

РЕДКИЕ И РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ РУД ПЕЧЕНГСКОГО РАЙОНА

К. В. Лобанов, А. В. Григорьева, А. В. Волков, М. В. Чичеров, К. Ю. Мурашов
ФГБУН Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии
и геохимии РАН (Москва, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 25 июня 2021 г.

Исследован Печенгский рудный район Мурманской области — один из крупных промышленных регионов в Арктической зоне России. Получены новые данные по химическому составу основных рудных минералов, содержанию микроэлементов, включая редкоземельные элементы (РЗЭ) в рудах месторождений Пильгуйярвинское и Восток, а также поздних полиметаллических жил Печенгского района. Установлено, что основные текстурные типы руд (массивные, прожилковидные и вкрапленные) существенно различаются по химическому составу и содержанию пороодо- и рудообразующих компонентов. Выявлено обогащение руд достаточно широким спектром микроэлементов. По сравнению с верхней корой печенгские руды характеризуются явным обогащением халькофильными и сидерофильными микроэлементами. Коэффициенты обогащения рудных элементов достигают в основном десятков (Cr, Au, Cd), сотен (Ag, Se, Re, Pt) и тысяч (Ni, Cu, Ir) раз. Распределения микроэлементов в различных текстурных типах Cu-Ni руд обладают большим сходством, что свидетельствует об их геохимическом сродстве и синхронном участии в рудообразовании. Геохимические особенности хорошо согласуются с минеральным составом руд. Концентрация редких земель в основных типах руд за исключением массивных руд и поздних полиметаллических жил превышает уровень стандарта хондрита, фракционирование РЗЭ слабое. Состав РЗЭ в рудах унаследован от вмещающих пород. Установлена высокая обогащенность всех типов руд Re, Bi и Cd, которые потенциально промышленно значимы как высокотехнологичные металлы и представляют значительный интерес для попутной добычи.

Ключевые слова: Печенгский район, медно-никелевые месторождения, геохимия руд, микроэлементы, редкоземельные элементы.

Введение

Печенгский рудный район — один из крупных промышленных регионов в Арктической зоне России, он расположен на территории Мурманской области. В настоящее время добычу Ni-Cu руд в Печенгском районе ведет Кольская ГМК — филиал «Норникеля» в Мурманской области, созданный в 1998 г. на базе комбинатов «Североникель» и «Печенганикель». В 2020 г. добыто 7,7 млн т руды, содержащей 0,5% Ni, 0,2% Cu и 0,1 г/т металлов платиновой группы (МПГ)¹. За 50 лет в районе добыто более 2 млн т никеля.

Основные Cu-Ni месторождения Печенгского района изучаются на протяжении многих лет [1—6 и др.]. Однако распределение микроэлементов и редкоземельных элементов (РЗЭ) в рудах современными аналитическими методами исследовано недостаточно. Известно, что микроэлементы и РЗЭ активно реагируют на окислительно-восстановительную среду природных обстановок, что позволяет использовать их в качестве геохимических индикаторов источников вещества. Кроме того, доизучение химического состава руд комплексных месторождений Печенгского рудного района (рис. 1) — потенциальных источников высокотехнологичных металлов имеет большое практическое значение [7].

¹ <https://www.nornickel.ru/>.

© Лобанов К. В., Григорьева А. В., Волков А. В., Чичеров М. В., Мурашов К. Ю., 2021

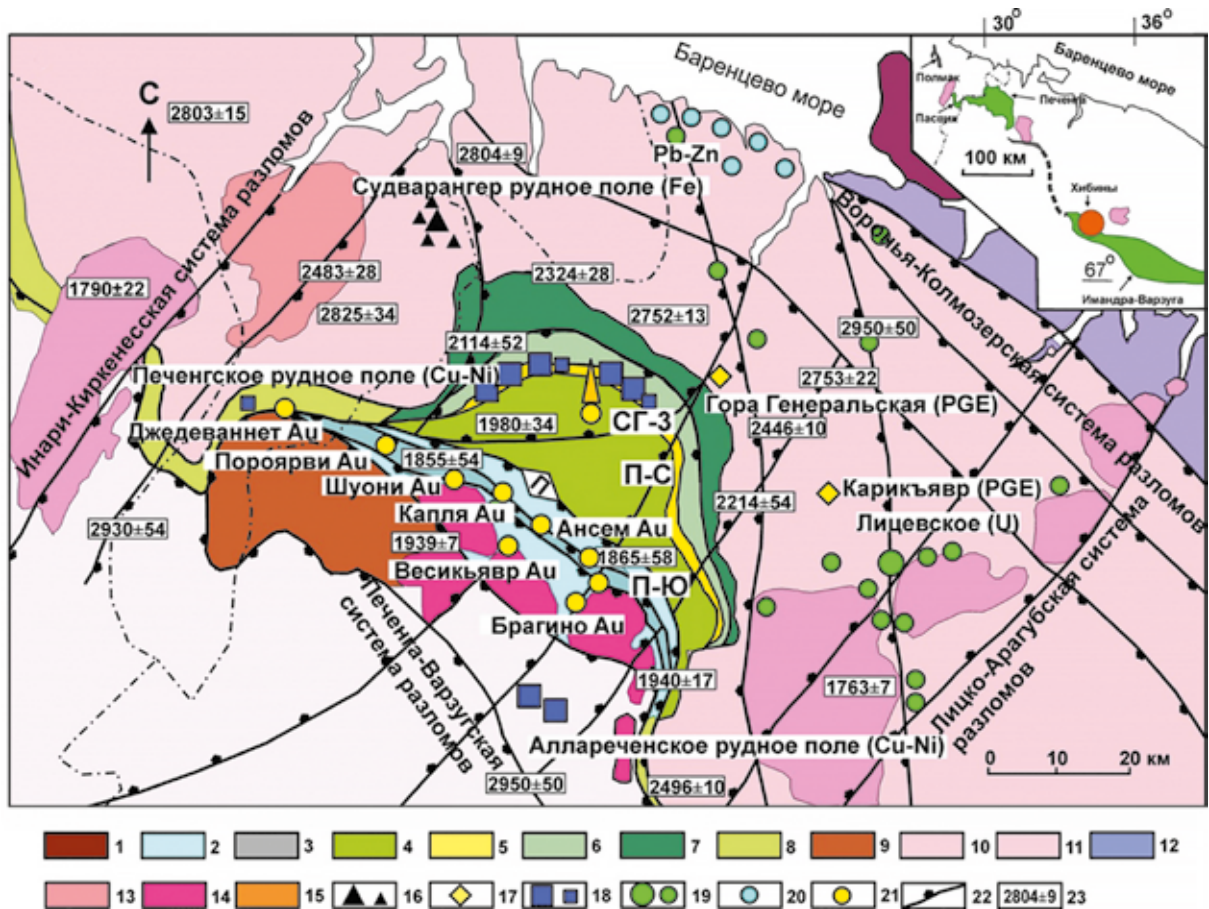


Рис. 1. Геология и металлогения Печенгского рудного района [8; 9]. 1 – позднепротерозойские осадочные отложения; 2–7 – ранний протерозой: 2, 3 – южнопеченгская серия (Пороярвинский блок): 2 – метавулканогенные и метаосадочные породы, 3 – метаандезиты; 4–7 – северопеченгская серия: 4 – metabазальты и метапикриты свиты пильгуйрви (Пильгуйрвинский блок), 5 – метаосадочная Продуктивная толща с никеленосными интрузиями (Продуктивный блок), 6 – metabазальты и метаосадочные породы свиты колосйоки (Колосйокийский блок), 7 – метаандезиты и метаосадочные породы свит куэстярви, ахмалахти (Луостаринский блок); 8 – северопеченгская и южнопеченгская серии нерасчлененные; 9 – кристаллические сланцы тундровой серии (Тундровый блок); 10–12 – архей: 10 – гнейсы, мигматиты, граниты и амфиболиты Кольско-Норвежского блока, 11 – гнейсы и кристаллические сланцы блока Инари, 12 – гранитизированные гнейсы Мурманского блока; 13–15 – раннепротерозойские гранитоиды: 13 – поздние интрузивные (лицко-арагубский комплекс); 14 – реоморфические граниты; 15 – ранние интрузивные; 16–21 – рудные месторождения (крупные знаки) и рудопоявления (мелкие знаки): 16 – Fe, 17 – элементы платиновой группы, 18 – Cu-Ni, 19 – U, 20 – Pb-Zn, 21 – Au; 22 – зоны разломов; 23 – результаты изохронного датирования (млн лет)

Fig. 1. Geology and metallogeny of the Pechenga ore region [8; 9]: 1 – Late Proterozoic sediment rocks; 2–7 – Early Proterozoic: 2, 3 – South Pechenga Series (Poroyarva block): 2 – metavolcanic and metasedimentary rocks, 3 – metaandesites; 4–7 – North Pechenga Series: 4 – metabasalts and metapicrites of the Pilgujarvi Formation (Pilgujarvi block), 5 – metasedimentary Productive mass enclosing Ni-bearing intrusions (Productive block), 6 – metabasalts and metasedimentary rocks of the Kolasyoki Formation (Kolasyoki block), 7 – metandesites and metasedimentary rocks of the Kuetsjarvi and Ahmalahiti Formations (Luostarsinky block); 8 – undivided South Pechenga and North Pechenga Series; 9 – crystalline schist of the Tundra Series (Tundra block); 10–12 – Archaea: 10 – gneisses, granites and amphibolites of the Kola-Norwegian block, 11 – gneiss and crystalline schist of the Inari block, 12 – granitized gneisses of the Murmansk block (VIII); 13–15 – Early Proterozoic granitoids: 13 – Late intrusive (Litsko-Aragubsky complex); 14 – reomorphogenic granites; 15 – Early intrusive; 16–21 – ore deposits (large icons) and ore occurrences (small icons): 16 – Fe, 17 – PGE, 18 – Cu-Ni, 19 – U, 20 – Pb-Zn, 21 – Au; 22 – fault zones; 23 – results of isochronous dating (million years)

Публикация продолжает серию статей Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (ИГЕМ РАН), посвященных минеральным ресурсам Арктики.

Краткий очерк металлогении Печенгского рудного района

Металлогения Печенгского рудного района разнообразна и охватывает Cu-Ni месторождения

Печенгской и Аллареченской структур, архейские железорудные проявления Судварангера, раннепротерозойские МПГ и никелевые рудопоявления горы Генеральской, позднеархейскую-раннепротерозойскую радиоактивную минерализацию различных типов, гидротермальные Pb-Zn жилы, вероятно, рифейского возраста, и Au-Ag минерализацию, открытую в Южно-Печенгской зоне и на глубоких горизонтах скважины СГ-3. Наибольший интерес

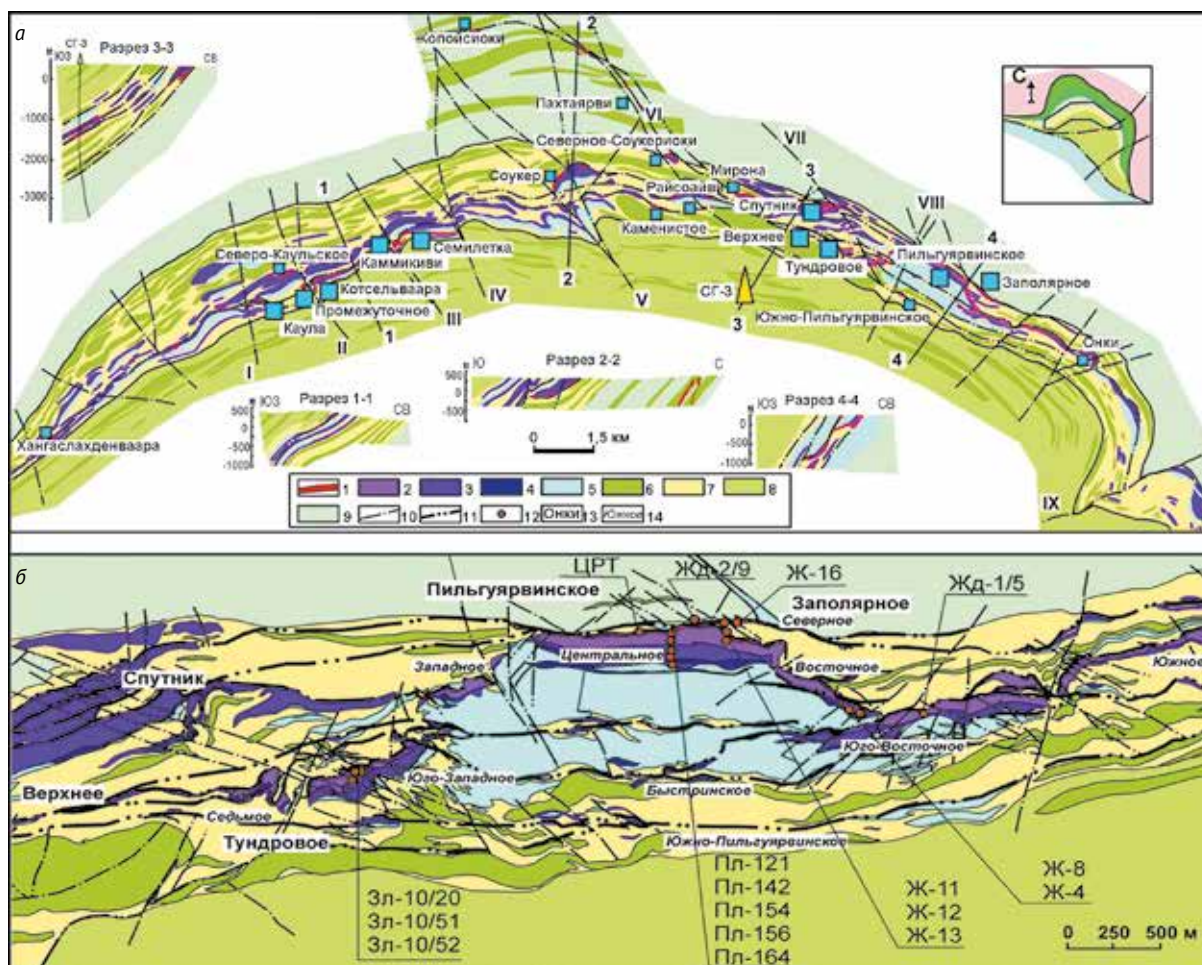


Рис. 2. Рудоносные структуры Печенгского рудного поля (а) и Восточного рудного узла (б), включающего Пильгуйярвинское месторождение. 1 – эпигенетические брекчиевидные, сплошные и богатые вкрапленные сульфидные медно-никелевые руды; 2 – вкрапленные руды в серпентинизированных перидотитах, 3 – перидотиты; 4 – пироксениты, 5 – габбро; 6 – габбро-диабазы; 7 – породы Продуктивной туфогенно-осадочной толщи; 8 – вулканогенные породы пильгуйярвинской свиты; 9 – вулканогенные породы колосйокской свиты; 10–11 – разрывные тектонические нарушения: 10 – диагональные разломы, 11 – межпластовые тектонические зоны; 12 – места отбора образцов; 13 – месторождения медно-никелевых руд; 14 – рудные тела сульфидных медно-никелевых руд. На рис. 2б показаны места отбора изученных образцов (см. табл. 1)

Fig. 2. Ore-bearing structures of the Pechenga ore field (a) and the Eastern ore cluster (b), including the Pilguyarvi deposit: 1 – epi-genetic breccia-like, solid and rich interspersed sulfide Cu-Ni ores; 2 – interspersed ores in serpentinized peridotites, 3 – peridotites; 4 – pyroxenites, 5 – gabbro; 6 – gabbro-diorite; 7 – rocks of the Productive tuff-sedimentary strata; 8 – volcanogenic rocks of the Pilguyarvi Formation; 9 – volcanogenic rocks of the Kolosyokskaya Formation; 10–11 – discontinuous tectonic faults: 10 – diagonal faults, 11 – interstratal tectonic zones; 12 – sampling sites; 13 – deposits of copper-nickel ores; 14 – ore bodies of sulfide Cu-Ni ores. Fig. 2b shows the sampling places of the studied samples (see Table 1)

с экономической точки зрения представляют сульфидные Cu-Ni месторождения Печенгского и Аллареченского рудных полей (рис. 2).

Печенгское рудное поле. Сульфидные Cu-Ni месторождения рудного поля, связанные с рудоносными габбро-верлитовыми раннепротерозойскими интрузиями, — второй после Норильского района источник никеля в нашей стране и основа самого крупного из ныне действующих горнодобывающих предприятий Европы. Они входят в первую пятерку сульфидных медно-никелевых месторождений мира и остаются объектом все расширяющихся геолого-разведочных и научно-

исследовательских работ. Главные металлы — медь, никель и кобальт. Попутно добываются металлы платиновой группы.

В настоящее время разрабатываются месторождения Пильгуйярвинское, Заполярное, Тундровое, Котсельваара-Каммикиви и Семилетка. Находятся в резерве месторождения Спутник, Быстринское и Верхнее (см. рис. 2а). На восточном фланге рудного поля располагается Восточный рудный узел, представленный месторождениями Спутник, Пильгуйярвинское (Ждановское), Заполярное, Онки, которые приурочены к низам продуктивной толщи. Расположение рудоносных массивов и рудных тел

контролируется разветвленной межпластовой тектонической зоной (см. рис. 26).

Крупнейшее месторождение Восточного рудного узла Пильгуйярвинское (см. рис. 26) объединяет несколько крупных рудных тел (Седьмое, Западное, Юго-Западное, Центральное, Быстринское, Восточное, Юго-Восточное, Южное). На этом месторождении добывается до 80% руды Печенгского района.

Генетически и пространственно Пильгуйярвинское месторождение связано с Главным дифференцированным габбро-перидотитовым массивом, который представляет собой изогнутую межпластовую интрузию общей протяженностью 6 км, падающую на юго-запад под углом 35—60° (см. рис. 2). Массив согласно залегает среди интенсивно смятых вулканогенно-осадочных пород. Рудные тела месторождения фактически представляют собой приподешенный слой рудосодержащих серпентинизированных перидотитов.

Аллареченское рудное поле, включающее два медно-никелевых месторождения Аллареченское и Восток и несколько рудопроявлений, расположено примерно в 50 км к югу от Печенгского рудного поля и входит в состав блока Инари (см. рис. 1). Участок месторождения Восток сложен главным образом гранито-гнейсами и амфиболитами, в небольшом количестве присутствуют биотитовые и амфибол-биотитовые гнейсы. Амфиболиты и гнейсы интенсивно мигматизированы. Структура месторождения определяется крупной северо-восточной синклинальной складкой и многоярусной системой межпластовых тектонических зон, которые контролируют размещение никеленосных перидотитовых интрузивов. Медно-никелевое оруденение сконцентрировано в ультраосновных телах и соединяющих их зонах дробления, проходящих вдоль лежащего бока.

Полиметаллические жилы. Рудопроявления свинца, цинка и серебра известны в Печенгском районе с XIV в. Попытки их разработки предпринимались с древности вплоть до XX в. В настоящее

время практической ценности не имеют из-за небольших запасов металлов в них. Рудопроявления представлены полиметаллическими жилами, которые широко развиты к западу от Печенгского залива, на полуостровах Среднем и Рыбачьем (см. рис. 1). Всего насчитывается свыше 100 жил различного размера. Мощность жил варьирует от 1—2 см до 2,5 м, протяженность — от 10 м до 2,5 км. Основные минералы: кварц, сфалерит, галенит, барит, кальцит. Реже присутствуют пирит, халькопирит, борнит, самородное серебро, халькозин, малахит, азурит. Жилы залегают в архейских гнейсах и кристаллических сланцах и приурочены к омоложенной Воронья-Колмозерской системе разломов и линеamentу Тролльфиорд — Рыбачий — Кильдин, северо-восточной границе Русской плиты. Предполагается, что гидротермальная полиметаллическая минерализация связана с проявлениями мощного рифтогенеза, который сопровождал формирование шельфовой плиты Баренцева моря, когда Печенгский рудный район находился в режиме пассивной континентальной окраины и испытал глубоко-проникающие расколы континентальной земной коры.

Методика исследований

Для проведения исследований была составлена коллекция из 21 образца руд двух месторождений, расположенных в пределах Печенгского и Аллареченского рудных полей, а также кварц-полиметаллических жил, секущих основные рудные тела (табл. 1, рис. 26). Крупное Пильгуйярвинское месторождение Восточного рудного узла Печенгского рудного поля представлено в коллекции 17 образцами (см. табл. 1, рис. 26). Месторождение Восток Аллареченского рудного поля представлено в коллекции двумя образцами руды. Поздние кварц-полиметаллические жилы, пересекающие Cu-Ni залежи Пильгуйярвинского месторождения, также представлены 2 образцами (см. табл. 1).

Таким образом, коллекция содержит 3 образца массивных руд (Центральная и Западная зоны ме-

Таблица 1. Коллекция руд Печенгского рудного района

| Рудное поле, месторождение | Номер (обозначение) образца | Типы руд по формам выделения | Типы Cu-Ni руд по сульфидным ассоциациям | Главные рудные минералы | Второстепенные минералы |
|--|-----------------------------|------------------------------|--|---|---------------------------------|
| Печенгское Пильгуйярвинское, восточная часть | Ж-4 | Вкрапленная руда | Ccp-Pn-Po | Пирротин, пентландит, халькопирит, магнетит | Ильменит, хромит, теллуризмутит |
| | Ж-8 | Вкрапленная руда | Pn-Ccp-Po | Пирротин, халькопирит, пентландит | Магнетит, хромит |
| | ЖД-1/5 | Прожилковидная руда | Ccp-Pn-Po | Пирротин, пентландит | |

| Рудное поле, месторождение | Номер (обозначение) образца | Типы руд по формам выделения | Типы Cu-Ni руд по сульфидным ассоциациям | Главные рудные минералы | Второстепенные минералы |
|--|-----------------------------|------------------------------|--|-----------------------------------|---|
| Печенгское Пильгуйярвинское, центральная часть | Ж-11 | Прожилковидная руда | Pn-Csp-Po | Пирротин, халькопирит, пентландит | Магнетит |
| | Ж-12 | Вкрапленная руда | Po-Pn | Пентландит, пирротин | Троилит, магнетит |
| | Ж-13 | Вкрапленная руда | Po-Pn | Пентландит, пирротин | Магнетит, Cu сам., гидроксиды Fe |
| | Ж-16 | Прожилковидная руда | Po-Pn | Пентландит, пирротин | Ni-пирит, алтаит, гессит |
| | ЖД-2/9 | Вкрапленная руда | Csp-Po | Пирротин, халькопирит | |
| | ПЛ-121 | Прожилковидная руда | Pn-Csp-Po | Пентландит, пирротин | Магнетит, алтаит, Cu-Cd-сфалерит |
| | ПЛ-142 | Вкрапленная руда | Csp-Pn-Po | Пирротин, пентландит, халькопирит | Магнетит, ильменит, титаномагнетит, ульманит |
| | ПЛ-154 | Прожилковидная руда | Pn-Po-Csp | Халькопирит, пентландит, пирротин | Магнетит, Ni-пирит |
| | ПЛ-156 | Вкрапленная руда | Pn-Po-Csp | Халькопирит, пирротин, пентландит | Магнетит |
| | ПЛ-164 | Прожилковидная руда | Csp-Pn-Po | Пирротин, пентландит, халькопирит | Ильменит |
| | ЦРТ | Массивная пиритовая руда | Csp-Py | Пирит, халькопирит | Галенит |
| Печенгское Пильгуйярвинское, западная часть | ЗЛ-10/20 | Массивная Cu-Ni руда | Csp-Pn-Po | Пирротин, пентландит, халькопирит | Магнетит, алтаит |
| | ЗЛ-10/51 | Прожилковидная руда | Csp-Pn-Po | Пирротин, пентландит, халькопирит | Аксессуары — Fe-алтаит, Cu-Cd-сфалерит, Fe сам. |
| | ЗЛ-10/52 | Массивная Cu-Ni руда | Pn-Csp-Po | Пирротин, халькопирит, пентландит | Магнетит, Ag-пентландит |
| Аллареченское, Восток | А-80 | Вкрапленная руда | Csp-Pn-Po | Пирротин | Cr-магнетит, Mn-ильменит, Ti-магнетит |
| | А-83 | Вкрапленная руда | Po-Py | Пирит, пирротин | Борнит, титанит, циркон |
| Полиметаллические жилы | П-3153 | | PbS | Галенит | Англезит, пирит |
| | П-3188 | | PbS | Галенит | Англезит |

Примечание. Csp — халькопирит, Pn — пентландит, Po — пирротин, Py — пирит.

сторождения Пильгуярви), 7 образцов прожилково-вкрапленных руд (Восточная, Западная и Центральная зоны), 7 образцов вкрапленных руд (Восточная, Центральная зоны) и 2 образца месторождения Восток (Аллареченское рудное поле), а также 2 образца из кварц-полиметаллических жил (см. табл. 1).

Проведены следующие исследования: оптическое изучение руд в полированных и прозрачно-полированных шлифах, определение химического состава руд методом рентгенофлуоресцентного анализа, определение химического состава руд методом индуктивно-связанной плазмы (ICP-MS), определение химического состава рудных минералов методом рентгено-спектрального микроанализа (158 определений), а также изучение полированных образцов «рудных жил» (см. табл. 1) с помощью сканирующего электронного микроскопа. Исследования выполнялись в лабораториях геологии рудных месторождений и анализа минерального вещества ИГЕМ РАН.

Минералогические особенности руд

Большинство образцов руд в коллекции были отобраны на Пильгуярвинском месторождении (см. табл. 1). По степени метаморфических изменений образцы можно разделить на две группы: 1 — мало измененные верлиты и лерцолит, 2 — метасоматиты по верлиту, дуниту (оливиниту) и лерцолиту. Эти группы отличаются друг от друга значительным развитием вторичных преобразований, что отражается на вариативности химического состава и качестве руд. Кроме этого, в коллекции представлены еще 4 образца (см. табл. 1), отличающиеся от остальных, — массивная руда ЦРТ и ЗЛ-10/52 с незначительными реликтами вмещающей породы и Ж-16 и ЗЛ-10/51 — серпентинит, полностью переработанная ультраосновная порода, в которой отложилась сульфидная минерализация. Отметим, что слабо измененные образцы отобраны только в Центральной зоне месторождения. Рассмотрим ниже основные типы руд месторождения Пильгуярви, выделенные по текстурным особенностям.

Вкрапленные руды Восточной зоны Пильгуярвинского месторождения приурочены к метасоматитам по верлитам (рис. 3а и 3в). Оливин — преобладающий минерал в породе (73—75%), полностью замещен серпентином, магнетитом и в центре зерен тальком, сохранены только реликтовые формы, фиксирующиеся в шлифе только по округлым и овальным формам, выполненным серпентином и магнетитом, между которыми отмечаются реликты клинопироксена (20—22%), частично замещенные бурой роговой обманкой в направлении от периферии к центру, которая, в свою очередь, в краевой части замещается актинолитом и хлоритом, иногда биотитом. Рудные минералы в количестве от 5—7% до 15—20% общего объема выполняют межзерновое пространство в метасоматитах (рис. 3г). Представлены пентландит-халькопирит-пирротиновыми агрегатами и их разнообразными сочетаниями.

Значительное количество халькопирита находится в сростании с магнетитом (рис. 3б). Крупные выделения разнообразных агрегатов сульфидов (до 1 мм) в значительной степени замещаются серпентином и очаговыми выделениями хромита, а также отмечается замещение пирротина магнетитом (рис. 3з), что иллюстрирует значительно проявленные метаморфические и метасоматические процессы, происходящие в породе. В то же время отмечаются пентландит-пирротиновые агрегаты с размерами выделений до 0,12—0,15 мм, сохраняющие первоначальную форму кристалла пирротина. Тонкозернистые халькопирит, пентландит и реликты пирротина насыщают крупные выделения магнетита (рис. 3б). Рудные оксиды магнетит+ильменит+хромит составляют около 3% объема руды.

В Центральной зоне вкрапленные руды установлены в измененном оливините (лерцолите), верлите и алевро-аргиллите. В лерцолите породообразующие минералы: оливин — 75—80%, клинопироксен — 5%, ортопироксен — 10%, биотит — 5% (рис. 1д). Рудные минералы в виде пирротин-пентландитовых агрегатов в магнетите образуют ксеноморфные выделения (рис. 3е). Здесь появляются медистые и высококобальтовые пентландиты, а также высокожелезистый пирротин (троилит). Верлит состоит на 70—72% из оливина, на 20% из плагиоклаза, на 5—7% из клинопироксена и на 1% из биотита. Основной рудный минерал — магнетит, который замещает оливин и равномерно распределяется по всему объему руды, местами включает мелкие (около 30—50 мкм) пентландит-пирротиновые агрегаты (рис. 3г); отмечаются также прожилковидные выделения гидроксидов железа (рис. 3и), также содержащие пентландит-пирротиновые агрегаты (причем пентландит отличается повышенными концентрациями меди и кобальта), по площади которых неравномерно распределены скопления самородной меди (рис. 3к и 3л). Алевро-аргиллит полосчатая порода представляет собой переслаивание алевролитов и аргиллитов (рис. 3ж). Глинистый материал серпентинизирован. Халькопирит-пирротиновые вкрапленники прожилковидной формы (около 10 об. %) располагаются в объеме руды неравномерно. Преобладают пирротиновые агрегаты (рис. 3к). Халькопирит образует редкие вкрапленники (рис. 3н), а также мелкие включения в пирротине. Титанит распределен в основной массе породы в количестве около 5 об. %.

Прожилковидные руды Восточной зоны Пильгуярвинского месторождения развиты в серпентин-тремолитовых метасоматитах, а в Западной зоне в серпентинитах по верлиту. В руде преобладает тремолит, образующий удлиненно-линзовидные беспорядочно ориентированные зерна. Тонкоигольчатые зерна серпентина образуют изометричные скопления среди тремолита. В Центральной зоне прожилковидные руды установлены в оливиновых верлитах, перидотатах (рис. 3м) и в серпентини-

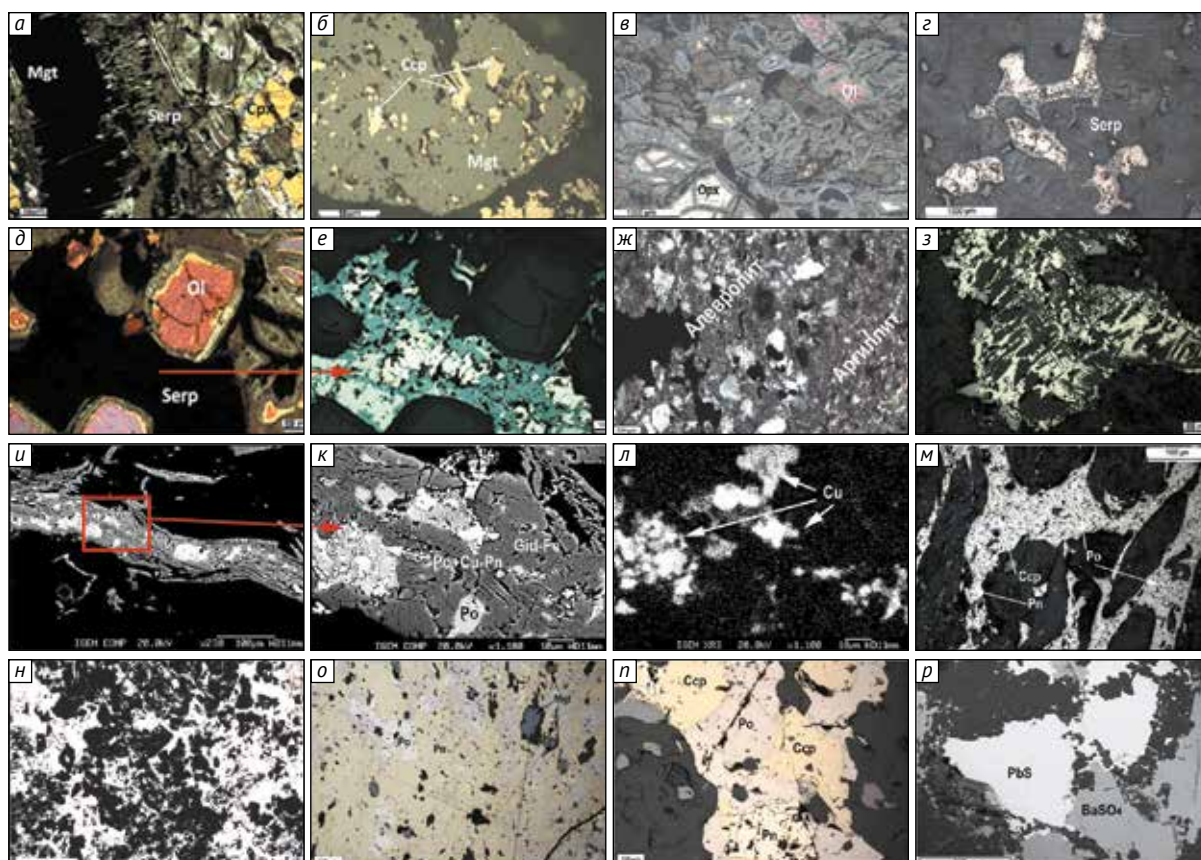


Рис. 3. Основные типы руд Печенгского района. а – оливин, замещается серпентином (николи скрещены), образец Ж-4; б – выделения халькопирита в магнетите (отраженный свет), образец Ж-4; в – оливин (Ol) замещается серпентином (Serp), сохранив центральные части зерен, в межзерновом пространстве присутствует ортопироксен (Opx), изображения в проходящем свете (образец Ж-12); г – оливин, замещающийся серпентином (николи скрещены), образец Ж-11; е – магнетит-халькопирит-пентландит-пирротитовые (Mgt+Ccp+Pn+Po) включения в межзерновом пространстве оливина (отраженный свет), образец Ж-11; ж – халькопирит-пирротитовая руда в алевро-аргиллите, контакт алевролитовых и аргиллитовых прослоев (образец ЖД-2/9); з – пентландит (Pn)-магнетитовый (Mgt) агрегат замещается серпентином (Serp), отраженный свет (образец ПЛ-121); и, к – прожилковидное рудное образование сложного состава: CuPn+Po+Cu в гидроксидах железа (GidFe), изображения в отраженных электронах (образец Ж-13); л – распределение меди (Cu) по площади выделенного участка, изображение в характеристических рентгеновских лучах (образец Ж-13); м – пентландит(Pn)-халькопирит(Ccp)-пирротитовые(Po) прожилки в метасоматите по перидотиту, отраженный свет (образец ПЛ-164); н – общий вид пентландит-халькопирит-пирротитовой массивной руды (образец ЗЛ-10/20) в проходящем свете поляризационного микроскопа (черное – рудные агрегаты, размер кадра 4×5 мм); о – пирротин-пентландит-халькопиритовые агрегаты с магнетитом (образец ЗЛ-10/52); п – крупные пентландит (Pn)-халькопирит (Ccp)-пирротитовые (Po) агрегаты (отраженный свет), вкрапленная руда в оливиновом габбро (образец А-80), месторождение Восток; р – барит-галенитовые агрегаты в кварц-полевошпатовая (Q-Fsh) матрице (образец П-3153), поздняя полиметаллическая жила. Изображение в отраженных электронах. Номера образцов см. в табл. 1

Fig. 3. The main types of the Pechenga region ores. а – olivine, replaced by serpentine (nicoli are crossed), sample No. Ж-4; б – chalcopyrite secretions in magnetite (reflected light), sample No. Ж-4; в – olivine (Ol), replaced by serpentine (Serp), preserving the central parts of the grains, orthopyroxene (Opx) is present in the intergranular space, images in transmitted light (sample No. Ж-12); г – olivine, replaced by serpentine (nicoli are crossed), sample No. Ж-11; е – magnetite-chalcopyrite-pentlandite-pyrrhotite (Mgt+Ccp+Pn+Po) inclusions in the intergranular space of olivine (reflected light), sample No. Ж-11; ж – chalcopyrite-pyrrhotite ore in siltstone, contact of siltstone and mudstone interlayers (sample No. ЖД-2/9); з – pentlandite (Pn)-magnetite (Mgt) aggregate is replaced by serpentine (Serp), reflected light (sample No. ПЛ-121); и, к – veined ore formation of complex composition: CuPn+Po+Cu in iron hydroxides (GidFe), images in reflected electrons (sample No. Ж-13); л – distribution of copper (Cu) over the area of the selected site, image in characteristic X-rays (sample No. Ж-13); м – pentlandite (Pn)-chalcopyrite (Ccp)-pyrrhotite (Po) veins in metasomatite along peridotite, reflected light (sample No. ПЛ-164); н – general view of pentlandite-chalcopyrite-pyrrhotite massive ore (sample No. ЗЛ-10/20) in transmitted light of polarizing microscope (black – ore aggregates, frame size 4×5 mm); о – pyrrhotite-pentlandite-chalcopyrite aggregates with magnetite (sample No. ЗЛ-10/52); п – large pentlandite (Pn)-chalcopyrite (Ccp)-pyrrhotite (Po) aggregates (reflected light), interspersed ore in olivine gabbro (sample No. А-80), Vostok deposit; р – barite-galena aggregates in quartz-feldspar (Q-Fsh) matrix (sample No. П-3153), late polymetallic vein. Backscattered electron image. See Table 1 for sample numbers

тах. Сульфидные минералы составляет от 10% до 30% объема и представлены пирротин-пентландит-халькопиритовыми агрегатами, образующими

крупные прожилковидные выделения (до 1,5 см) неправильной формы (рис. 3м), размером до 6 мм, а также самостоятельные вкрапленные выделения

отдельных минералов. Пентландит отмечается как в виде тонких пластинок или в виде порфировидных включений в пирротине, так и образует крупные выделения в сростании с пирротинном. В периферийных частях выделений пентландита, а также на контакте пентландита с пирротинном присутствуют мелкие (до 20 мкм) кристаллы кобальтина. Рудные минералы частично замещены вторичными: магнетитом и серпентином (рис. 3з). На рис. 3з — пирротин-пентландитовый вкрапленник, в котором пирротин полностью замещен магнетитом, а пентландит замещается серпентином. Второстепенный рудный минерал — титанит, содержащийся в количестве около 5% и выделяющийся среди зерен тремолита. В верлитах крупные ксеноморфные выделения пентландит-халькопирит-пирротинных агрегатов в магнетитовой матрице располагаются в интерстициях оливина и измененного клинопироксена. Такие образования рудных минералов обуславливают пойкилитовую структуру руд. В серпентините пентландит-пирротинные агрегаты распределены в виде прожилковидных выделений и мелких вкрапленников. В полях развития никелистого пирита обнаружены мелкие (10×20 мкм) кристаллиты алтаита, их расположение приурочено к контактам пирита и реликтов пирротина.

Массивные руды установлены в серпентинит-карбонатных метасоматитах по верлитам Пильгуйярвинского месторождения. В руде оливин полностью замещен серпентином и магнетитом, плагиоклаз — карбонатом и серицитом (рис. 3н). Рудная минерализация составляет 65—85% объема породы и представлена пирротин-пентландитовыми (рис. 3о), халькопирит-пирротинными (рис. 3о) агрегатами, а также магнетитом и халькопиритом в виде отдельных зерен (рис. 3о). Большая часть крупных рудных агрегатов замещается тонкими игольчатыми и тонкопластинчатыми кристаллами серпентина. Отмечены выделения округлой формы размером около 5 мкм алтаита в агрегате пирротина. В массивной пиритовой руде полностью измененная вмещающая порода сохранилась в виде редких хлоритовых островков. Основная рудная масса представлена пиритом, обогащенным кобальтом и никелем (около 1 масс. %). На контакте пирита и хлорита выделяются ксеноморфные, возможно, реликтовые зерна халькопирита, в виде прерывистых цепочечных образований. Кроме того, среди зерен халькопирита, на границе пирита и хлорита обнаружены редкие кристаллы галенита размером около 5 мкм.

Вкрапленные руды месторождения Восток, Аллареченское рудное поле

На месторождении Восток вкрапленные руды установлены в метасоматитах по оливиновому габбро (рис. 3п), где породообразующие минералы представлены плагиоклазом — 50% (частично замещается пренитом и карбонатом), амфиболом (ряда тремолит-актинолит) — 18—20%, клинопи-

роксеном — 10% и оливином — 15—20%. Клинопироксен образует ксеноморфные выделения в интерстициях оливина и плагиоклаза, амфибол образует призматические беспорядочно ориентированные в породе зерна. Плагиоклаз в значительной степени замещается пренитом. Рудная минерализация составляет около 15 об. %, сложена сульфидными и оксидами в соотношении 1:1. Сульфиды образуют крупные (до 1 мм) удлиненные прожилковидные выделения с субпараллельной ориентировкой, сложенные халькопирит+пирротин+пентландитовыми агрегатами в межзерновом пространстве породообразующих минералов (рис. 3п). Оксиды представлены Mn-содержащим ильменитом и Cr-магнетитом, которые распределены в породе неравномерно, образуют скопления этих минералов в сростании между собой или с сульфидными минералами, а также редкие изометричные зерна ильменита или Cr-магнетита, распределенные по всему объему породы. Отмечаются также сростки ильменита с титаноммагнетитом.

Полиметаллические жилы

В районе месторождения Пильгуйярви развиты кварцевые жилы с полиметаллическим оруденением, содержащие в основном галенит и сфалерит. Эти жилы имеют более поздний возраст, чем основные руды [1; 3]. В кварц-полевошпатовой матрице жил располагаются крупные выделения галенита (рис. 3р), максимальный размер которых достигает 1,5 см, и галенит-баритовые агрегаты (рис. 3р). Отмечается англезит в виде очаговых выделений в барите, а также в виде тонких окантовок вокруг зерен пирита, располагающихся в ассоциации с баритом. В другом образце установлены крупные выделения галенита (до 3,5 см) в кварце. В галените развиты очаговые выделения англезита разной формы размером 0,01—0,02 мм.

Химический состав сульфидов

Методом рентгеноспектрального микроанализа установлены особенности химического состава сульфидов руд, отобранных в разных частях месторождений Пильгуйярвинское и Восток. Химический состав сульфидов месторождения Восток и Восточной зоны Пильгуйярвинского месторождения очень близок (рис. 4). А состав сульфидов Западной зоны Пильгуйярвинского месторождения заметно отличается (см. рис. 4). В частности, пирротин содержит меньшее количество Fe (менее 60 масс. %), чем в Центральной зоне, где Fe в пирротине достигает 64 масс. %, что соответствует моноклинной форме этого минерала — троилиту [10]. В халькопирите Западной зоны медь преобладает над железом (см. рис. 4).

В Центральной зоне Пильгуйярвинского месторождения химический состав сульфидов меняется в широких пределах (см. рис. 4), особенно это относится к содержанию кобальта в пентландите, которое варьирует от 0,3 до 4,2 масс. % (рис. 5).

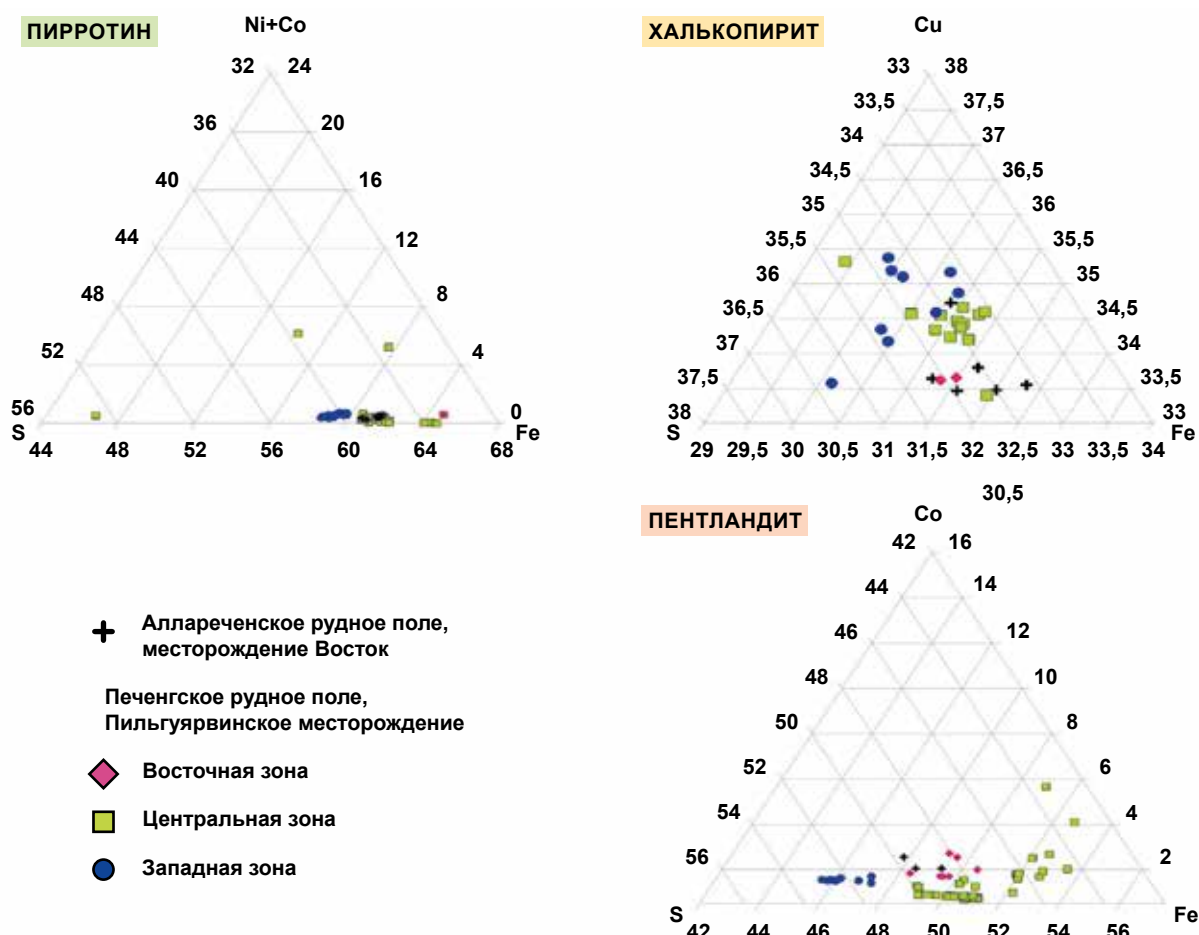


Рис. 4. Химический состав сульфидов месторождений Пильгуйярвинское (Печенгское рудное поле) и Восток (Аллареченское рудное поле)

Fig. 4. Chemical composition of sulfides of Pilguyarvi (Pechenga ore field) and Vostok (Allarechenskoye ore field) deposits

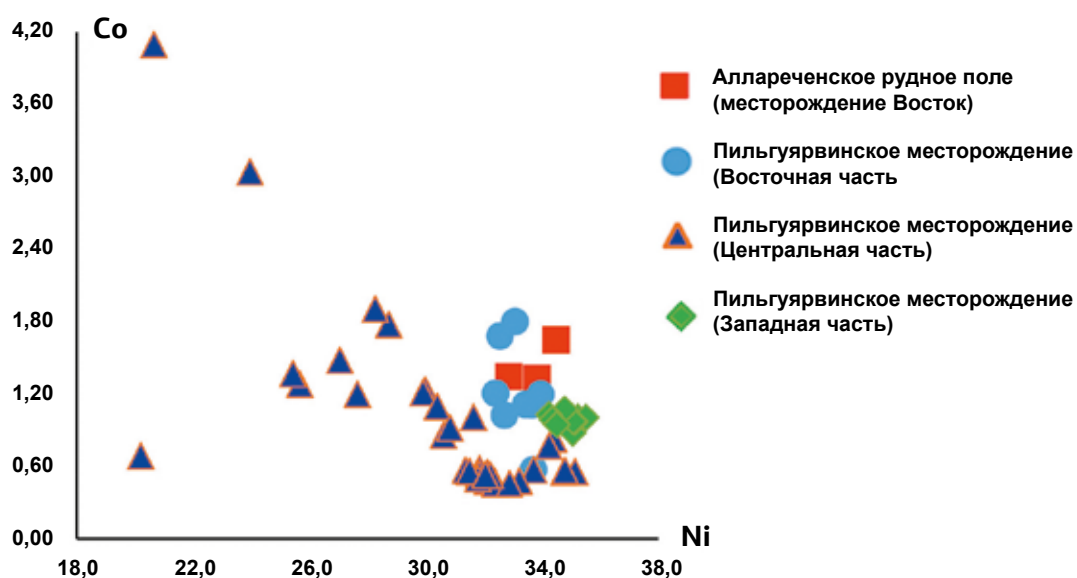


Рис. 5. Соотношение Ni/Co в пентландите Пильгуйярвинского месторождения (Печенгское рудное поле) и Восток (Аллареченское рудное поле)

Fig. 5. The Ni/Co ratio in the pentlandite of the Pilguyarvi deposit (Pechenga ore field) and the Vostok (Allarechenskoye ore field)

Таблица 2. Химический состав основных типов руд Печенгского района, масс. %

| № п/п | Тип руды | n | ппп | SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ общ. | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | P ₂ O ₅ | S общ. | Cu | Ni | Σ |
|-------|--|---|-------|------------------|------------------|--------------------------------|-------------------------------------|--------|-------|------|-------------------|------------------|-------------------------------|--------|----------|----------|-------|
| 1 | Массивная руда, Центральная зона | 1 | Н. д. | 7,57 | 0,09 | 1,47 | 37,36 | 0,05 | 2,13 | 1,93 | 0,27 | < 0,10 | 0,02 | 42,69 | 0,53 | 0,06 | 94,17 |
| 2 | Массивная руда, Западная зона | 2 | Н. д. | 15,62 | 0,23 | 1,04 | 37,19 | 0,14 | 10,37 | 1,42 | < 0,10 | < 0,10 | 0,03 | 23,63 | 2,66 | 5,08 | 89,67 |
| 3 | Прожилковидная руда, Восточная зона | 1 | Н. д. | 42,86 | 0,44 | 2,32 | 21,42 | 0,11 | 16,97 | 3,60 | < 0,10 | < 0,10 | 0,05 | 6,64 | 2,16 | 2,95 | 99,52 |
| 4 | Прожилковидная руда, Центральная зона | 5 | 0,63 | 38,41 | 0,72 | 1,98 | 19,83 | 0,18 | 22,90 | 3,56 | < 0,10 | < 0,10 | 0,06 | 4,65 | 0,79 | 2,16 | 95,87 |
| 5 | Прожилковидная руда, Западная зона | 1 | Н. д. | 40,17 | 0,57 | 2,20 | 19,13 | 0,11 | 18,01 | 7,37 | < 0,10 | < 0,10 | 0,06 | 5,10 | 1,47 | 1,66 | 95,85 |
| 6 | Вкрапленная руда, Восточная зона | 2 | 1,14 | 40,85 | 0,94 | 2,64 | 17,92 | 0,21 | 32,37 | 1,55 | 0,13 | < 0,10 | 0,08 | 1,15 | 0,23 | 0,46 | 99,67 |
| 7 | Вкрапленная руда, Центральная зона | 3 | 3,54 | 39,03 | 0,81 | 2,59 | 17,92 | 0,22 | 31,04 | 1,64 | < 0,10 | 0,19 | 0,07 | 1,31 | 0,68 | 0,61 | 99,65 |
| 8 | Вкрапленная руда, месторождение Восток | 2 | 6,38 | 45,11 | 1,50 | 7,74 | 16,87 | 0,21 | 12,80 | 6,25 | 1,08 | 1,06 | 0,13 | 0,75 | 0,19 | 0,20 | 100,0 |
| 9 | Полиметаллические жилы | 2 | Н. д. | 17,82 | 0,08 | 1,24 | 0,48 | < 0,10 | 0,83 | 0,07 | 0,17 | 0,42 | 0,02 | 11,39 | Pb 50,89 | Ba 10,76 | 94,17 |

Примечание: n — количество проб, ппп — потери при прокаливании, 1—7 — Пильгуйярвинское месторождение.

Геохимические особенности руд

Основные типы руд Печенгского района существенно различаются по химическому составу и содержанию порообразующих окислов (табл. 2). Следует отметить, что установленные содержания пороодо- и рудообразующих компонентов хорошо коррелируют с минералогическими особенностями руд (см. выше).

Основная часть изученных руд принадлежит к полю пород ультраосновного состава. Вместе с тем наблюдается некоторая дифференциация составов (рис. 6). Например, руды Восточной зоны месторождения Пильгуйярви занимают компактную позицию на диаграмме SiO₂/Na₂O + K₂O, содержание SiO₂ составляет около 40 масс. %, а Na₂O + K₂O < 0,4 масс. %; руды Западной зоны практически не содержат щелочных элементов, а содержание SiO₂ варьирует от 7 до 40 масс. %; содержание SiO₂ в рудах Центральной зоны варьирует в широких пределах от 8 до 44 масс. %, а содержание щелочей не превышает 0,3 масс. % за исключением пробы ЖД-2/9 (SiO₂ более 60 масс. %, а сумма

щелочей около 4 масс. %), которая представляет собой алевро-аргиллит — осадочную породу с вкрапленной минерализацией.

По химическому составу образцы полиметаллических жил также попали в поле ультраосновных пород (см. рис. 6), так как они представляют собой массивную галенитовую руду с небольшими островками вмещающей породы, состоящей из хлорит-амфиболитовых агрегатов и редких островков кварца.

Анализ показывает, что содержание MgO в Центральной зоне варьирует в пределах 16—36 масс. %, в то время как содержания TiO₂ и FeO более постоянны и находятся на уровне 0,4—1,0 и 18—22 масс. % соответственно (см. рис. 6). В Западной зоне содержание FeO более высокое и достигает 45 масс. %. Наиболее высоким содержанием TiO₂ отличаются руды месторождения Восток Аллареченского рудного поля.

В массивных рудах Центральной и Западной зон Пильгуйярвинского месторождения преобладают Fe₂O₃ общ. и S (в среднем 37,47% и 35,19% соответственно) и низкие концентрации порообразующих

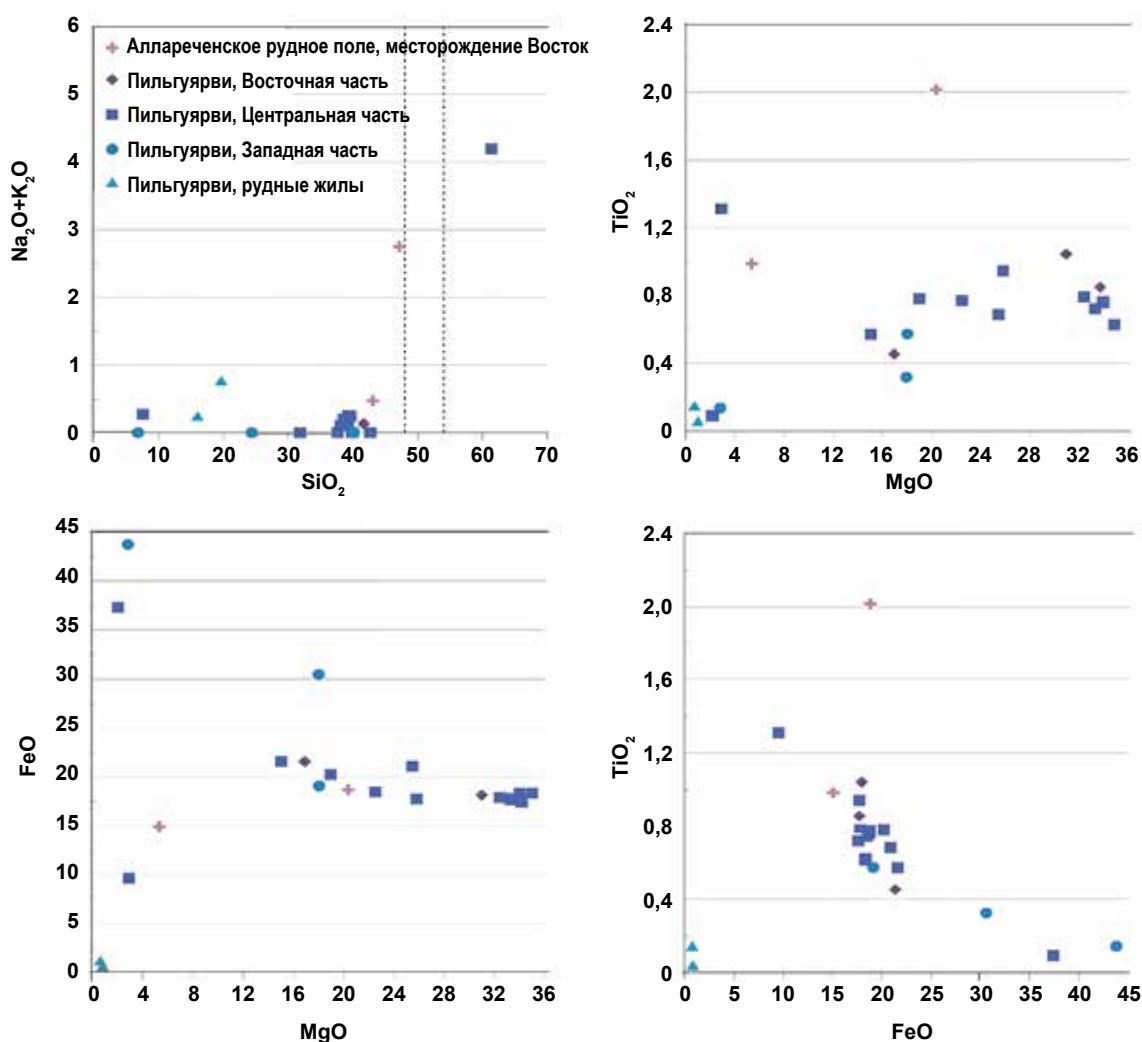


Рис. 6. Составы рудоносных пород Печенгского и Аллареченского рудных полей на диаграммах $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) - \text{SiO}_2$, $\text{MgO}-\text{TiO}_2$, $\text{MgO}-\text{FeO}$ и $\text{FeO}-\text{TiO}_2$
Fig. 6. Compositions of ore-bearing rocks of the Pechenga and Allarechensky ore fields on the diagrams $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) - \text{SiO}_2$, $\text{MgO}-\text{TiO}_2$, $\text{MgO}-\text{FeO}$ and $\text{FeO}-\text{TiO}_2$

компонентов (см. табл. 2). Выделены два типа массивных сульфидных руд: пиритовые (Центральная зона) и Cu-Ni (Западная зона). В последних наиболее высоки содержания основных металлов Cu и Ni (в среднем 2,66% и 5,08% соответственно).

В прожилковидных рудах содержания породообразующих компонентов заметно возрастают, а концентрации Fe_2O_3 общ., S, Cu и Ni соответственно снижаются (в среднем): 20,12%, 5,46%, 1,47% и 2,26% (см. табл. 2). Во вкрапленных рудах породообразующие компоненты, естественно, имеют наиболее высокие концентрации, а рудные компоненты — низкие (см. табл. 2). Вкрапленные руды месторождения Восток Аллареченского рудного поля по сравнению с Пильгуярвинским месторождением более бедные (см. табл. 2).

Распределение микроэлементов в основных типах руд Печенгского района показаны на совмещенных диаграммах (рис. 7). По сравнению с верхней конти-

нентальной корой [11] печенгские руды характеризуются явным обогащением халькофильными и сидерофильными микроэлементами. Коэффициенты обогащения рудных элементов достигают в массивном Cu-Ni типе руд нескольких десятков (Au, Cd), сотен (Ag, Se, Re, Pt) и тысяч (Ni, Cu, Ir) раз. Кроме того, коэффициенты обогащения ряда элементов (Zn, Te, Bi) незначительно превышают единицу.

В других типах руд коэффициенты обогащения отмеченных выше микроэлементов заметно снижаются, иногда почти на порядок (см. рис. 7). Например, коэффициенты обогащения в прожилковидных рудах достигают нескольких десятков (Cr, Ag, Re, Cd) и сотен (Se, Cu, Ni, Pt) раз. Кроме того, эти руды незначительно обогащены Bi. Практически аналогичным образом с небольшими вариациями микроэлементы распределены во вкрапленном типе руд.

Отметим, что вкрапленные руды месторождения Восток Аллареченского рудного поля обладают

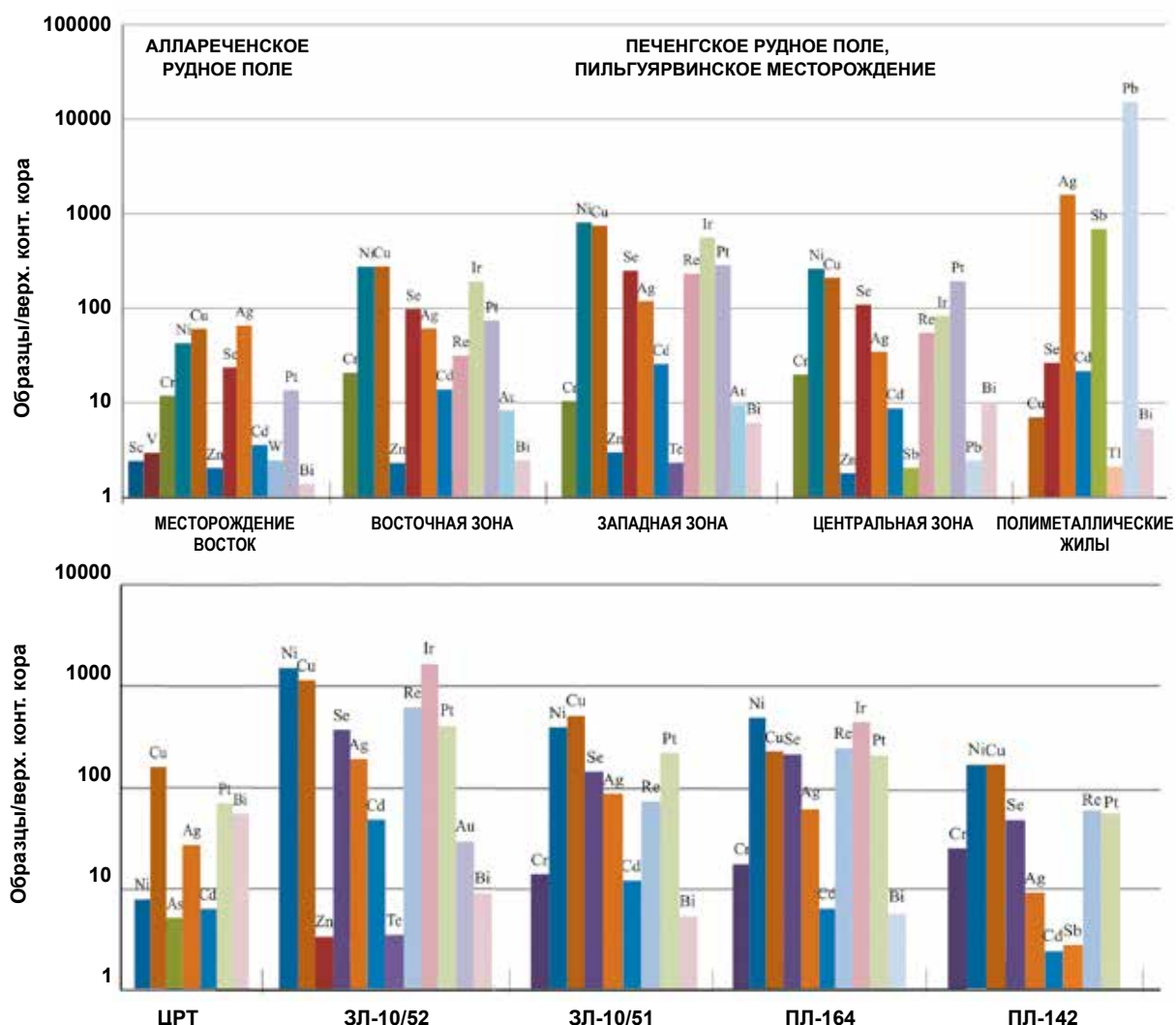


Рис. 7. Распределение микроэлементов в основных типах руд Печенгского района. Номера проб см. в табл. 2
 Fig. 7. Distribution of trace elements in the main types of ores of the Pechenga region. See Table 2 for sample numbers

определенным сходством с аналогичными рудами Пильгуярвинского месторождения. Естественно, что поздние полиметаллические жилы характеризуются специфическим распределением микроэлементов (см. рис. 7).

Необходимо отметить довольно высокую обогащенность всех типов руд Bi, Re и Cd (см. рис. 7), которые потенциально промышленно значимы как высокотехнологичные металлы и могут быть перспективны для попутной добычи.

Таким образом, распределение микроэлементов в различных текстурных типах Cu-Ni руд обладают большим сходством (см. рис. 7), что свидетельствует о геохимическом сродстве микроэлементов и их синхронном участии в рудообразовании.

Распределение РЗЭ в рудах зависит от типа вмещающих пород. На рис. 8а (Восточная зона Пильгуярвинского месторождения) распределение РЗЭ дифференцировано, в двух близких по петрографическим характеристикам (метасоматиты по верли-

ту) образцах — пологое снижение содержаний от легких РЗЭ к тяжелым, а в серпентин-тремолитовом метасоматите отмечается Eu-минимум.

В Центральной зоне спектры распределения РЗЭ в рудах довольно близки, наблюдается пологое снижение от легких к тяжелым, однако и здесь выделяется спектр с Eu-минимумом (образец ПЛ-156 — метасоматит по дуниту). Отметим, что распределение РЗЭ в алевро-аргиллите повторяет конфигурацию большинства спектров руд в этой зоне, однако находится значительно выше всех остальных, так как характеризуется более высоким содержанием РЗЭ в породе (см. рис. 8б, ЖД-2/9). Пиритовые массивные руды кроме низкой суммы РЗЭ характеризуются отчетливо проявленным европиевым максимумом (см. рис. 8б, образец ЦРТ).

Западная зона отличается неоднородностью распределения — в образце ЗЛ-10/20 (массивная Cu-Ni руда в серпентините) появляется Eu-минимум, в образце ЗЛ-10/51 (метасоматит по верлиту) — Eu-

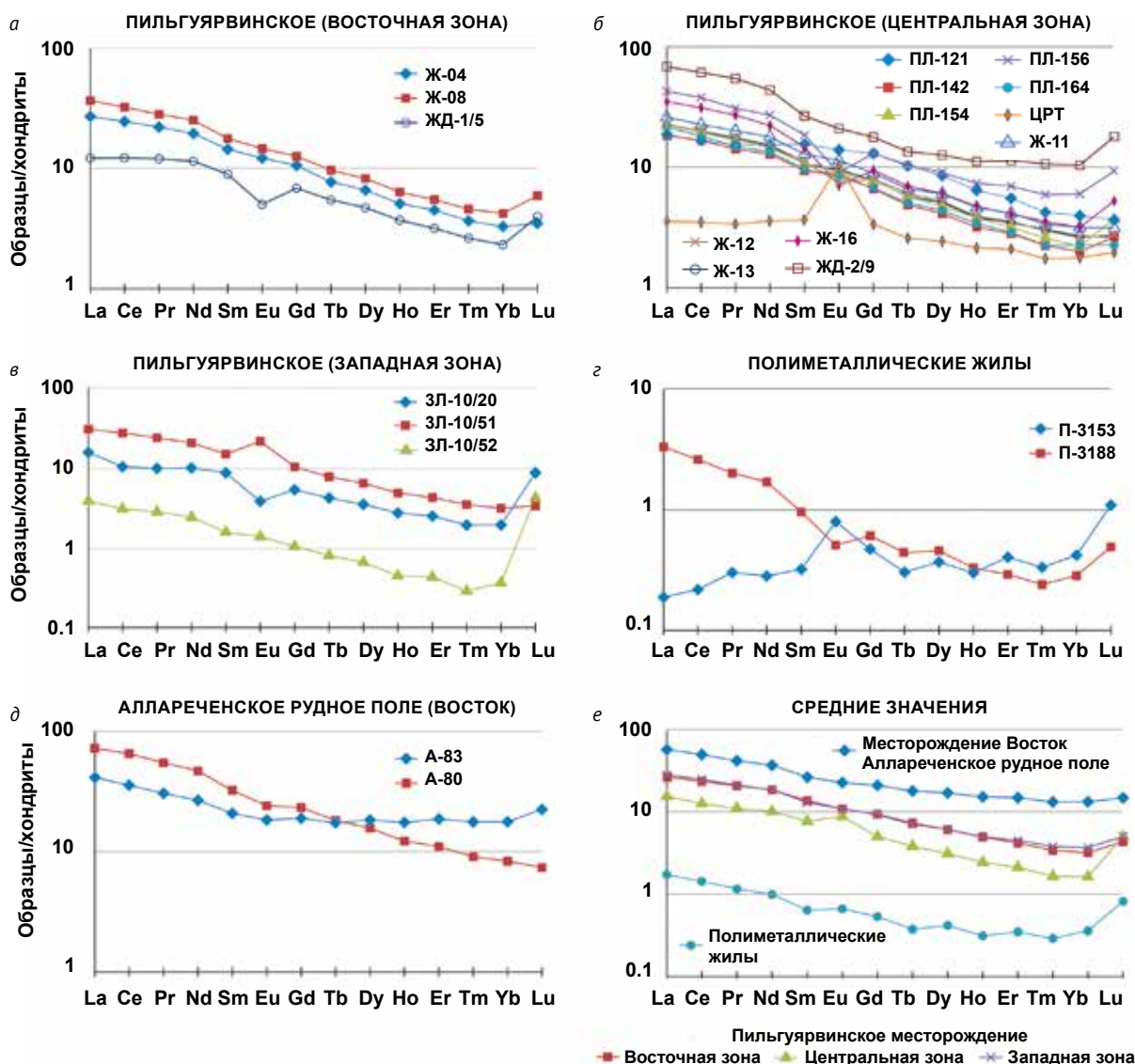


Рис. 8. Распределение РЗЭ, нормированное по хондритам [12], в основных типах руд Печенгского района. Номера проб на графиках см. в табл. 1

Fig. 8. Distribution of REEs normalized by chondrites [12] in the main types of Cu-Ni ores in the Pechenga region. For sample numbers on the graphs, see Table 1

максимум, а в образце ЗЛ-10/52 (массивная Cu-Ni руда) РЗЭ содержатся только легкие РЗЭ и в очень малом количестве (см. рис. 8в).

Во вкрапленных рудах месторождения Восток Аллареченского рудного поля в метасоматите по оливиновому габбро (А-80) содержание РЗЭ несколько выше, чем в Пильгуйрвинском месторождении, но спектр по конфигурации также полого снижается к области тяжелых РЗЭ; в образце вкрапленной руды в хлорит-амфиболовом сланце (образец А-83) содержание тяжелых РЗЭ заметно выше, линия распределения показывает, что содержания легких и тяжелых элементов в породе близки.

Отметим, что концентрация редких земель в рудах Печенгского района за исключением массивных руд и полиметаллических жил превышает уровень стан-

дарта хондрита [12], фракционирование РЗЭ слабое (рис. 8). Спектры распределения нормированных по хондриту РЗЭ для Cu-Ni руд имеют небольшой отрицательный уклон: суммарные содержания легких РЗЭ выше, чем тяжелых (см. рис. 8е). Идентичность конфигураций трендов распределения проявляется для средних РЗЭ и тяжелых РЗЭ (см. рис. 8е). Наклонные и пологие участки спектров РЗЭ разных типов руд имеют большое сходство между собой (см. рис. 8). Схожесть геометрии спектров РЗЭ массивных и прожилковидных и вкрапленных Cu-Ni типов руд, содержащих значительную примесь вмещающих пород, указывает на унаследованность состава РЗЭ в рудах от вмещающих пород. Этот факт также подтверждает, что сумма РЗЭ в массивных рудах и полиметаллических жилах значительно ниже, чем

в других типах руд. Таким образом, концентрация РЗЭ в рудах Печенгского района характеризует условия их образования.

Заключение

В результате выполненных исследований получены новые данные по химическому составу основных рудных минералов, содержанию микроэлементов, включая РЗЭ, в рудах Печенгского района. Установлено, что основные текстурные типы руд (массивные, прожилковидные и вкрапленные) существенно различаются по химическому составу и содержанию пороодо- и рудообразующих компонентов.

Выявлено обогащение руд достаточно широким спектром микроэлементов. По сравнению с верхней корой печенгские руды характеризуются явным обогащением халькофильными и сидерофильными микроэлементами, а также незначительным обогащением РЗЭ. Коэффициенты обогащения рудных элементов достигают в основном десятков (Cr, Au, Cd), сотен (Ag, Se, Re, Pt) и тысяч (Ni, Cu, Ir) раз. Наиболее обогащены основными рудными элементами массивные и прожилковидные руды. Распределение микроэлементов в различных текстурных типах Cu-Ni руд обладают большим сходством, что свидетельствует об их геохимическом родстве и синхронном участии в рудообразовании. Геохимические особенности хорошо согласуются с минеральным составом руд. Как и в Норильском районе [13], установлена довольно высокая обогащенность всех типов руд Bi, Re и Cd, которые потенциально промышленно значимы как высокотехнологичные металлы и могут быть перспективны для попутной добычи.

Концентрация редких земель в основных типах руд за исключением массивных руд и поздних полиметаллических жил превышает уровень стандарта хондрита, фракционирование РЗЭ слабое. Суммарные содержания легких РЗЭ выше, чем тяжелых. Схожесть геометрии спектров РЗЭ массивных и прожилково-вкрапленных, брекчиевидных, вкрапленных типов руд, содержащих значительную примесь вмещающих пород, указывает на унаследованность состава РЗЭ в рудах от вмещающих пород.

Авторы выражают благодарность С. Ф. Служеникину за ценные критические замечания и Н. В. Сидоровой за подготовку проб к исследованиям.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-05-70001 «Изучение геологических и геодинамических обстановок формирования крупных месторождений стратегических металлов

Арктической зоны России: выводы для прогнозирования и поисков новых месторождений»).

Литература

1. Горбунов Г. И. Минералогия медно-никелевых месторождений Кольского полуострова. — СПб.: Наука, 1981. — 345 с.
2. Дистлер В. В., Филимонова А. А., Гроховская Т. Л. и др. Платиновые металлы в медно-никелевых рудах Печенгского рудного поля // Геология руд. месторождений. — 1998. — Т. 31, № 6. — С. 3—17.
3. Горбунов Г. И., Астафьев Ю. А., Гончаров Ю. В. и др. Медно-никелевые месторождения Печенги. — М.: ГЕОС, 1999. — 234 с.
4. Зак С. И., Кочнев-Первухов В. И., Проскуряков В. В. Ультраосновные породы Аллареченского района, их метаморфизм и оруденение. — Петрозаводск: Карелия, 1972. — 129 с.
5. Налдретт А. Дж. Магматические сульфидные месторождения медно-никелевых и платинометаллических руд. — СПб.: СПбГУ, 2003. — 487 с.
6. Смолькин В. Ф. Коматиитовый и пикритовый магматизм раннего докембрия Балтийского щита. — СПб.: Наука, 1992. — 278 с.
7. Бортников Н. С., Волков А. В., Галямов А. Л. и др. Минеральные ресурсы высокотехнологичных металлов России: состояние и перспективы развития // Геология руд. месторождений. — 2016. — Т. 58, № 2. — С. 97—119.
8. Казанский В. И., Кузнецов О. Л., Кузнецов А. В. и др. Глубинное строение и геодинамика Печенгского рудного района: опыт исследования Кольской сверхглубокой скважины // Геология руд. месторождений. — 1994. — Т. 36, № 6. — С. 500—519.
9. Лобанов К. В., Чичеров М. В., Чижова И. А. и др. Глубинное строение и рудообразующие системы Печенгского рудного района (Арктическая зона России) // Арктика: экология и экономика. — 2019. — № 3 (35). — С. 107—122. — DOI: 10.25283/2223-4594-2019-3-107-122.
10. King H. E., Prewitt C. T. High-pressure and high-temperature polymorphism of iron sulfides (FeS) // Acta Crystallographica. — 1982. — Vol. 38. — P. 1877—1887.
11. Тейлор С. Р., Мак-Леннан С. М. Континентальная кора: ее состав и эволюция. — М.: Мир, 1988. — 384 с.
12. McDonough W. F., Sun S. S. The Composition of the Earth // Chemical Geology. — 1995. — Vol. 120. — P. 223—253.
13. Григорьева А. В., Волков А. В., Мурашов К. Ю. Редкие и редкоземельные элементы в Cu-Ni рудах Норильского района // Арктика: экология и экономика. — 2021. — Т. 11, № 1. — С. 76—89. — DOI: 10.25283/2223-4594-2021-1-76-89.

Информация об авторах

Лобанов Константин Валентинович, доктор геолого-минералогических наук, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (119017, Россия, Москва, Старомонетный пер., д. 35), e-mail: lobanov@igem.ru.

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

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

Чичеров Михаил Владимирович, научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (119017, Россия, Москва, Старомонетный пер., д. 35), e-mail: chicher@igem.ru.

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

Библиографическое описание данной статьи

Лобанов К. В., Григорьева А. В., Волков А. В. и др. Редкие и редкоземельные элементы руд Печенгского района // Арктика: экология и экономика. — 2021. — Т. 11, № 3. — С. 406—421. — DOI: 10.25283/2223-4594-2021-3-406-421.

LESS-COMMON AND RARE EARTH ELEMENTS OF THE PECHENGA REGION ORES

Lobanov, K. V., Grigorieva, A. V., Volkov, A. V. Chicherov, M. V., Murashov, K. Yu.

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

The article was received on June 25, 2021

Abstract

The article presents the investigations in the Pechenga ore region — one of the largest industrial regions in the Arctic zone of Russia, located on the territory of the Murmansk area. The researchers obtained new data on the chemical composition of the main ore minerals, the content of trace elements, including rare earths (REE), in the ores of the Pilguyarvi and Vostok deposits and late polymetallic veins of the Pechenga region. They found that the main textural types of ores (massive, veined and disseminated) differ significantly in chemical composition and content of rock and ore-forming components. They also revealed the enrichment of ores with a wide range of trace elements. In comparison with the upper crust, the Pechenga ores are clearly enriched with chalcophilic and siderophilic trace elements. The enrichment coefficients of ore elements reach mainly tens (Cr, Au, Cd) hundreds (Ag, Se, Re, Pt) and thousands (Ni, Cu, Ir) times. The distribution of trace elements in various types of Cu-Ni ores has a great similarity, which indicates their geochemical affinity and synchronous participation in ore formation. The geochemical features are in good agreement with the mineral composition of the ores. The concentration of rare earth elements in the main types of ores, with the exception of massive ores and late polymetallic veins, exceeds the level of the chondrite standard and the REE fractionation is weak. The composition of the REE in ores came by from the host rocks. The research has established the high enrichment of all types of Re, Bi and Cd ores, which are potentially industrially significant as high-tech metals and are of considerable interest for associated mining.

Keywords: Pechenga region, copper-nickel deposits, ore geochemistry, trace elements, rare earth elements.

The authors are grateful to S. F. Sluzhenikin for valuable critical comments; to N. V. Sidorova — for technical assistance during the preparation of samples for research.

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

References

1. Gorbunov G. I. Mineralogy of copper-nickel deposits of the Kola Peninsula. St. Petersburg, Science, 1981, 345 p. (In Russian).
2. Distler V. V., Filimonova A. A., Grokhovskaya T. L. et al. Platinum metals in copper-nickel ores of the Pechenga ore field. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii*, 1998, vol. 31, no. 6, pp. 3—17. (In Russian).
3. Gorbunov G. N., Astaf'ev Yu. A., Goncharov Yu. V. et al. Copper-nickel deposits of the Pechenga. *Otv. red. N. P. Laverov. Moscow, GEOS*, 1999, 236 p. (In Russian).
4. Zak S. I., Kochnev-Pervukhov V. I., Proskuryakov V. V. Ultrabasic rocks of the Allarechensky district, their metamorphism and mineralization. Petrozavodsk, Karelia, 1972, 129 p. (In Russian).
5. Naldrett A. J. Magmatic sulfide deposits of copper-nickel and platinum-metal ores. — St. Petersburg, St. Petersburg State University, 2003, 487 p. (In Russian).
6. Smolkin V. F. Komatiite and picrite magmatism of the early Precambrian of the Baltic shield. St. Petersburg, Science, 1992, 278 p. (In Russian).
7. Bortnikov N. S., Volkov A. V., Galyamov A. L. et al. Mineral Resources of High-tech Metals in Russia: State of the Art and Outlook. *Geology of Ore Deposits*, 2016, vol. 58, no. 2, pp. 83—103. DOI: 10.1134/S1075701516020021.
8. Kazanskii V. I., Kuznetsov O. L., Kuznetsov A. V. et al. Deep structure and geodynamics of the Pechenga ore district: the experience of study of the Kola superdeep borehole. *Geologiya rud. mestorozhdenii*, 1994, vol. 36, no. 6, pp. 500—519. (In Russian).
9. Lobanov K. V., Chicherov M. V., Chizhova I. A. et al. Depth structure and oreforming systems of the Pechenga ore region (Russian Arctic Zone). *Arktika: ekologiya i ekonomika. [Arctic: Ecology and Economy]*, 2019, no. 3 (35), pp. 107—122. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-3-107-122. (In Russian).
10. King H. E., Prewitt C. T. High-pressure and high-temperature polymorphism of iron sulfides (FeS) // *Acta Crystallographica*, 1982, vol. 38, pp. 1877—1887.
11. Taylor S. R., McLennan S. M. Continental crust: its composition and evolution. Moscow, Mir, 1988, 384 p. (In Russian).
12. McDonough W. F., Sun S. S. The Composition of the Earth. *Chemical Geology*, 1995, vol. 120, pp. 223—253.
13. Grigorieva A. V., Volkov A. V., Murashov K. Yu. Rare-earth elements in Cu-Ni ores of the Norilsk region. *Arktika: ekologiya i ekonomika. [Arctic: Ecology and Economy]*, 2021, vol. 11, no. 1, pp. 76—89. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-1-76-89. (In Russian).

Information about the authors

Lobanov, Konstantin Valentinovich, Doctor of Geology and Mineralogy, Corresponding Member of RAS, Chief Researcher, Institute of Ore Deposit Geology, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of RAS (35, Staromonetny Lane, Moscow, Russia, 119017), e-mail: lobanov@igem.ru.

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

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

Chicherov, Mikhail Vladimirovich, Researcher, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS (35, Staromonetny Lane, Moscow, Russia, 119017), e-mail: chicher@igem.ru.

Murashov, Konstantin Yur'evich, Junior Researcher, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of RAS (35, Staromonetny Lane, Moscow, Russia, 119017), e-mail: kostik.mur@mail.ru.

Bibliographic description of the article

Lobanov, K. V., Grigorieva, A. V., Volkov, A. V., Chicherov, M. V., Murashov, K. Yu. Less-common and rare earth elements of the Pechenga region ores. *Arktika: ekologiya i ekonomika. [Arctic: Ecology and Economy]*, 2021, vol. 11, no. 3, pp. 406—421. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-3-406-421. (In Russian).