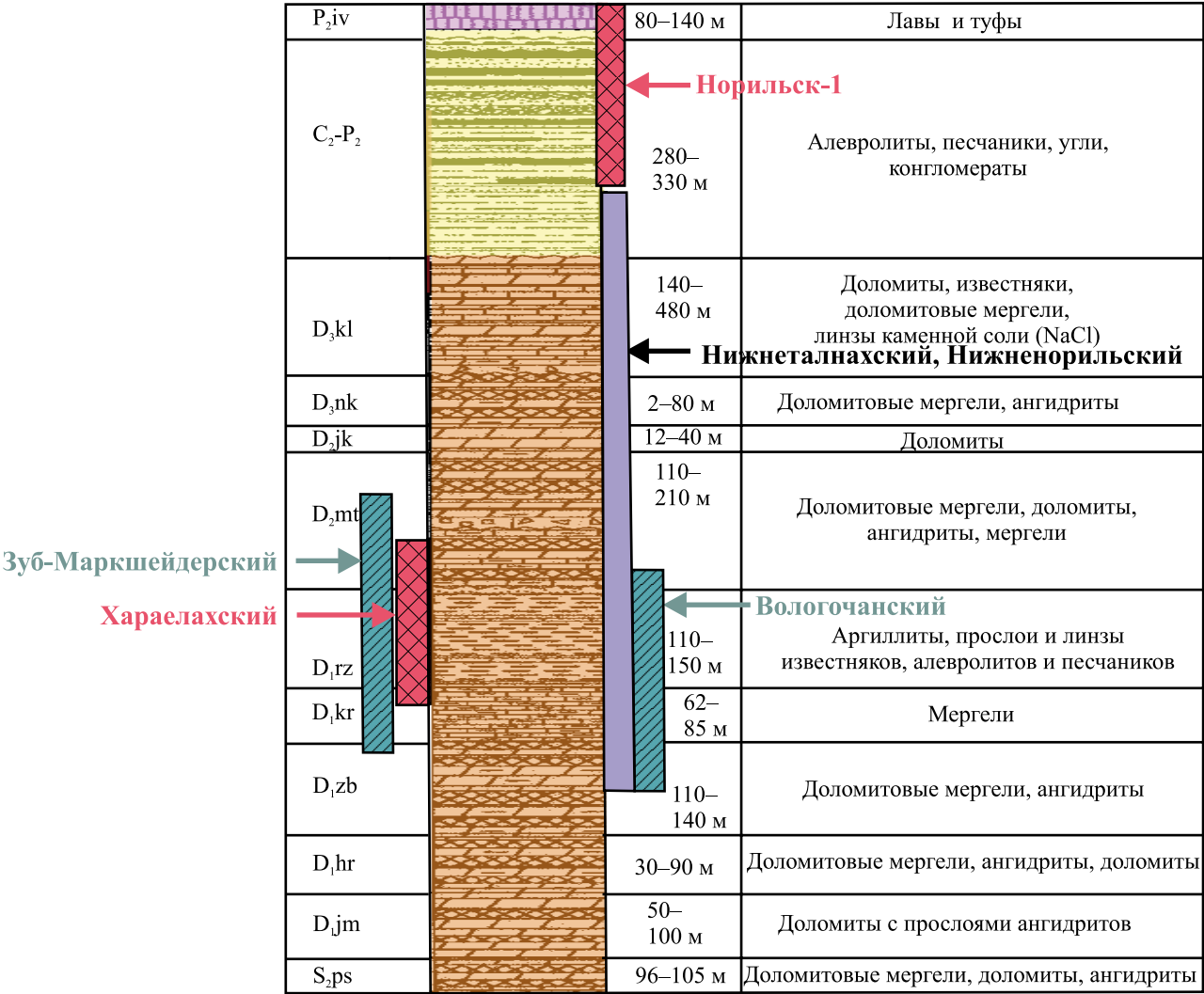


Рис. 3. Стратиграфический разрез, показывающий расположение промышленно-рудоносных (Хараелашского, Талнахского и Норильск-1), рудоносных (Черногорского, Зуб-Маркшейдерского и Вологочанского) интрузивов и слаборудоносного Нижнеталнахского интрузива [Дюжиков и др., 1988; Czamanske et al., 1995].

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

Интрузив	Скважина, рудник	Тип интрузива
Хараелахский Талнахский Норильск-1	КЗ-844, КЗ-963, Октябрьский ОУГ-2 МН-2	Промышленно-рудноносные (включающие сульфидные массивные, прожилково-вкрапленные и вкрапленные ЭПГ-Cu-Ni руды и малосульфидные ЭПГ руды уникальных и крупных ЭПГ-Cu-Ni месторождений)
Черногорский Вологочанский Зуб-Маркшейдерский	МП-2бис ОВ-29 МП-27	Рудоносные (содержащие вкрапленные сульфидные ЭПГ-Cu-Ni руды средних и мелких ЭПГ-Cu-Ni месторождений, находящихся в резерве)
Нижнеталнахский Нижненорильский Зеленогневский	ТГ-31 НП-37 Ф-233	Слаборудоносные (с вкрапленной непромышленной Cu-Ni минерализацией)
Дюмталейский Бинюдинский	ТП-43 С-1	Потенциально рудоносные (“слабоизученные”)

торыми ассоциируют вкрапленные, прожилково-вкрапленные и массивные залежи, жилы и шпильры, образующие крупные и уникальные комплексные месторождения сульфидных платиноидно-медно-никелевых (с кобальтом, золотом, серебром и др.) руд. В верхних частях интрузивов выявлен *малосульфидный платиноидный* горизонт, приуроченный к лейкогаббро с линзами ультрамафитов и пород с такситовой текстурой. Породы интрузивов проявляют отчетливую однородность в отношении изотопного состава неодама ($\epsilon Nd = 1.0 \pm 0.5$) при сходных значительных вариациях радиогенного значения $^{87}Sr/^{86}Sr_i$ (0.7055–0.7075). Примеры: интрузивы *Норильск-1, Талнахский, Хараелахский*.

2. *Рудоносные интрузивы с платиноидно-медно-никелевыми рудами* включают интрузивы ультрамафит-мафитового состава горозубовской и имангдинской группы, обладающие сходными породными, минералогическими, геохимическими и Nd-Sr изотопными характеристиками с таковыми промышленно-рудноносных интрузивов. С рудоносными интрузивами ассоциируют вкрапленные, реже прожилково-вкрапленные руды, образующие мелкие и средние месторождения медно-никелевых руд, а также средние и крупные месторождения платиноидов. Данная группа интрузивов характеризуется установленными признаками малосульфидного оруденения (Черногорский и Имангдинский интрузивы) либо по геолого-петрологическим признакам перспективна на выявление МС-горизонта (Зуб-Маркшейдерский, Вологочанский и др.). Примеры: интрузивы *Черногорский, Норильск-2, Имангдинский, Зуб-Маркшейдерский, Вологочанский, Южноясынский*.

3. *Слаборудоносные интрузивы* объединяют мафит-ультрамафитовые интрузивы нижнеталнахского типа, с которыми связано медно-никелевое рассеянное оруденение в виде рудо-

проявлений и минерализации вкрапленного (редко шпильрового) типа с незначительным (сотые доли процента, реже до десятых долей) содержанием меди и никеля. В отличие от интрузивов первых двух геолого-экономических типов породы слаборудоносных интрузивов имеют низкое содержание хрома и платиноидов (тысячные доли граммов на тонну, реже сотые доли граммов на тонну в единичных интрузивах) и не перспективны на МС-оруденение. Породы слаборудоносных интрузивов обладают отличными от промышленно рудоносных и рудоносных интрузивов значениями $\epsilon Nd \sim -5$ и $^{87}Sr/^{86}Sr_i = 0.7076-0.7086$. Примеры: интрузивы *Нижнеталнахский, Зеленогневский, Нижненорильский* и др.

Ресурсный потенциал платиновых металлов *Таймырского геолого-экономического района* определяется одноименной никеленосной металлогенической провинцией [Геологическое строение СССР..., 1987]. Работами на стадии ГГС-200 были открыты Дюмталейский, Бинюдинский и ряд других рудоносных ультрамафит-мафитовых интрузивов, вмещающих сульфидные платиноидно-медно-никелевые рудопрооявления. Многие рудопрооявления до сих пор слабо изучены, хотя и являются потенциально перспективными на обнаружение здесь промышленно-значимых объектов. Основные перспективы выявления богатых ЭПГ-Cu-Ni руд на Таймыре связаны с Бинюдинским и Дюмталейским ультрамафит-мафитовыми интрузивами (рис. 4) в пределах соответственно Бинюдинско-Тарейского и Луктахского рудных районов [Романов и др., 2011; Малич и др., 2016]. Данные интрузивы по петролого-геохимическим параметрам отличаются от ультрамафит-мафитовых интрузивов Норильской провинции и с определенной долей условности отнесены в группу *потенциально-рудноносных интрузивов* (см. табл. 1).

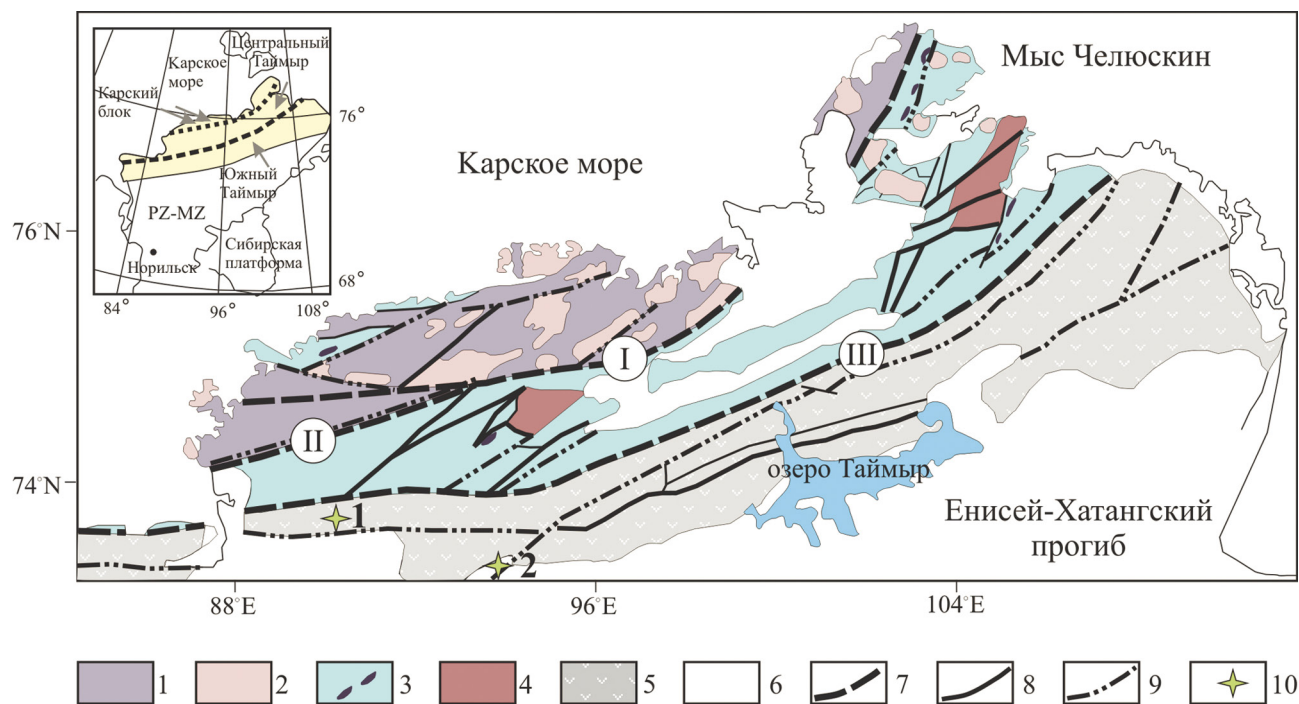


Рис. 4. Геологическая схема по-ва Таймыр [Верниковский, 1996; Проскурнин и др., 2014].

1 – Карская континентальная окраина (PR–PZ); 2 – коллизионные гранитоиды (264–300 млн лет); 3 – Центральнотаймырский докембрийский аккреционный пояс с офиолитами; 4 – Мамонт-Шренковский и Фаддеевский выступы; 5 – Южно-таймырский складчатый пояс (PZ–MZ); 6 – юрско-кайнозойские отложения; 7 – главные надвиги: I – Таймырский, II – Диабазовый, III – Пясино-Фаддеевский; 8 – разломы; 9 – надвиги; 10 – местоположение Бинюдинского (1) и Дюмталейского (2) интрузивов.

Важным ключом к пониманию происхождения месторождений Норильской провинции является анализ глубинного строения земной коры (рис. 5), позволяющий связывать формирование платиноидно-медно-никелевых месторождений с палеорифтогенными системами литосферы, имеющими типичные для таких структур геолого-геофизические параметры. Они проявляются в следующем: 1) высокоградиентных прогибах фундамента; 2) насыщенности коры горстово-грабеновыми структурами, высокой плотности расколов в коре; 3) крупных объемах магматического мантийного вещества; 4) наличии слоев (волноводов) с инверсией сейсмических скоростей. Судя по сейсмическим данным [Егоркин и др., 1984; Малич и др., 1988], в основании земной коры Норильского региона располагается переходная зона с повышенной (относительно коровых образований) скоростью продольных волн ($V_p = 7.3$ км/с). Эта зона (называемая “рифтовой подушкой”) мощностью 5–10 км и протяженностью около 500 км на глубинах 32–43 км является следствием инъекции ультрамафитового материала с сульфидными в подкоровую часть литосферы (см. рис. 5). Согласно полученным новым U-Pb данным, свидетельствующим о длительной эволюции Норильской рудно-магматической системы [Малич и др., 2018; Malitch et al., 2018; Isotope Geology..., 2019], необ-

ходимым фактором для образования уникальных сульфидных платиноидно-медно-никелевых месторождений являлся длительный период концентрации рудных компонентов в промежуточных магматических камерах.

На основании полученных новых данных предложена трехстадийная модель формирования богатых ЭПГ-Cu-Ni руд, которая обосновывается (см. рис. 5) внедрением в основание земной коры значительных по объему ультрамафитов с мантийными сульфидными (стадия 1), последующим концентрированием сульфидной жидкости и контаминацией коровым веществом в долгоживущих промежуточных магматических камерах (стадия 2), захватом и перемещением сульфидного вещества вместе с ультрамафитами в современные камеры более поздними преимущественно мафитовыми расплавами (стадия 3).

На протяжении всей истории открытия и изучения Норильского рудного района велся непрерывный поиск надежных критериев и признаков 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,

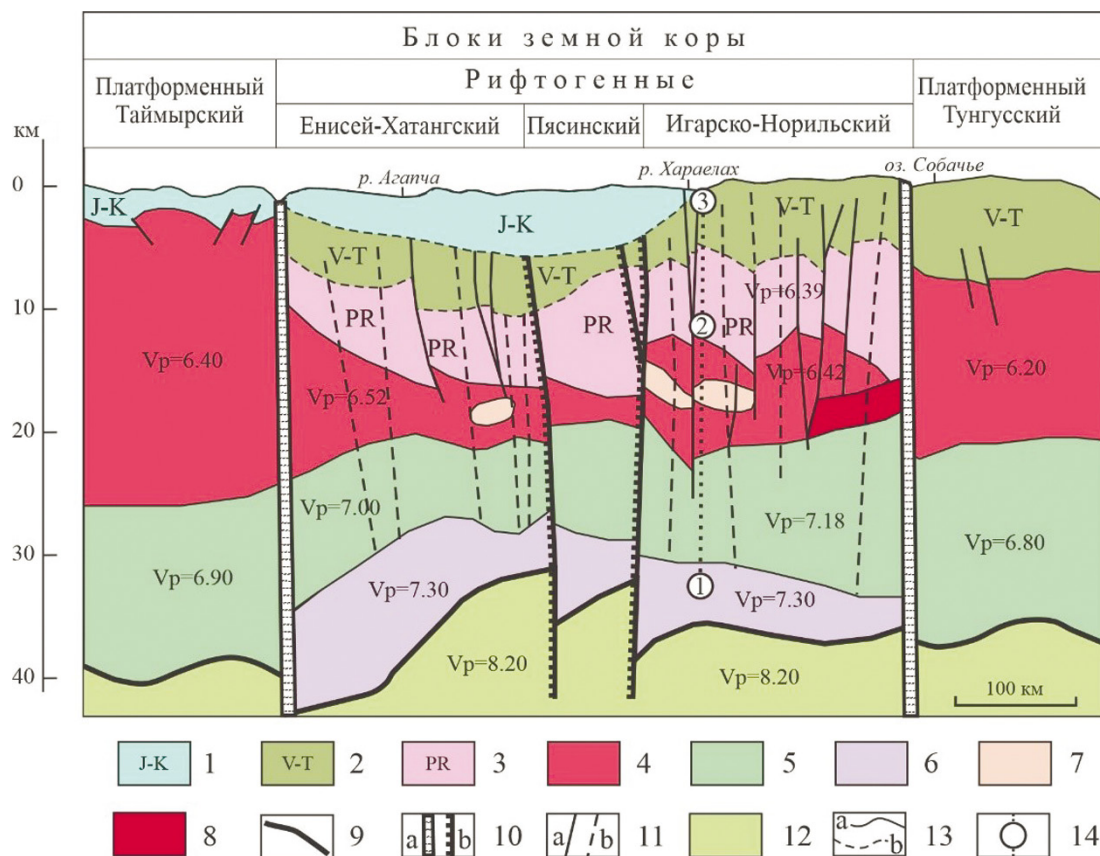


Рис. 5. Сейсмогеологический разрез северной части профиля Диксон-Хилок [Егоркин и др., 1984; Малич и др., 1988], иллюстрирующий трехстадийную модель образования сульфидных ЭПГ-Cu-Ni руд [Malitch et al., 2020].

литогеохимические, гидрогеохимические и другие признаки [см., например, Ляхницкая, Туганова, 1977; Поисковые критерии..., 1978; Металлогеническая карта..., 1987; Туганова, 2000; Добрецов и др., 2010; Малич и др., 2018; Лихачев, 2020]. На примере различно рудоносных ультрамафитовых интрузивов и сульфидных ЭПГ-Cu-Ni руд Полярной Сибири нами предложены новые изотопно-геохимические критерии, позволяющие оценить перспективы выявления новых рудных объектов [Малич и др., 2018; 2024; Malitch et al., 2018; Isotope Geology..., 2019; Служеникин и др., 2020; 2023; Malitch, 2021]. Главным признаком рудоносности является идентичность по изотопному составу вкрапленных сульфидов в оцениваемом объекте с теми сульфидами, которые формируют руды крупнейших месторождений.

Показателем объема сульфидного вещества, который принимал участие в рудообразовании, может служить *начальный изотопный состав осмия*. Действительно, чем значительнее масса сульфидного вещества, тем больше в нем мантийного осмия и тем труднее его заразить коровым компонентом (“буферирующий эффект”). По данным Re-Os изотопной систематики параметрами оценки прогноза

сульфидного ЭПГ-Cu-Ni оруденения являются следующие параметры.

1. *Начальный изотопный состав осмия со значением $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ в пределах 0.1283–0.1336* характерен для сульфидного вещества промышленно-рудноносных интрузивов; *значения $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ в пределах 0.1310–0.1375* – для рудоносных интрузивов; *значения $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ более 0.1975* – для слаборудоносных интрузивов.

2. *Значения γOs (рассчитанные на возраст 250 млн лет) для Cu-Ni сульфидов*; согласно данному параметру слаборудоносные интрузивы характеризуются высокими значениями γOs (35–117), промышленно-рудноносные интрузивы – низкими значениями γOs (от 6 до 8) и рудоносные интрузивы – промежуточными параметрами γOs (4–32).

Изотопный состав осмия сульфидов в сочетании с изотопным составом серы позволяет выявлять интрузивы с вкрапленными рудами, идентичными по изотопным параметрам таковым в промышленных месторождениях (рис. 6). Соответственно такому подходу изученные нами интрузивы делятся на три группы.

1. К первой группе относятся Черногорский и, с некоторой долей условности, Вологодчанский ин-

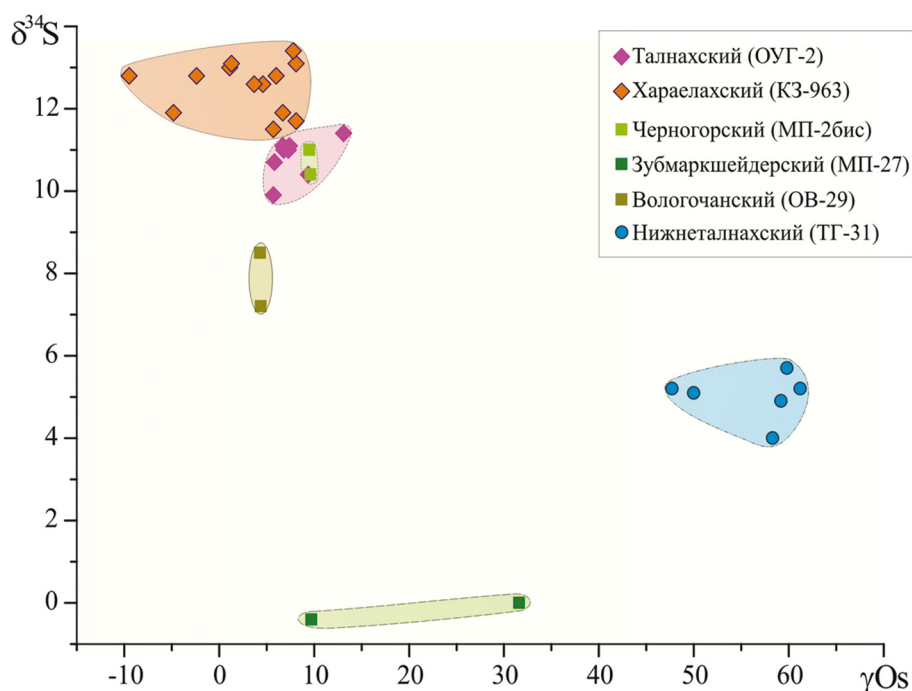


Рис. 6. Зависимость $\delta^{34}\text{S}$ – γOs в сульфидных платиноидно-медно-никелевых рудах от масштаба оруденения [Malitch, 2021].

трузивы, в которых вкрапленные сульфидные руды по изотопному составу осмия и серы идентичны или близки таковым в Талнахском месторождении. Отметим, что Вологочанский интрузив по изотопному составу осмия и серы (наши данные) отвечает таковым интрузива Норильск-1 [Arndt et al., 2003]. Отсюда следует, что в магматические камеры данных интрузивов сульфидная жидкость поступала из того же источника рудного расплава, за счет которого были сформированы промышленные месторождения Талнахского и Норильского интрузивов. Черногорский и, с некоторой долей условности, Вологочанский интрузивы также могут содержать аналогичные промышленные запасы рудного вещества и, следовательно, являться наиболее перспективными для поисково-разведочных работ.

2. Рудоносный Зуб-Маркшейдерский интрузив частично сходен по изотопному составу осмия с промышленными месторождениями, но сильно отличается от них по изотопному составу серы. Характерно, что по изотопному составу серы (и частично осмия) сульфиды сохраняют черты ювенильного источника руд, минимально подвергшись коровой контаминации.

3. Слаборудоносные Нижнеталнахский и Зеленогоровский интрузивы содержат вкрапленные сульфиды, которые по изотопному составу осмия и серы значительно отличаются от рудного вещества промышленных месторождений и для которых промышленных скоплений не выявлено [Malitch et al., 2018; Служеникин и др., 2023]. В соответствии

с предлагаемым подходом это означает, что перспективы выявления промышленных запасов ЭПГ-Cu-Ni руд в таких интрузивах отсутствуют.

Еще одна зависимость, используемая в качестве *изотопного индикатора продуктивности*, связана с установленной дискретностью изотопного состава меди и серы в сульфидных рудах *промышленно-рудноносных* интрузивов (рис. 7). Наиболее “тяжелой” серой ($\delta^{34}\text{S} = 11.5\text{--}13.6\text{‰}$) и “легкой” медью ($\delta^{65}\text{Cu} = -2.4\text{...}-0.9\text{‰}$) характеризуются руды Хараелахского интрузива. Напротив, наименее “тяжелая” сера: ($\delta^{34}\text{S} = 7.5\text{--}9.4\text{‰}$) и наиболее “тяжелая” медь ($\delta^{65}\text{Cu} = -0.3\text{...}+0.6\text{‰}$) установлена во вкрапленных ЭПГ-Cu-Ni рудах интрузива Норильск-1, с максимальным утяжелением изотопного состава *меди* и облегчением изотопного состава *серы* в горизонте малосульфидных руд. Для большинства вкрапленных и массивных руд Талнахского интрузива при сопоставлении изотопного состава меди и серы с таковыми Хараелахского интрузива и интрузива Норильск-1 наблюдаются промежуточные значения ($\delta^{65}\text{Cu} = 0.0\text{...}-1.1\text{‰}$ и $\delta^{34}\text{S} = 7.8\text{--}12.1\text{‰}$). Таким образом, *промышленно-рудноносные* интрузивы в координатах $\delta^{34}\text{S}$ – $\delta^{65}\text{Cu}$ образуют специфический тренд составов (см. тренд ПР на рис. 7), 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. 7) вкрапленные ЭПГ-Cu-Ni руды Черногор-

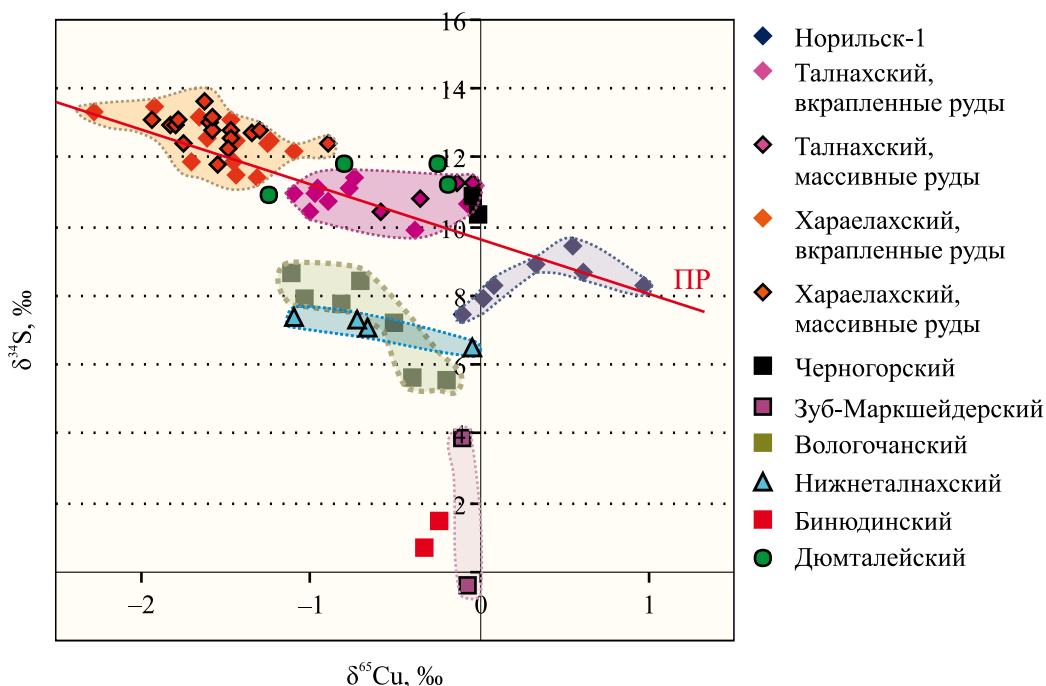


Рис. 7. Вариации изотопного состава серы и меди в различных рудоносных интрузивах Полярной Сибири в координатах $\delta^{34}\text{S}$ – $\delta^{65}\text{Cu}$ [Малич, 2021].

ского (перекрываются с полем изотопных составов сульфидов Талнахского интрузива), а также Дюмталейского (частично перекрываются с полем талнахских сульфидов) интрузивов.

Увеличение сырьевой базы платиноидно-медно-никелевых руд следует ожидать: 1) с доразведкой глубоких горизонтов уже разрабатываемых месторождений и возможным открытием вблизи них новых крупных объектов; 2) вовлечением в переработку вкрапленных руд разрабатываемых месторождений (Октябрьского, Талнахского и Норильск-1), месторождений госрезерва (Черногорского, Горозубовского, Норильск II и др.) и слабозабитых (Имангдинского и др.) месторождений. Кроме того, расширение платиноидной сырьевой базы также связано с разведкой и вовлечением в добычу малосульфидных платиноидных руд, переоценкой имеющихся техногенных объектов, а также с возможным выявлением платиноидных россыпей, образовавшихся при денудации рудоносных ультрамафит-мафитовых интрузивов норильского типа.

ВЫВОДЫ

1. Использование оригинальных подходов при изучении сульфидных ЭПГ-Cu-Ni месторождений Полярной Сибири позволило предложить новые индикаторы прогноза для поиска подобных месторождений. Наиболее значимым информационными параметрами при оценке рудоносности являются

изотопные составы осмия, меди и серы в Cu-Ni сульфидах.

2. На основе сочетания изотопных составов осмия, серы и меди впервые выявлены: 1) интрузивные тела с вкрапленными сульфидными рудами, обладающими параметрами рудного вещества, за счет которых были сформированы промышленные платиноидно-медно-никелевые месторождения; 2) интрузивные тела с вкрапленными рудами, изотопные составы осмия, серы и меди в которых не соответствуют таковым в промышленных месторождениях, и для которых промышленные скопления руд маловероятны.

3. Наиболее перспективным на обнаружение богатых ЭПГ-Cu-Ni руд в Норильской провинции является Черногорский ультрамафит-мафитовый интрузив. Для Таймырской провинции таким объектом следует считать Дюмталейский интрузив.

4. Новые изотопно-геохимические индикаторы прогноза богатых сульфидных платиноидно-медно-никелевых руд могут быть эффективно использованы при оценке рудоносности слабоизученных ультрамафит-мафитовых интрузивов Полярной Сибири.

Автор признателен рецензенту за конструктивные замечания, которые способствовали улучшению рукописи.

Работа выполнена в рамках тем №№ АААА-А18-118052590026-5 и 122022600107-1 государственного задания ИГГ УрО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Верниковский В.А. Геодинамическая эволюция Таймырской складчатой области. Новосибирск: СО РАН; НИЦ ОИГГМ, 1996. 202 с.
- Геологическое строение СССР и закономерности размещения полезных ископаемых Сибирская платформа / Ред.: Н.С. Малич, В.Л. Масайтис, В.С. Сурков. Т. 4. Л.: Недра, 1987. 448 с.
- Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2022 г. М.: Министерство природных ресурсов и экологии РФ; Роснедра, 2023. 640 с.
- Добрецов Н.Л., Борисенко А.С., Изох А.Э., Жмодик С.М. Термохимическая модель пермотриасовых мантийных плюмов Евразии как основа для выявления закономерностей формирования и прогноза медно-никелевых, благородно- и редкометалльных месторождений // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 9. С. 1159–1187.
- Дюжиков О.А., Дистлер В.В., Струнин Б.М., Мкртычян А.К., Шерман М.Л., Служеникин С.Ф., Журье А.М. Геология и рудоносность Норильского района. М.: Наука, 1988. 279 с.
- Егоркин А.В., Зюганов С.К., Чернышев Н.М. Верхняя мантия Сибири // 27-й Международный геологический конгресс. Геофизика. М., 1984. Т. 8. С. 27–42.
- Лихачев А.П. Опоискованность Норильского района и возможности открытия в нем новых Pt-Cu-Ni месторождений // Отеч. геол. 2020. № 2. С. 3–16.
- Ляхницкая И.В., Туганова Е.В. Региональные и локальные закономерности размещения медно-никелевых сульфидных месторождений. Л.: Недра, 1977. 77 с.
- Малич К.Н. Комплексные платинометалльные месторождения Полярной Сибири (состав, источники вещества и условия образования) / Автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. Новосибирск: ИГМ СО РАН. 2021. 50 с.
- Малич К.Н., Баданина И.Ю., Туганова Е.В. Рудоносные ультрамафит-мафитовые интрузивы Полярной Сибири: возраст, условия образования, критерии прогноза. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2018. 287 с.
- Малич К.Н., Баданина И.Ю., Романов А.П., Служеникин С.Ф. U-Pb возраст и Hf-Nd-Sr-Su изотопная систематика Бинюдинского и Дюмталейского рудоносных интрузивов (Таймыр, Россия) // Литосфера. 2016. Т. 16. № 1. С. 107–128.
- Малич К.Н., Баданина И.Ю., Солошенко Н.Г., Служеникин С.Ф. Вариации изотопного состава меди и цинка в платиноидно-медно-никелевых рудах Норильской провинции (Россия) // Литосфера. 2024. Т. 24. № 2. С. 300–325.
- Малич Н.С., Туганова Е.В., Гринсон А.С. Геодинамическая обстановка образования Cu-Ni месторождений норильского типа // Никеленосность базит-гипербазитовых комплексов Норильского региона. Апатиты: Кольский филиал АН СССР, 1988. С. 44–47.
- Металлогеническая карта северо-запада Сибирской платформы. Масштаб 1 : 500 000 / Гл. ред. Н.С. Малич. 16 л. Объясн. зап. Л.: ВСЕГЕИ, 1987. 149 с.
- Поисковые критерии сульфидных руд норильского типа / Ред. В.С. Соболев. Новосибирск: Наука, 1978. 167 с.
- Проскурнин В.Ф., Верниковский В.А., Метелкин Д.В., Петрушков Б.С., Верниковская А.Е., Гавриш А.В., Багаева А.А., Матушкин Н.Ю., Виноградова Н.П., Ларионов А.Н. Риолит-гранитная ассоциация Центрально-Таймырской зоны: свидетельство аккреционно-коллизийных событий в неопротерозойское время // Геология и геофизика. 2014. Т. 55. № 1. С. 23–40.
- Романов А.П., Курбатов И.И., Малич К.Н., Снисар С.Г., Бородин Е.В., Ерыкалов С.П., Кокорин Н.И. Ресурсный потенциал платиновых металлов Западного Таймыра // Платина России / Сб. науч. тр. Т. VII / Гл. ред. Д.А. Додин. Красноярск: Знак, 2011. С. 135–160.
- Служеникин С.Ф. Малосульфидное платиновое оруденение в дифференцированных базит-гипербазитовых интрузивах Норильского района / Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. М.: ИГЕМ РАН, 2000. 26 с.
- Служеникин С.Ф., Малич К.Н., Туровцев Д.М., Григорьева А.В., Баданина И.Ю. Зубовский тип дифференцированных базит-гипербазитовых интрузивов Норильского района: петрогеохимические характеристики и рудоносность // Петрология. 2020. Т. 28. № 5. С. 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. Нижнеталнахский тип интрузивов в Норильском рудном районе // Петрология. 2023. Т. 31. № 5. С. 482–509.
- Туганова Е.В. Формационные типы, генезис и закономерности размещения сульфидных платиноидно-медно-никелевых месторождений. СПб.: ВСЕГЕИ, 2000. 102 с.
- Arndt N.T., Czamanske G.K., Walker R.J., Chauvel C., Fedorenko V.A. Geochemistry and origin of the intrusive hosts of the Noril'sk-Talnakh Cu-Ni-PGE sulfide deposits // Econ. Geol. 2003. V. 98. P. 495–515.
- Barnes S.J., Malitch K.N., Yudovskaya M.A. Introduction to the Special Issue on the Noril'sk-Talnakh Ni-Cu-PGE deposits // Econ. Geol. 2020. V. 115. No. 6. P. 1157–1172.
- 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. Petrography and geochemical characterization of ore-bearing intrusions of the Noril'sk type, Siberia; with discussion of their origin // Res. Geol. 1995. Spec. Iss. No. 18. P. 1–48.
- Isotope Geology of the Noril'sk deposits / Ed. by O. Petrov. Cham: Springer Nature, 2019. 306 p.
- Malitch K.N. Forecasting criteria for sulphide PGE-copper-nickel deposits of the Noril'sk province // Lithosphere (Russia). 2021. V. 21. No. 5. P. 660–682.
- Malitch K.N., Belousova E.A., Griffin W.L., Badanina I.Yu., Latypov R.M., Sluzhenikin S.F. New insights on the origin of ultramafic-mafic intrusions and associated Ni-Cu-PGE sulfide deposits of the Noril'sk and Taimyr provinces, Russia: Evidence from radiogenic and stable-isotope data. Ch. 7 // Processes and Ore Deposits of Ultramafic-Mafic Magmas Through Space and Time / Ed. by S. Mondal, W.L. Griffin. Amsterdam: Elsevier Inc., 2018. P. 197–238.
- Malitch K.N., Belousova E.A., Griffin W.L., Martin L., Badanina I.Yu., Sluzhenikin S.F. Oxygen-hafnium-neodymium isotope constraints on the origin of the Talnakh ultramafic-mafic intrusion (Noril'sk province, Russia) // Econ. Geol. 2020. V. 115. No. 6. P. 1195–1212.

ISOTOPE-GEOCHEMICAL INDICATORS FOR PREDICTING RICH SULFIDE PLATINUM-GROUP ELEMENT-COPPER-NICKEL ORES OF THE POLAR SIBERIA

K. N. Malitch

The purpose and relevance of the research. World-class sulfide platinum-group-element (PGE)-Cu-Ni deposits are associated with ultramafic-mafic intrusions of Polar Siberia. The significance of these deposits provides the possibility of identifying new approaches to searching for similar high-grade deposits using the example of economically profitable PGE-Cu-Ni ores. *Results and conclusions.* Based on comparative isotope-geochemical data for economic, subeconomic, prospective and non-economic intrusions, and associated PGE-Cu-Ni sulfide ores and accumulations, new indicators for predicting high-grade sulfide PGE-Cu-Ni ores are proposed. Using a combination of isotopic compositions of osmium, sulfur and copper, it was possible to identify intrusive bodies, in which disseminated sulfide ores have Os-S-Cu isotopic signatures similar to those of economic sulfide PGE-Cu-Ni deposits. It is suggested that the Chernogorsk intrusion of the Noril'sk province and the Dyumtalei intrusion of the Taimyr province are the most promising targets for searching for rich PGE-Cu-Ni ores. It is proposed that the new isotope-geochemical criterion can be employed as a useful guide for prospecting the Noril'sk-type deposits containing rich sulfide PGE-Cu-Ni ores.

Keywords: *ultramafic-mafic intrusions, sulfide PGE-copper-nickel deposits, Os-Cu-S isotope systematics, forecast criteria, Noril'sk province, Taimyr province*

Для цитирования: Малич К.Н. Изотопно-геохимические индикаторы прогноза богатых сульфидных платиноидно-медно-никелевых руд Полярной Сибири // Труды ИГГ УрО РАН. 2024. Вып. 168. С. 102–111. <https://doi.org/10.24930/0371-7291-2024-168-102-111>