

**СУЛЬФИДНЫЕ ЭПГ-Cu-Ni И МАЛОСУЛЬФИДНЫЕ Pt-Pd РУДЫ
МОНЧЕГОРСКОГО РУДНОГО РАЙОНА (западный сектор Арктики):
ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА, МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ
И ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ**

В.В. Чашин¹, В.Н. Иванченко²

¹Геологический институт Кольского научного центра РАН, 184209, Апатиты, ул. Ферсмана, 14, Россия

²АО «Росгеология», 199155, Санкт-Петербург, ул. Одоевского, 24, Россия

За последнее время в пределах Мончегорского рудного района (МРР) западного сектора Арктики была выполнена оценка платиноносности известных Cu-Ni месторождений ((Ниттис-Кумужья-Травяная (НКТ), Нюд, рудный пласт 330 (РП330) и Терраса)) и выявлены новые месторождения (Западный Ниттис) и проявления (Морошковое озеро, Поаз и Арваренч) сульфидных ЭПГ-Cu-Ni руд, а также месторождения малосульфидных Pt-Pd руд (Лойпишнюн, Южная Сопча и Вуручайвенч). Все они приурочены к палеопротерозойским (около 2.5 млрд лет) расслоенным интрузиям: Мончегорскому плутону (Мончеплутону) и Мончетундровскому массиву и по структурному положению делятся на два типа: базальные, локализованные в пределах краевых частей интрузий, и рифовые (стратиформные). Для всех типов руд характерна ярко выраженная палладиевая специализация. В сульфидных ЭПГ-Cu-Ni рудах минералы платиновой группы (МПГ) имеют ограниченный состав и представлены преимущественно соединениями Pt и Pd с Bi и Te, а также подчиненными арсенидами и сульфидами ЭПГ. Для малосульфидных Pt-Pd руд характерно значительное разнообразие МПГ с преобладанием сульфидов, висмутотеллуридов и арсенидов ЭПГ. Сульфидные ЭПГ-Cu-Ni месторождения и проявления базального типа (Западный Ниттис, НКТ, Нюд, Морошковое озеро, Поаз, Арваренч) образовались в результате аккумуляции сульфидов основных металлов и ЭПГ в несмешивающихся сульфидах и последующей сегрегации их в экономических концентрациях. Месторождение (РП330) и проявление (Терраса) рифового типа образовались в результате инъекции дополнительных порций серонасыщенной магмы. Рудные концентрации в малосульфидных Pt-Pd месторождениях базального типа (Лойпишнюн и Южная Сопча) сформировались за счет обогащенных рудными компонентами и флюидами остаточных расплавов, отделение и кристаллизация которых возникли в результате длительных рудообразующих процессов. Месторождение рифового типа Вуручайвенч является следствием глубокого фракционирования родоначальной магмы с образованием сульфидной жидкости, обогащенной Cu и ЭПГ. Значительные запасы и крупные прогнозные ресурсы сульфидных ЭПГ-Cu-Ni и малосульфидных Pt-Pd руд служат надежной минерально-сырьевой базой для развития добывающей промышленности в Кольском регионе западного сектора Арктики.

Сульфидные ЭПГ-Cu-Ni и малосульфидные Pt-Pd руды, базальный и рифовый типы месторождений и проявлений, геохимия ЭПГ, минералы платиновой группы, Мончеплутон, Мончетундровский массив, Мончегорский рудный район

**SULFIDE PGE-Cu-Ni AND LOW-SULFIDE Pt-Pd ORES
OF THE MONCHEGORSK ORE DISTRICT (Arctic western sector):
GEOLOGY, MINERALOGY, GEOCHEMISTRY, AND GENESIS**

V.V. Chashchin, V.N. Ivanchenko

During the recent exploration of the Monchegorsk ore district (MOD) in the Arctic western sector, the platinum potential of known Cu-Ni deposits (Nittis-Kumuzhya-Travyanaya (NKT), Nyud, Ore Horizon 330 (OH330), and Terrasa) has been assessed, and new sulfide PGE-Cu-Ni deposits (Western Nittis) and manifestations (Moroshkovoe Ozero, Poaz, and Arvarench), and low-sulfide Pt-Pd deposits (Loipishnyun, Southern Sopcha, and Vuruchuaivench) have been discovered. All of them are confined to Paleoproterozoic (ca. 2.5 Ga) layered intrusions (the Monchegorsk pluton (Monchepluton) and the Monchetundra massif) and are divided into two types according to their structural position: basal, located in the marginal parts of intrusions, and reef-type (stratiform). All types of ores show Pd specialization. Platinum group minerals (PGM) have a limited composition in sulfide PGE-Cu-Ni ores and are represented by predominant Pt and Pd compounds with Bi and Te and subordinate PGE arsenides and sulfides. Low-sulfide Pt-Pd ores are characterized by a significant variety of PGM, with a predominance of PGE sulfides, bismuthotellurides, and arsenides. Sulfide PGE-Cu-Ni deposits and manifestations (Western Nittis, NKT, Nyud, Moroshkovoe Ozero, Poaz, and Arvarench) formed through the accumulation of base metal sulfides and PGE in immiscible sulfides and their subsequent segregation in commercial contents. The reef-type OH330 deposit and Terrasa manifestation resulted from the injection of ad-

ditional portions of sulfur-saturated magma. The basal-type low-sulfide Pt–Pd deposits (Loipishnyun and Southern Sopcha) formed from residual melts enriched in ore components and fluids separated and crystallized during long-term ore-forming processes. The reef-type Vuruchuaivench deposit is the result of deep fractionation of the parental magma with the formation of a sulfide liquid enriched in Cu and PGE. Significant reserves and large predicted resources of sulfide PGE–Cu–Ni and low-sulfide Pt–Pd ores are a reliable mineral resource base for the development of the mining industry in the Kola region of the Arctic western sector.

Sulfide PGE–Cu–Ni and low-sulfide Pt–Pd ores, basal and reef types of deposits and manifestations, PGE geochemistry, platinum group minerals, Monchepluton, Monchetundra massif, Monchegorsk ore district

ВВЕДЕНИЕ

В арктической зоне России сосредоточены наиболее значительные запасы металлов платиновой группы, крупнейшие из них находятся в Норильском рудном районе, дающем 42 % мировой добычи палладия [Гурская, Додин, 2015]. Важное промышленное значение имеют и платинометалльные месторождения западного сектора Арктики. Здесь на территории северо-восточной части Фенноскандинавского щита известно около 30 палеопротерозойских расслоенных интрузий (рис. 1), с некоторыми из которых связаны крупные месторождения хромовых, сульфидных ЭПГ–Cu–Ni и малосульфидных Pt–Pd руд, а также проявления Ti и V. Из них на территории Кольского региона располагается около 10 интрузий, в том числе несколько рудоносных, входящих в состав Мончегорского и Федорово-Панского рудных районов.

Рудный потенциал МРР определяется наличием целой серии платинометалльных месторождений, пространственно и генетически связанных с Мончеплутоном и Мончетундровским массивом, причем Мончеплутон является наиболее продуктивным в отношении полезных ископаемых по сравнению с другими палеопротерозойскими расслоенными интрузивами Фенноскандинавского щита. Это позволяет рассматривать МРР в качестве одного из важнейших платиноносных районов в Кольском регионе. Наряду с Федорово-Панским рудным районом он входит в состав Кольской платинометалльной провинции [Митрофанов и др., 1999], которая является второй по значимости в России после Норильской.

Большинство сульфидных Cu–Ni месторождений, приуроченных к Мончеплутону, известны с конца 30-х годов прошлого века. Эти месторождения изучались на протяжении длительного времени, в результате чего были обнаружены богатые жильные, инъекционные и бедные вкрапленные руды. Жильные руды были отработаны в середине 70-х годов прошлого века, а инъекционные и бедные вкрапленные руды отнесены к нерентабельным.

В течение последних 15 лет в МРР проводилась оценка платиноносности известных месторождений Cu–Ni руд, а также выполнены поиски новых, в том числе нетрадиционных видов минерального сырья, таких как хромовые и платинометалльные руды. В результате этих работ определена платиноносность нескольких известных Cu–Ni месторождений (НКТ, РП330, Нюд, Терраса), а также выявлены новые месторождения и проявления ЭПГ–Cu–Ni руд (Западный Ниттис, Морошковое озеро, Поаз, Арваренч). Кроме того, были открыты месторождения малосульфидных Pt–Pd руд (Лойпишнюн, Южная Сопча, Вуручуайвенч) (рис. 2), которые являются новыми для Кольского региона. В это же время в связи с Мончеплутоном было выявлено и разведано крупное Сопчеозерское хромовое месторождение.

Цель данной статьи заключается в рассмотрении особенностей геологического строения, минерального состава, геохимии и генетических особенностей сульфидных ЭПГ–Cu–Ni и малосульфидных Pt–Pd месторождений и проявлений МРР на основании новых результатов поисковых работ и научных исследований.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ФЕННОСКАНДИНАВСКОГО ЩИТА

Мончегорский рудный район расположен в пределах северо-восточной части Фенноскандинавского щита, в геологическом строении которой принимают участие три крупных архейских геологических сегмента: Кольская и Карельская провинции, а также Беломорский подвижный пояс (см. рис. 1). Упрощенно континентальная кора Кольской и Карельской провинций представлена в основном гранитоидными тоналит-трондьемит-гранодиоритового (ТТГ) состава с фрагментами метаосадочных и метамагматических пород, а также супракрустальными метавулканическими и метаосадочными породами архейских зеленокаменных поясов.

Беломорский подвижный пояс занимает положение между Кольской и Карельской провинциями (см. рис. 1). В нем выделяются те же структурно-вещественные ансамбли, что и в соседних провинциях,

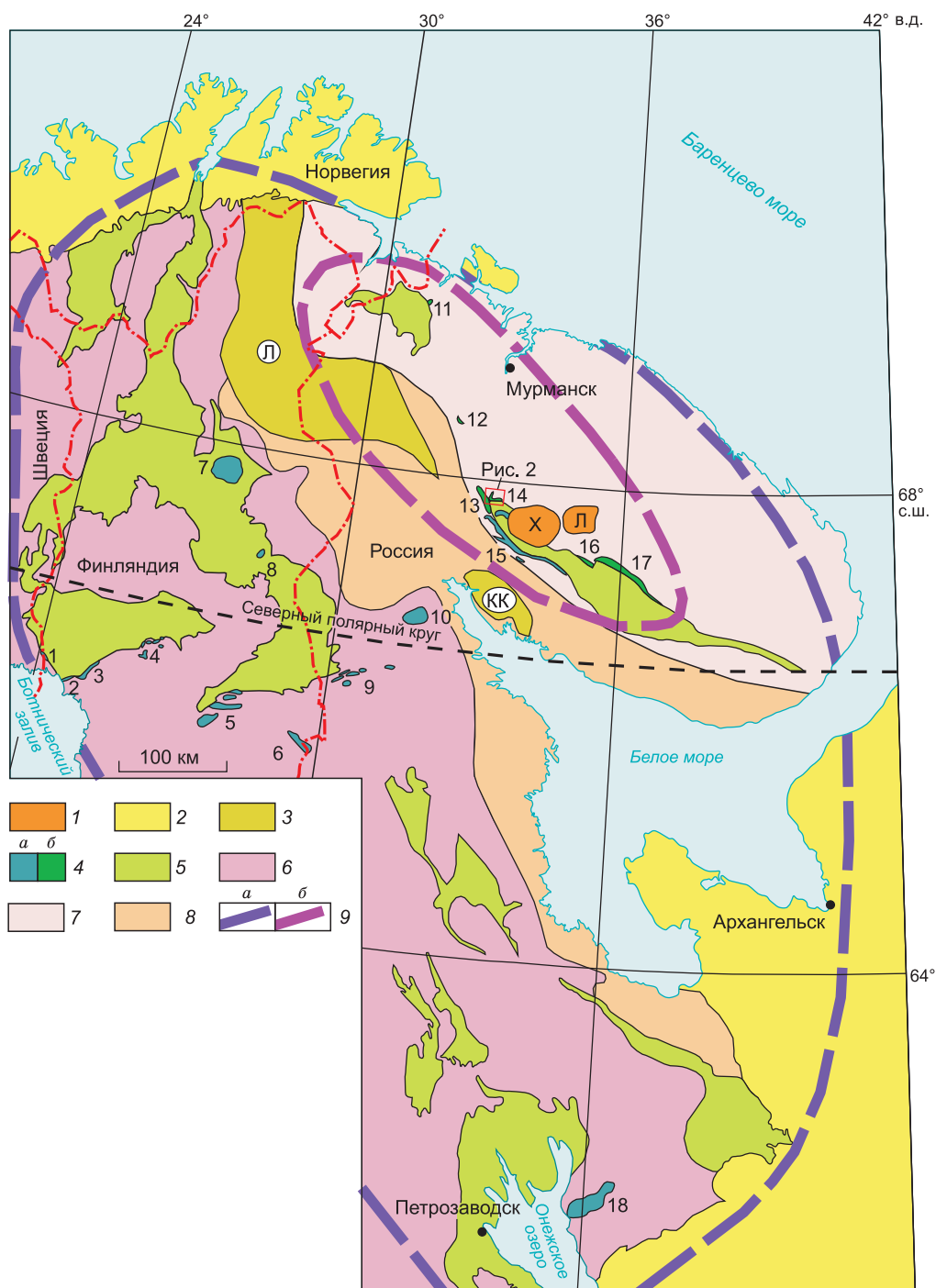


Рис. 1. Схема расположения палеопротерозойских расслоенных интрузий северо-восточной части Фенноскандинавского щита Европейской арктической зоны, модифицированная с использованием материалов [Gaál, Gorbatschev, 1987; Alapieti et al., 1990; Шарков, Богатиков, 1998; Коровкин и др., 2003].

1 – палеозойские плутоны щелочных нефелиновых сиенитов: Хибинский (Х) и Ловозерский (Л); 2 – позднепротерозойский – палеозойский осадочный чехол; 3 – палеопротерозойские гранулитовые пояса: Лапландский (Л), Кандакшско-Колвицкий (КК); 4 – палеопротерозойские расслоенные интрузии: с возрастом 2.45 млрд лет (а) и возрастом 2.50 млрд лет (б); 5 – палеопротерозойские рифтогенные осадочно-вулканогенные структуры; 6, 7 – архейские провинции: 6 – Карельская, 7 – Кольская; 8 – Беломорский подвижный пояс; 9 – контуры мантийных плюмов: более раннего (а), более позднего (б), по [Смолюкин и др., 2009]. 1–18 – расслоенные интрузии и комплексы: 1 – Торнио, 2 – Кеми, 3 – Пенникат, 4 – комплекс Портимо, 5 – комплекс Коиллисмаа, 6 – Нярьякяваара, 7 – Коителайнен, 8 – Аканваара, 9 – Олангский комплекс, 10 – Ковдозерская, 11 – гора Генеральская, 12 – Улитаозерская, 13 – Мончетундровская, 14 – Мончеплутон, 15 – Имандровский комплекс, 16 – Федорово-Тундровская, 17 – Панская, 18 – Бураковско-Аганозерский комплекс.

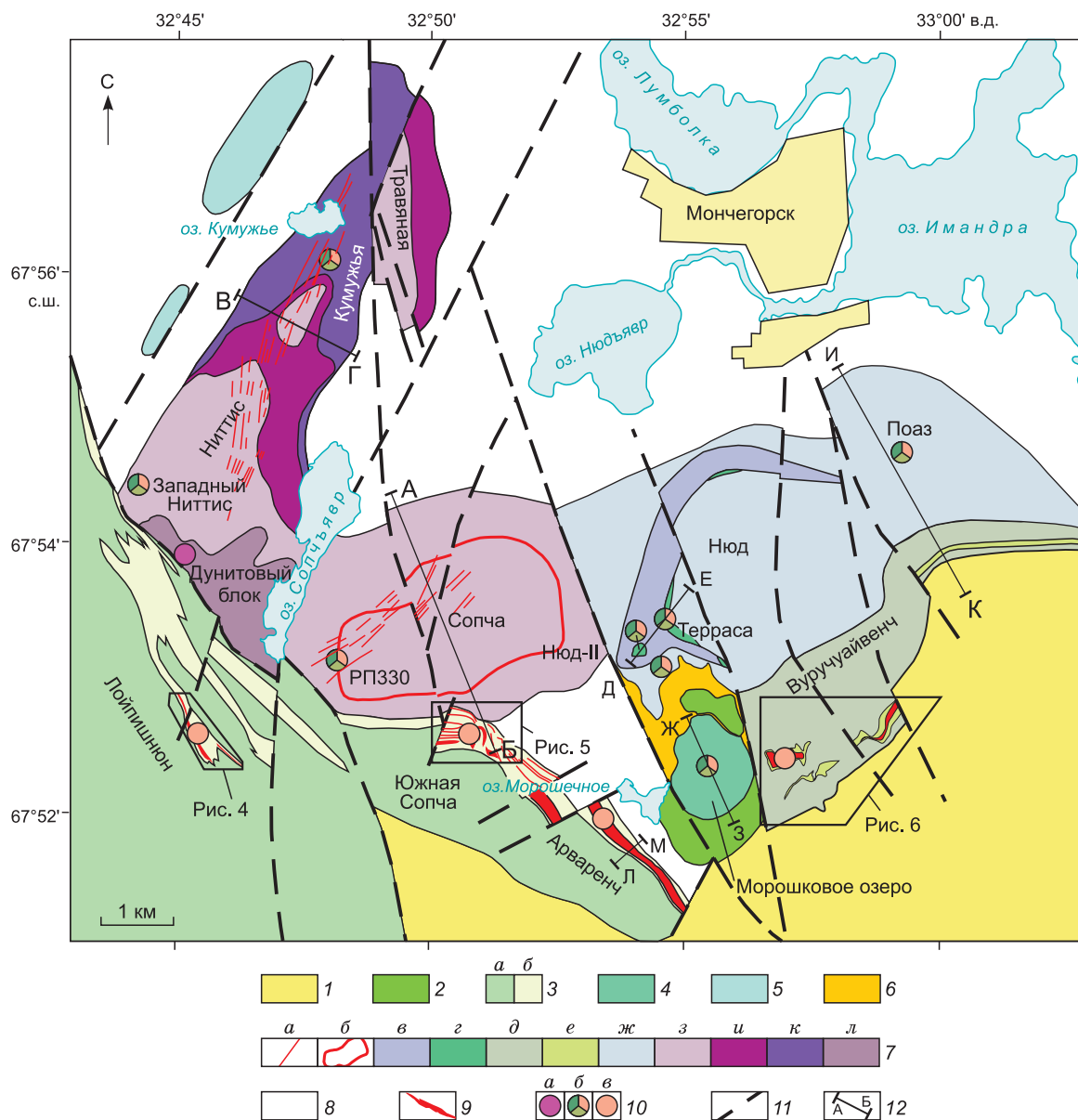


Рис. 2. Схема геологического строения Мончегорского рудного района.

1 — Имандра-Варзугская рифтогенная структура: метавулканыты, кварциты, сланцы пестрого состава, конгломераты; 2 — массив метагаббро 10-й аномалии; 3 — Мончетундровский массив: верхняя зона — метагаббро, метагаббронориты и анортозиты (а), нижняя зона — нориты и ортопироксениты (б); 4 — массив Моршечное озеро: нориты и плагиоортопироксениты; 5 — массив Кириха: габбронориты; 6 — кварцевые диориты и трондьемиты; 7 — Мончеплутон: сульфидные жилы (а), рудный пласт 330 (б), оливковый горизонт (в), «критический» горизонт (г), метагаббронориты (д), плагиоклазиты (е), нориты (ж), ортопироксениты (з), переслаивание ортопироксенитов и гарцбургитов (и), гарцбургиты (к), дуниты (л); 8 — ранне- и позднеархейские метаморфические и ультраметаморфические образования Кольской провинции; 9 — зоны сульфидной платинометалльной минерализации; 10 — месторождения и проявления: Сг руд (а), сульфидных ЭПГ-Cu-Ni руд (б), малосульфидных Pt-Pd руд (в); 11 — разрывные нарушения; 12 — линии разрезв.

но испытывавшие значительные тектонические преобразования в неоархее, раннем и позднем палеопротерозое в результате коллизии Кольской и Карельской провинций [Козлов и др., 2006; Слабунов и др., 2021].

В пределах Беломорского подвижного пояса расположены Лапландский и Кандалакшско-Колвицкий гранулитовые пояса (см. рис. 1), которые в качестве самостоятельных тектонических структур сформировались в позднем палеопротерозое (2.0—1.9 млрд лет) [Gaál, Gorbatshev, 1987; Балаганский и др., 2016]. При этом возраст их протолита, представленного, как считается [Козлов и др., 1990], основ-

ными и кислыми метавулканитами, остается неясным. Породы гранулитовых поясов метаморфизованы в условиях высоких температур (800—1000 °С) и давлений (9—12 кбар) и надвинуты на породы обрамления в юго-западном и южном направлениях [Минц и др., 1996; Балаганский и др., 2016].

В палеопротерозое в этой части Фенноскандинавского щита произошли магматические события, связанные с подъемом обширного мантийного плюма, которые привели к образованию многочисленных расслоенных интрузий, вулканогенных рифтогенных структур и дайковых роев [Шарков и др., 2000; Смолькин и др., 2009]. Фенноскандинавские расслоенные интрузии разделяются на две группы, различающиеся по возрасту и соотношению с вулканитами. Более ранние расслоенные интрузии (около 2.50 млрд лет) перекрываются вулканитами с конгломератами в основании и расположены только в пределах Кольской провинции. К этой группе относятся интрузии горы Генеральской и Улитаозерская; Мончегорский и Федорово-Панский комплексы (см. рис. 1) [Balashov et al., 1993; Amelin et al., 1995; Чашин, 1999].

Напротив, более поздние расслоенные интрузии (около 2.45 млрд лет), которые интродуцируют вулканиты рифтогенных структур, распространены гораздо шире. В основном они представлены в Карельской провинции (интрузии Торнио, Кемь, Пенникат, Нярьякяваара, Коителайнен, Аканваара и Ковдозерская; Портимо, Коиллисмаа, Олангский и Бураковско-Аганозерский комплексы) [Alapieti et al., 1990; Alapieti, Lahtinen, 2002; Смолькин и др., 2009; Maier, 2015] и в гораздо меньшей степени развиты в Кольской провинции (Имандровский комплекс) (см. рис. 1). В это же время в Беломорском подвижном поясе образовались многочисленные массивы так называемого друзитового комплекса, по особенностям состава и возраста сопоставляемые с поздними расслоенными интрузиями [Шарков и др., 2004; Криволуцкая и др., 2010].

Расслоенные интрузии двух возрастных групп различаются по полноте набора пород, степени дифференциации и рудоносности. С некоторыми из них связаны месторождения и проявления Cr, Ni, Cu, ЭПГ, Ti и V руд, которые в ряде случаев имеют важное промышленное значение. В частности, более ранняя группа рудоносных расслоенных интрузий является важнейшей составляющей Мончегорского и Федорово-Панского рудных районов.

ГЕОЛОГИЯ МОНЧЕГОРСКОГО РУДНОГО РАЙОНА

Ведущую роль в составе МРР играют Мончеплутон и Мончетундровский массив (см. рис. 2). Мончеплутон представляет большой научный и практический интерес, поскольку в нем сочетаются практически все типы месторождений, характерные для расслоенных интрузий, с не типичными для них богатыми жильными Cu-Ni рудами. Он приурочен к северо-западному замыканию Имандра-Варзугской осадочно-вулканогенной рифтогенной структуры и залегает на архейском гранитоидном фундаменте (см. рис. 2). На современном эрозионном срезе Мончеплутон имеет дугообразную форму площадью около 50 км² и состоит из двух ветвей: северо-восточной и субширотной [Горбунов и др., 1985]. Северо-восточная ветвь длиной более 7 км и шириной в средней части около 2 км представлена массивом НКТ. Субширотная ветвь протяженностью около 11 км и шириной около 3 км включает массивы Сопча, Нюд, Поаз и Вуручайвенч (см. рис. 2). По особенностям внутреннего строения Мончеплутон можно разделить на две части в ранге самостоятельных субкамер. Первая субкамера включает массивы НКТ и Сопча мощностью до 1000 и 1200 м соответственно, имеющих формы симметричных мульд с падением крыльев под углами 20—45° к их осям. Эти массивы состоят в основном из ультраосновных кумулатов и имеют сходное внутреннее строение. Их разрезы представлены (снизу—вверх): офитовыми габброноритами основания (до 100 м), норитами и ортопироксенитами краевой зоны (10—100 м), дунитами (100—700 м), развитыми только в НКТ (Дунитовый блок), гарцбургитами (100—200 м), переслаиванием гарцбургитов и ортопироксенитов (250—400 м) и ортопироксенитами (300—700 м). В средней части монотонной толщи ортопироксенитов массива Сопча залегает РП330 мощностью 4—6 м (см. рис. 2), более подробная характеристика которого приведена ниже. Вероятно, родоначальная магма ультрамафитовой субкамеры сходна по составу с высокомагнезиальными базальтами U-типа Бушвелда [Barnes, Maier, 2002].

Вторая субкамера образована массивами Нюд, Поаз и Вуручайвенч мощностью до 800, 400 и 700 м соответственно и имеет сложную форму: мульдообразную в северной части, которая сменяется на пологую пластообразную в южной. Эти массивы состоят в основном из слабодифференцированных мафитовых кумулатов — норитов и габброноритов. В основании вертикального разреза массива Нюд залегают меланонориты и плагиоортопироксениты мощностью до 300 м, которые выше по разрезу сменяются мезократовыми норитами мощностью до 350 м. В западной, северной и южной частях массива между меланократовыми и мезократовыми норитами залегает оливиновый горизонт протяженностью 6 км в виде полумесяца в плане (см. рис. 2). Он имеет субгоризонтальное залегание и мощность около 100 м. В состав оливинового горизонта входят ортопироксениты, плагиоортопироксениты и меланори-

ты с варьирующим содержанием оливина (до 30 об. %, редко больше), связанные между собой постепенными переходами и постоянно содержащие тонкораспыленную вкрапленность сульфидов. Залегание оливинового горизонта среди пород массива, нарушающее его нормальную стратиграфическую последовательность, позволяет рассматривать его в качестве более позднего относительно пород Нюда и образовавшегося из серосодержащей магмы повышенной основности. Массив Поаз сложен меланоритами-плагиоипроксенитами в его нижней части мощностью 70—150 м и нормальными норитами с подчиненными прослоями габброноритов в верхней части.

Массив Вуручайвенч расположен к югу от массивов Нюд и Поаз (см. рис. 2) и, по данным бурения, наращивает их разрез, представляя собой наиболее верхнюю часть полного разреза Мончеплутона [Гроховская и др., 2000; Расслоенные интрузии..., 2004; Рундквист и др., 2014; Karykowski et al., 2018b]. Он протягивается в северо-восточном направлении на 6 км при ширине 0.5—2.0 км. В центральной части массив имеет субгоризонтальное залегание пород, которое сменяется на юго-восточное падение под углами до 20—30° под вулканогенные образования Имандра-Варзугской рифтогенной структуры. Основной объем массива Вуручайвенч сложен монотонными мезо- и меланократовыми метагабброноритами, которые сменяются полосчатой зоной мощностью 200—240 м, представленной мезократовыми метагабброноритами с прослоями плагиоклазитов мощностью 5—50 м. В основании этой зоны залегает горизонт такситовых (от среднезернистых до пегматоидных) метагабброноритов, к верхней части которого приурочен прослой рудоносных плагиоклазитов. Разрез массива завершается лейко- и мезократовыми метагаббро и кварцевыми метагабброноритами мощностью около 50 м. Родоначальная магма мафитовой субкамеры, по-видимому, сходна по составу с толеитовым базальтом Бушвельда [Barnes, Maier, 2002].

Возраст некоторых пород Мончеплутона, полученный U-Pb методом по циркону и бадделейту, приведен в табл. 1 и укладывается в диапазон от 2508 до 2484 млн лет. Согласно геохронологическим данным, наиболее ранними породами Мончеплутона являются кварцевые нориты краевой зоны массива НКТ с возрастом 2507 ± 9 млн лет. Близкий возраст имеют метагаббронориты и плагиоклазиты массива Вуручайвенч: 2504.2 ± 8.4 и 2507.9 ± 6.6 млн лет (SHRIMP-II) соответственно (см. табл. 1), которые противоречат геологическим данным. Более вероятен возраст плагиоклазитов Вуручайвенча, равный 2494 ± 4 млн лет (см. табл. 1). Дуниты и хромовые руды Дунитового блока образовались около 2500 млн лет, а несколько позднее их — нориты массива Нюд с возрастом 2493 ± 7 млн лет (см. табл. 1), а также габбронориты массива Поаз с возрастом 2496 ± 5 (устное сообщение Т.Б. Баяновой). Более поздней интрузивной фазой являются офитовые габбронориты основания массива НКТ, возраст которых, определенный U-Pb методом по циркону (SIMS SHRIMP-II), составляет 2484.5 ± 7.9 млн лет (см. табл. 1).

Мончетундровский массив имеет форму сильно вытянутого овала в плане, ось которого, ориентированная в северо-западном направлении, погружается на юго-восток. Полная протяженность массива составляет около 30 км, ширина 2—6 км. Вертикальная мощность центральной части массива по данным глубокого структурного бурения составляет около 2 км, а его верхняя часть и кровля эродированы. В разрезе он имеет мульдообразную форму с падением трахитоидности и первичной полосчатости к ее центру. Его юго-восточное ответвление имеет собственное наименование: массив Южная Сопча (рис. 2).

Во внутреннем строении Мончетундровского массива выделяются две зоны: нижняя норит-ортопироксенитовая и верхняя лейкогаббро-габброноритовая [Расслоенные интрузии..., 2004; Чашин и др., 2020]. В общем объеме Мончетундровского массива нижняя зона составляет около 20 %. В центральной, осевой части массива ее разрез является наиболее полным и хорошо сохранившимся, достигая 450 м мощности. В основании нижней зоны залегают ортопироксениты и плагиоортопироксениты, которые выше по разрезу сменяются мезо- и меланократовыми норитами. В юго-западном крыле мульды мощность нижней зоны постепенно уменьшается до < 50 м и срезается разломом. В северо-восточном крыле мульды геологическое строение нижней зоны гораздо сложнее. В этой части Мончетундровского массива породы нижней зоны состоят из отдельных фрагментов мощностью от 1—10 до 50—250 м, представленных незакономерным чередованием ортопироксенитов и плагиоипроксенитов с мезо- и меланократовыми норитами, которые прорваны габброидами верхней зоны [Чашин и др., 2020].

Верхняя зона Мончетундровского массива составляет около 80 % от его объема при вертикальной мощности от 500 до 1400 м. Она представлена мезократовыми среднезернистыми, реже крупнозернистыми, интенсивно амфиболизированными лейкократовыми габброноритами массивной, участками трахитоидной, текстуры и крупнозернистыми лейкогаббро, реже анортозитами, обычно залегающими в верхней части разреза зоны. Иногда в них встречаются ксенолиты норитов и ортопироксенитов нижней зоны массива. Следует отметить, что в Мончеплутоне, в зоне шириной 150—400 м, примыкающей к Мончетундровскому массиву, развиты многочисленные секущие дайки пород верхней зоны Мончетундровского массива [Чашин и др., 2020].

В пределах нижней, реже верхней зон Мончетундровского массива встречаются многочисленные линзовидно-пластовые тела дунитов, реже гарцбургитов, в той или иной степени серпентинизированных, мощностью до 50 м. Они не коррелируют друг с другом по разрезу скважин и занимают различное поло-

Таблица 1. **Возрасты пород Мончеплутона и Мончетундровского массива, полученные U-Pb методом по циркону (zrn) и бадделиту (bdy)**

Массив	Порода	Возраст, млн лет	Минерал	Источник
Мончеплутон				
НКТ	Офитовый габбронорит	2484.5 ± 7.9	zrn	[Чашин, Савченко, 2021a]
	Кварцевый норит краевой зоны	2507 ± 9	»	[Расслоенные интрузии..., 2004]
Дунитовый блок	Дунит	2500 ± 10	zrn	[Чашин, Баянова, 2021]
	Хромовая руда	2500 ± 2	»	»
Нюд	Габбро-пегматит	2504.4 ± 1.5	zrn	[Amelin et al., 1995]
	»	2500 ± 5	zrn, bdy	[Расслоенные интрузии..., 2004]
	Норит	2493 ± 7	zrn	[Balashov et al., 1993]
Нюд-II	Норит рудоносный	2503 ± 8	zrn	[Чашин и др., 2016]
	Ортопироксенит	2506 ± 3	»	»
Вуручайвенч	Метагаббронорит	2497 ± 21	zrn, bdy	[Расслоенные интрузии..., 2004]
	»	2498.2 ± 6.7	bdy	»
	»	2504.2 ± 8.4	zrn	[Рундквист и др., 2014]
	Метаплагиоклазит	2507.9 ± 6.6	»	»
	Метагаббронорит	2504.3 ± 2.2	»	[Чашин и др., 2016]
	Метаплагиоклазит	2494 ± 4	»	»
Мончетундровский массив				
Лойпишнюн	Ортопироксенит	2496.3 ± 2.7	zrn	[Чашин и др., 2020]
	Норит	2500 ± 2	»	»
Южная Сопча	Метагаббро	2478 ± 20	zrn	[Чашин и др., 2016]
	Метанорит рудоносный	2504 ± 1	»	»

жение в разрезе нижней зоны. В целом эти ультрамафиты, скорее всего, являются более поздними образованиями относительно пород нижней и верхней зон Мончетундровского массива и рассматриваются как результат процесса океанизации континентальной коры Кольской провинции [Чашин, Савченко, 2021b].

Возраст ортопироксенитов и норитов нижней зоны Мончетундровского массива определен в 2496.3 ± 2.7 и 2500 ± 2 млн лет соответственно (см. табл. 1). В целом по петрогеохимическим и возрастным данным породы нижней зоны Мончетундровского массива сопоставимы с соответствующими породами Мончеплутона [Чашин и др., 2020].

Возраст крупнозернистых лейкократовых метагаббро и метагабброноритов верхней зоны Мончетундровского массива варьирует от 2476 до 2453 млн лет [Митрофанов и др., 1993; Нерович и др., 2009; Баянова и др., 2010]. Таким образом, приведенные геологические и геохронологические свидетельства указывают на многофазность Мончетундровского массива.

Более мелкие массивы базитов расположены к югу от массива Нюд (Морошковое озеро) и к северо-западу от НКТ (Кириха) (см. рис. 2). Массив Морошковое озеро округлой формы размером 1.4×1.1 км имеет вертикальную мощность, варьирующую от 75 м на севере массива до 350 м в его южной части. Он сложен в основном амфиболизированными норитами с прослоями ортопироксенитов, реже габброноритами и прорван жилами метагаббро и диоритов. Предполагается, что этот массив ранее являлся южной частью массива Нюд, но был оторван от него и смещен по тектоническим нарушениям северо-западного направления с амплитудой около 700 м.

Массив Кириха включает две интрузии. Более крупная имеет линзовидную форму в плане, вытянутую в северо-восточном направлении параллельно массиву НКТ. Ее протяженность составляет 2.5 км при ширине 650—700 м. Она сложена в основном мезократовыми габброноритами с оливиновыми разновидностями в подошве и кварцевыми феррогабброноритами в кровле. Возраст пород интрузии определен в 2502 ± 7 млн лет для оливиновых габброноритов и 2500 ± 8 млн лет для феррогабброноритов [Чашин и др., 2013].

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Содержания Pt, Pd, Ni, Cu и S, которые были использованы для расчета средних величин, приведенных в доп. материалах (<https://sibran.ru/upload/medialibrary/209/2095f0047740f1a8a67155c09a125329.pdf>)

и показанных ниже, были определены в ЗАО «Механобр Инжиниринг Аналит» (г. Санкт-Петербург) и ОАО «Иргиредмет» (г. Иркутск). В ЗАО «Механобр Инжиниринг Аналит» содержания Pt и Pd определялись пробирно-атомно-абсорбционным методом с предварительным пробирным концентрированием на никелевый штейн и атомно-абсорбционным окончанием на спектрофотометре Perkin Elmer 603 (США). Содержания Cu и Ni определялись атомно-абсорбционным методом на аналогичном приборе, сера — титриметрическим йодометрическим методом. Погрешности измерений в зависимости от диапазона содержаний составляли (отн. %): Pt и Pd — 10—30, Cu и Ni — 10—50 и S — 1—14.

В ОАО «Иргиредмет» для определения Pt и Pd использовался пробирно-эмиссионно-спектрометрический метод с предварительным пробирным концентрированием на свинцовый королек и ICP ES окончанием на эмиссионном спектрометре с индуктивно связанной плазмой IRIS Intrepid (Thermo Elemental, США), а содержания Cu и Ni — атомно-абсорбционным методом на спектрометре ICAP 7400 DUO (Thermo Fisher Scientific, США). Сера определялась также титриметрическим йодометрическим методом. Погрешности измерений в зависимости от диапазона содержаний составили (отн. %): Pt и Pd — 10—20, Cu и Ni — 10—40, S — 1—14.

Содержания всего спектра ЭПГ и Au в рудах некоторых месторождений и проявлений, использованные в данной работе, определены в ООО «Институт Гипроникель» (г. Санкт-Петербург) ICP MS методом с индуктивно связанной плазмой на масс-спектрометре iCAP 6500 RQ (Thermo Scientific, США) с предварительным пробирным концентрированием в никелевый штейн в качестве коллектора. Нижние пределы обнаружения имеют следующие величины (г/т): Pd — 0.01, Pt — 0.005, Au, Rh, Ru, Ir и Os — 0.001. Погрешности определения элементов составили (отн. %): 30 (Pd), 40 (Pt) и 60 (Au, Rh, Ru, Ir и Os).

Содержания Cu и Ni определялись в ИГГ УрО РАН (г. Екатеринбург) с помощью ICP MS анализа на квадрупольном масс-спектрометре NexION 300S (Perkin Elmer, США). Микроволновое разложение проб осуществлялось смесью кислот HCl + HNO₃ + HF с использованием системы Berghof Speedwave MWS 3+. Точность определения этих элементов контролировалась с помощью сертифицированных образцов базальта BCR-2 и андезита AGV-2 (USGS). Погрешности определения Cu и Ni составили 24 отн. %.

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СУЛЬФИДНЫХ ЭПГ-Cu-Ni И МАЛОСУЛЬФИДНЫХ Pt-Pd МЕСТОРОЖДЕНИЙ И ПРОЯВЛЕНИЙ

К сульфидному ЭПГ-Cu-Ni типу руд относятся месторождения Западный Ниттис и РП330, а также проявления НКТ, Нюд, Поаз, Моршковое озеро, Арваренч и Терраса. К малосульфидному Pt-Pd типу принадлежат месторождения Лойпишнюн, Южная Сопча и Вуручайвенч. По своей структурной позиции все месторождения и проявления делятся на два типа: базальные, локализованные в пределах нижних краевых частей интрузий, и рифовые (стратиформные) [Чашин, Митрофанов, 2014].

СУЛЬФИДНЫЕ ЭПГ-Cu-Ni МЕСТОРОЖДЕНИЯ И ПРОЯВЛЕНИЯ

Месторождение Западный Ниттис. Расположено на юго-западной оконечности массива Ниттис (см. рис. 2). Разрез массива Ниттис здесь относительно простой и представлен габброноритами и норитами краевой зоны мощностью 10—50 м и однородными ортопироксенитами в остальной части разреза массива. В состав месторождения входят два структурных типа сульфидных руд: донная залежь и жильные тела сплошных сульфидов. Донная залежь прослежена на расстоянии 800 м, приурочена к средней части краевой зоны и ориентирована параллельно контакту с вмещающими породами. Она состоит из серии сближенных пластовых рудных тел (от 1 до 3) мощностью до 16 м, в среднем около 6 м. Рудная минерализация представлена вкрапленной пентландит-халькопирит-пирротиновой ассоциацией. МПГ, по данным (О.В. Казанов, 2016 г.), характеризуются преобладанием сульфидов (брэггит) с подчиненным количеством арсенидов (палладоарсенид) и теллуrowисмутидов (котульскит и мончеит).

Жильный тип представлен постмагматической платинометалльной минерализацией жильного и прожилково-вкрапленного типа, приуроченной к зоне тектонизированных пород верхней части массива. В нем выделяются две системы сульфидных, существенно халькопиритовых жил. Первые ориентированы субвертикально, имеют невыдержанную мощность, неровные границы и иногда переходят в сульфидные шлиры. Жилы второго типа перпендикулярны к первым, формируют многочисленные тонкие жилы и прожилки с резкими ровными границами [Казанов и др., 2016]. По характеру минерализации и соотношению МПГ, Cu и Ni этот тип руды близок к ЭПГ-Cu жилам осевой части НКТ. Основным рудным минералом в составе жил представлен халькопиритом, второстепенные минералы: миллерит, пентландит и борнит. В этих жилах выявлено более 20 минералов ЭПГ и Au [Казанов и др., 2016]. Преобладающими МПГ являются станноарсениды и станныды Pd (паларстанид и атоцит), а также теллуrowисмутиды Pt и Pd (котульскит и мончеит), реже встречаются Pt-Fe сплавы (изоферроплатина), арсени-

Таблица 2. Средние содержания металлов и серы и величины некоторых геохимических параметров в сульфидных ЭПГ–Cu–Ni месторождениях и проявлениях и малосульфидных Pt–Pd месторождениях Мончегорского рудного района

Месторождения и проявления	Ni	Cu	S	Pt	Pd	Pt + Pd	Pd/Pt	Cu/Ni	Cu/Pd	(Pt + Pd)/S	(Ni + Cu) (Pt + Pd)
	мас. %			г/т							
Сульфидные ЭПГ-Cu-Ni месторождения и проявления											
Западный Ниттис ¹	0.18	0.13	0.58	0.22	1.20	1.42	5.5	0.72	1083	2.45	2183
РПЗ30 ²	0.46	0.23	0.62	0.24	0.93	1.17	3.9	0.50	2473	1.89	5897
НКТ ³	0.38	0.16	1.57	0.13	0.75	0.88	5.8	0.42	2133	0.56	6136
Нюд ³	0.29	0.24	1.11	0.11	0.73	0.84	6.6	0.83	3288	0.76	6310
Морошковое озеро ³	0.25	0.20	0.61	0.13	0.82	0.95	6.3	0.80	2439	1.56	4737
Поаз ⁴	0.17	0.13	0.39	0.13	1.11	1.24	8.5	0.76	1171	3.18	2419
Арваренч ²	0.08	0.25	0.42	0.34	1.18	1.52	3.5	3.13	2950	3.62	2171
Терраса ³											
верхний риф	0.19	0.13	0.76	0.28	1.04	1.32	3.7	0.67	1241	1.74	2444
нижний риф	0.19	0.17	0.81	0.09	0.67	0.76	7.0	0.90	2597	0.94	4794
Малосульфидные Pt-Pd месторождения											
Лойпишнюн ¹	0.08	0.09	0.23	0.47	0.79	1.26	1.7	1.13	1139	5.48	1349
Южная Сопча ²	0.11	0.10	0.27	0.33	1.09	1.42	3.3	0.91	917	5.26	1479
Вуручайвенч ²	0.18	0.25	0.39	0.35	2.71	3.06	7.7	1.39	923	7.85	1405

Примечание. Средние содержания металлов и серы, а также запасы и прогнозные ресурсы металлов в табл. 2 и 3 приведены по данным: ¹(О.В. Казанов, 2016 г.), ²(В.Н. Иванченко, 2009 г.), ³(В.Н. Иванченко, 2017 г.), ⁴(В.Н. Иванченко, 2020 г.).

Таблица 3. Запасы и ресурсы металлов в сульфидных ЭПГ–Cu–Ni месторождениях и проявлениях и малосульфидных Pt–Pd месторождениях Мончегорского рудного района

Месторождения и проявления	Ni	Cu	Pt	Pd	Pt + Pd
	тыс. т		т		
Сульфидные ЭПГ-Cu-Ni месторождения и проявления					
Западный Ниттис ¹	12	9	2	8	10
РПЗ30 ²	218	109	11	44	55
НКТ ³	298	229	19	55	74
Нюд ³	220	188	6	27	33
Морошковое озеро ³	208	172	8	37	45
Поаз ⁴	649	443	41	342	383
Арваренч ²	79	246	33	116	149
Терраса ³					
верхний риф	70	46	10	37	47
нижний риф	95	88	4	28	32
Малосульфидные Pt-Pd месторождения					
Лойпишнюн ¹	23	24	13	23	36
Южная Сопча ²	50	46	15	49	64
Вуручайвенч ²	23	31	4	34	38

ды (сперриллит и палладоарсенит), в незначительных количествах присутствуют сульфиды ЭПГ (брэггит, высокоцит, куперит и эрлихманит), плумбиды (звягинцевит), теллуриды (теларгпалит) и сульфиды (ирарсит) [Казанов и др., 2016]. Максимальные содержания полезных компонентов в этой руде составляют: Ni — 0.32 мас. %, Cu — 2.05 мас. %, Pt — 6.5 г/т, Pd — 98.8 г/т. Средние содержания полезных компонентов по месторождению приведены в табл. 2, запасы металлов — в табл. 3.

Месторождение РПЗ30 приурочено к ортопироксенитам верхней части массива Сопча (рис. 3, а). Оно представляет собой силлоподобное тело пластовой формы мощностью 4–6 м, в отдельных раздувах

до 13 м, прослеженное по данным бурения по всему периметру массива Сопча на расстояние 3.3 км при ширине до 1.8 км, залегающее под пологими углами (5–15°) к осевой части массива.

Наиболее мощный и полный разрез РП330 вскрыт в обнажениях его западной части. В обобщенном виде он представлен (снизу вверх): оливиновыми ортопироксенитами, дунитами, гарцбургитами, ортопироксенитами различной зернистости и завершается оливиновыми ортопироксенитами, аналогичными таковым в его основании. В восточном направлении разрез РП330 обычно редуцирован за счет существенного сокращения или полного выпадения дунитов и гарцбургитов, и на восточном фланге он представлен только ортопироксенитами.

Возраст крупнозернистых ортопироксенитов РП330 по циркону (SIMS SHRIMP-II) составляет 2492.5 ± 4.1 млн лет (устное сообщение С.А. Сергеева), а по изотопным Sm-Nd данным для гарцбургитов величина $\epsilon_{Nd} = -6.0 \pm 0.6$ [Чашин и др., 2016]. Эти результаты свидетельствуют о более позднем образовании РП330 относительно вмещающих ортопироксенитов массива Сопча из мантийного источника, испытавшего более значимую коровую контаминацию по сравнению с ортопироксенитами Сопчи, для которых величина ϵ_{Nd} варьирует от +1.2 до –2.3 [Расслоенные интрузии..., 2004].

Для пород РП330 характерно наличие сульфидной вкрапленности халькопирит-пентландит-пирротинового состава в количестве от редких зерен до 2–3 об. % в крупнозернистых ортопироксенитах и верхней части прослоя гарцбургитов. В подчиненном количестве присутствуют миллерит, борнит и пирит, а также оксидные рудные минералы: хромит и магнетит [Нерадовский и др., 2002; Расслоенные интрузии..., 2004]. В гарцбургитах МПГ представлены преобладающими Pt-Fe сплавами (изоферроплатина), реже арсенидами (сперриллит), теллуrowисмутитами (котульскит и мончеит), теллуридами (сопчеит и меренскиит) и висмутотеллуридами (майченерит). В крупнозернистых ортопироксенитах, напротив, преобладают теллуrowисмутиты (мончеит и котульскит), теллуриды (кейтконнит) и висмутотеллуриды (майченерит), реже встречаются арсениды (сперриллит), неназванные Pt-Fe сплавы и сульфиды (куперит) (устное сообщение С.В. Петрова). Средние содержания полезных компонентов в руде месторождения приведены в табл. 2, запасы металлов — в табл. 3. Отличительной особенностью месторождения является максимальное среди всех охарактеризованных месторождений и проявлений МРР среднее содержание Ni в руде ($Ni = 0.46$ мас. %, см. табл. 2). Наиболее высокие содержания ЭПГ (до 8.0 г/т) были отмечены в кровле прослоя крупнозернистых ортопироксенитов [Гроховская и др., 2003], которые, однако, не подтверждены более поздними работами. В результате технологических испытаний был получен концентрат с извлечением: Ni — 74 %, Cu — 86 %, Pt — 68 %, Pd — 80 %.

Проявление НКТ приурочено к породам краевой зоны массива Кумужья (см. рис. 3, б): такситовым, средне- и крупнозернистым оливиновым и безоливиновым плагиоортопироксенитам и меланоноритам, реже кварцевым норитам, залегая как непосредственно вблизи подошвы массива, так и на расстоянии 8–30 м выше ее (донная залежь). Иногда при отсутствии минерализации в ортопироксенитах она встречается в вышележащих гарцбургитах, в 10–15 м выше подошвы массива, а также в офитовых габброноритах в 30 м ниже ее. Рудная зона включает одно или два рудных тела и в целом имеет пластообразную форму, конформную неровностям подошвы массива. Ширина зоны в северной части массива составляет 900 м, в центральной части 1200 м. Ее строение весьма сложное за счет невыдержанной мощности, которая изменяется от 2–5 до 60–80 м, с раздувами и пережимами при весьма неравномерном распределении сульфидной минерализации. Сульфиды гнездово-вкрапленного типа халькопирит-пентландит-пирротинового состава присутствуют в количестве от 1 до 5 об. %. Размер их зерен, которые обычно находятся в интерстициях силикатов, изменяется от 1.0–1.5 мм до 2.0 см, а наиболее крупные гнезда зачастую содержат включения ортопироксена и оливина. МПГ, по данным (В.Н. Иванченко, 2017 г.), представлены теллуrowисмутитами (котульскит), висмутотеллуридами (мончеит и майченерит), теллуридами (меренскиит) и висмутитами (фрудит). Средние содержания полезных компонентов приведены в табл. 2, прогнозные ресурсы — в табл. 3. Максимальное содержание Ni в руде достигает 1.82 мас. %, Cu — 0.46 мас. %, Pt + Pd — 4.5 г/т. Технологические испытания по обогащению руды показали высокое качество концентрата с извлечением: Ni — 88 %, Cu — 89 %, Pt — 66 %, Pd — 87 %.

Проявление Нюд расположено в южной части массива Нюд на участке, ограниченном разрывными нарушениями северо-западного направления. Рудная зона проявления протяженностью 2.8 км и шириной до 1.3 км приурочена к нижней части разреза массива, представленной меланоноритами и плагиоортопироксенитами, и состоит из одного или двух рудных тел. Нижнее рудное тело мощностью от 4 до 12 м залегает непосредственно у подошвы массива или чуть выше ее. Верхнее рудное тело мощностью от 3 до 7 м расположено в 10–30 м выше подошвы (см. рис. 3, в).

В основном сульфидная минерализация представлена вкрапленным (1–3 об. % сульфидов) и гнездово-вкрапленным (3–5 об. % сульфидов) типами. Реже встречаются прожилки сплошных сульфидов мощностью до 15 см и зоны прожилковой сульфидной минерализации (30–40 об. % сульфидов)

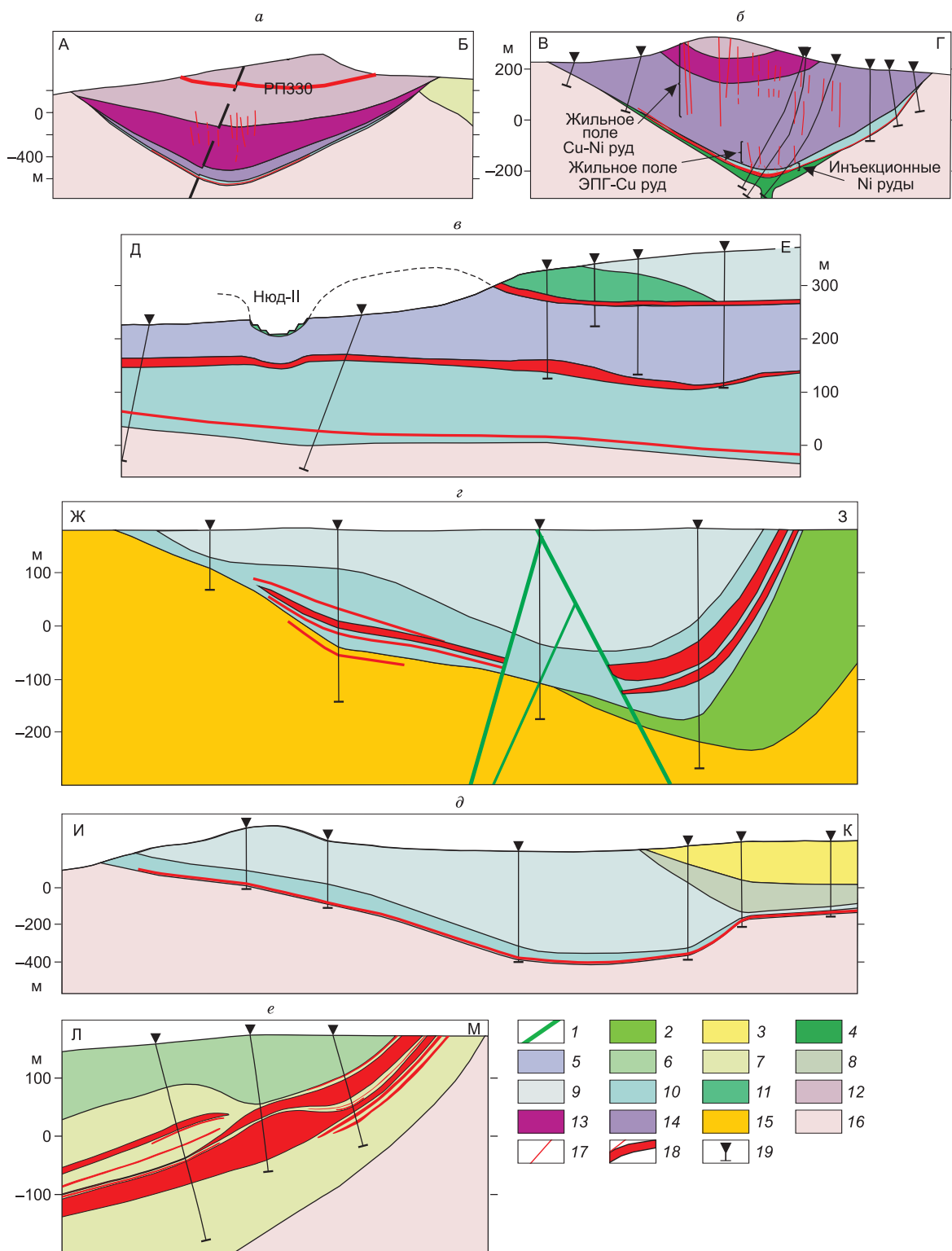


Рис. 3. Схематические геологические разрезы по линиям, которые показаны на рис. 2:

a — А—Б (массив Сопча), *б* — В—Г (массив НКТ), *в* — Д—Е (массив Нюд), *г* — Ж—З (массив Морозовское озеро), *д* — И—К (массив Поаз), *е* — Л—М (массив Арваренч).

1—16 — породы: 1 — дайки метадиоритов, 2 — кварцевое метагabbро, 3 — метавулканыты, 4 — офиотые габбронориты, 5 — оливиновый горизонт, 6 — лейкократовые метагabbро и метагabbронориты, 7 — нориты и ортопироксениты, 8 — метагabbронориты с прослоями метаплагиоклазитов, 9 — нориты мезократовые, 10 — меланонориты и плагиоортопироксениты, 11 — «критический» горизонт, 12 — ортопироксениты, 13 — переслаивание гарцбургитов и ортопироксенитов, 14 — гарцбургиты, 15 — кварцевые диориты и трондьемиты, 16 — кварцевые гнейсодиориты; 17 — сульфидные жилы; 18 — рудные зоны и тела сульфидной минерализации, 19 — буровые скважины.

мощностью около 0.5 м. Средние содержания полезных компонентов приведены в табл. 2, прогнозные ресурсы — в табл. 3. Максимальные содержания полезных компонентов в зонах с богатой сульфидной минерализацией достигают: Ni — 3.25 мас. %, Cu — 6.0 мас. %, Pt — 0.19 г/т, Pd — 2.79 г/т.

Проявление Морошковое озеро. Руда проявления локализована в нижней части одноименного массива и приурочена в основном к плагиоортопироксенитам, реже норитам, а также к зоне их переслаивания. Она характеризуется значительным вертикальным размахом в диапазоне 40—160 м, начинаясь с глубины 130 и 215 м от поверхности и заканчиваясь вблизи подошвы массива (см. рис. 3, з). Всего выделяются от двух до шести рудных тел мощностью от 1.3 до 46 м, образующих рудную зону суммарной мощностью от 14 до 77 м, в среднем около 50 м. Отмечаются два типа распределения ЭПГ по разрезу зоны. Первый тип характеризуется тем, что в нижнем и верхнем рудных телах содержание ЭПГ минимальное, тогда как в средних оно повышенное, достигая максимума в третьем снизу рудном теле. Второй тип распределения отличается максимальным содержанием ЭПГ, Ni и Cu в нижнем рудном теле и пониженными содержаниями ЭПГ в трех верхних телах, причем содержание S в них незначительное. Иногда обогащенная Cu ($Cu/Ni = 4.2$) сульфидная минерализация с содержаниями $Pt + Pd = 1.37$ г/т мощностью около 4 м встречается в подстилающих диоритах на расстоянии до 10 м от подошвы массива.

Рудная минерализация представлена мелкой сульфидной вкрапленностью в количестве 1—2 об. %, гнездово-вкрапленным типом с содержанием сульфидов до 3—5 об. %, а также шпирами, просечками и прослоями богатых брекчиевидных руд мощностью 10—30 см, содержание сульфидов в которых колеблется от 10 до 40 об. %. Максимальные содержания полезных компонентов в богатых сульфидами рудах достигают: Ni — 5.2 мас. %, Cu — 8.8 мас. %, Pt — 0.9 г/т, Pd — 8.2 г/т. Средние содержания полезных компонентов по проявлению приведены в табл. 2, прогнозные ресурсы — в табл. 3. Представляет интерес сульфидная минерализация существенно халькопиритового состава, которая встречена в крупнозернистых метагаббро к югу от массива Морошковое озеро. Мощность рудного тела здесь достигает 22.5 м при средних содержаниях: Ni — 0.09 мас. %, Cu — 0.70 мас. %, Pt — 0.13 г/т, Pd — 0.89 г/т.

Проявление Поаз. Руда проявления в основном приурочена к меланоноритам-плагиоортопироксенитам нижней части массива Поаз (см. рис. 3, д) и локализована в рудной зоне мощностью от 10 до 50 м, прослеженной в широтном направлении на 2.4 км и в меридиональном — на 2.7 км. В составе рудной зоны выделяются от одного до трех рудных тел. Нижнее рудное тело обычно приурочено к подошве массива, реже находится в 10—15 м выше ее. Два верхних рудных тела залегают в 20—50 м выше подошвы. Мощность рудных тел невыдержанная с пережимами и раздувами, варьирует от 2 до 30 м, в среднем составляет около 6 м.

Сульфидная минерализация в руде имеет пирит-пентландит-халькопирит-пирротиновый состав и встречается в виде мелкой вкрапленности, реже гнезд в количестве от 1 до 5 об. %. В составе МПГ, по данным (В.Н. Иванченко, 2020 г.), преобладают теллурувисмутиты (котульскит и мончеит), теллуриды (меренскиит), висмутиты (фрудит и соболевскит), висмутотеллуриды (майченерит) и висмутаантимониды (инсизваит), менее распространены станниды Pd (паоловит и атокит) и арсениды (сперриллит и палладоарсенит). В резко подчиненном количестве присутствуют Pt-Fe сплавы (изоферроплатина) и плюмбиды Pd (звягинцевит). Средние содержания полезных компонентов приведены в табл. 2, прогнозные ресурсы — в табл. 3. Технологические испытания показали возможность получения высококачественного концентрата с извлечением: Ni — 69 %, Cu — 89 %, Pt — 72 %, Pd — 84 %.

Проявление Арваренч находится на юго-восточном продолжении месторождения Южная Сопча (см. рис. 2) и приурочено к норитам и плагиоортопироксенитам нижней зоны массива Южная Сопча, прорванных жилами крупнозернистых габбро и габброноритов верхней зоны. Оно представлено несколькими сближенными рудными телами сульфидной вкрапленности мощностью от 6 до 40 м, объединенными в пластообразную рудную зону суммарной мощностью около 70 м (см. рис. 3, е). Ее внутреннее строение и морфология весьма сложные за счет чередования рудных и безрудных участков, раздувов и пережимов. Простирается рудная зона северо-западное ($310\text{—}320^\circ$), падение юго-западное под углом $15\text{—}20^\circ$. Ее протяженность по простиранию составляет 3 км, по падению она прослежена на 280—500 м. Средние содержания полезных компонентов в руде приведены в табл. 2, прогнозные ресурсы — в табл. 3. Отличительной особенностью проявления является значительное преобладание Cu над Ni ($Cu/Ni = 3.13$) и максимальное среднее содержание ($Pt + Pd$) = 1.52 г/т (см. табл. 2) среди рассмотренных ЭПГ-Cu-Ni месторождений и проявлений МРР.

Проявление Терраса расположено в западной части массива Нюд (см. рис. 2), пространственно ассоциирует с оливиновым горизонтом мощностью 100—120 м и состоит из двух рудных тел рифового типа. На площади проявления находится также небольшое отработанное в 70-х годах прошлого века сульфидное ЭПГ-Cu-Ni месторождение Нюд-II (см. рис. 3, в) [Чашин и др., 2021].

Верхний риф приурочен к кровле оливиновых ортопироксенитов на контакте их с габброноритами «критического» горизонта мощностью до 70—80 м, который маркируется маломощным прослоем тонкозернистых плагиоклаз-пироксеновых роговиков. Выше «критического» горизонта залегают нор-

мальные мезократовые нориты массива Нюд (см. рис. 3, в). Верхний риф имеет форму пологозалегающего пласта протяженностью около 600 м и средней мощностью около 10 м, который постепенно выклинивается в восточном направлении. Он сложен в основном оливиновыми клинопироксен- и плагиоклазсодержащими ортопироксенитами.

Нижний риф приурочен к экзоконтакту оливинового горизонта и залегает среди меланократовых пойкилитовых норитов нижней зоны массива Нюд (см. рис. 3, в). Он имеет протяженность около 1.5 км и переменную мощность, максимальную до 20 м в западной части рифа, которая постепенно снижается в восточном направлении, составляя в среднем около 10 м. Сульфидная минерализация в обоих рифах присутствует в количестве 1—3 об. % в виде мелкой или средней по размерам вкрапленности, реже образует гнезда размером 1—5 см. Главными рудными минералами являются пирротин, пентландит и халькопирит, второстепенные минералы представлены пиритом, титаномagnetитом, ильменитом и хромитом. Составы МПГ в двух рифах близки между собой и представлены теллуридами (меренскиит), теллуrowисмутидами (мончеит и котульскит), висмутотеллуридами (майченерит) и висмутидами (соболевскит) (устные сообщения С.В. Петрова и Е.Э. Савченко). Средние содержания полезных компонентов по каждому рифу приведены в табл. 2, прогнозные ресурсы — в табл. 3.

МАЛОСУЛЬФИДНЫЕ Pt-Pd МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Отличительным признаком малосульфидных Pt-Pd месторождений является обогащение ЭПГ относительно сульфидной массы при подчиненной роли Ni и Cu [Служеникин и др., 1994; Додин и др., 2000; Налдретт, 2003; Green, Peck, 2005; Шарков, 2006; Naldrett, 2010; Sluzhenikin et al., 2020]. Следует отметить, что месторождения малосульфидных Pt-Pd руд относятся к важнейшему геолого-промышленному типу, к которому также принадлежат и ведущие мировые платинометаллальные месторождения, такие как риф Меренского Бушвельда (ЮАР), J-M риф Стиллаутера (США) и Главная сульфидная зона Великой Дайки (Зимбабве), поставляющие основную долю платиновых металлов на мировой рынок.

Месторождение Лойпишнюн находится в северо-восточной части Мончегундровского массива, вблизи зоны сочленения его с массивом НКТ Мончеплутона (см. рис. 2), и приурочено к нижней норит-ортопироксенитовой зоне массива, располагаясь в основном в ее висячем боку вблизи контакта с вышележащими габброидами (рис. 4). На месторождении выделены две рудные зоны. Рудная зона 1 мощностью от 10—15 до 120 м прослежена на протяжении около 1.5 км в северо-западном направлении. Она имеет сложное строение за счет чередования раздувов мощностью 90—120 м и протяженностью до 100 м с пережимами мощностью 15 м или полным выклиниванием руды (см. рис. 4). По падению на протяжении 100—150 м мощность рудной зоны обычно уменьшается с расщеплением отдельных рудных тел на маломощные прослои и линзы, сопровождаясь снижением содержаний ЭПГ. Эта рудная зона включает от 2 до 9 отдельных рудных тел линзовидно-пластовой формы мощностью от 0.5 до 25.0 м. Зачастую рудные тела прорваны ультраосновными породами, дайками крупнозернистых габброидов и метадолеритов, а также смещаются вдоль тектонических зон (см. рис. 4) [Чашин и др., 2018].

Рудная зона 2 мощностью 5—35 м прослежена на протяжении 550 м и на северо-западном фланге срезается разломом субмеридионального направления (см. рис. 4). Она характеризуется довольно выдержанным залеганием, но неравномерным распределением сульфидной минерализации, которое заключается в чередовании бедной минерализации мощностью 2—10 м с рядовой мощностью 3—15 м, линзами богатых руд и безрудными прослоями мощностью 0.5—2.5 м [Чашин и др., 2018].

Сульфидная минерализация представлена преимущественно мелкой вкрапленностью в количестве около 1—2 об. %, иногда более густой вкрапленностью (3—5 об. %), реже прожилково-гнездовыми агрегатами пирротина, пентландита и халькопирита. Кроме них присутствуют более поздние сульфиды: пирит, борнит, халькозин, кубанит и макинавит, в редких случаях встречаются галенит и сфалерит, оксиды представлены магнетитом, ильменитом и рутилом [Чашин и др., 2018].

В руде обнаружено 45 МПГ, среди которых ведущую роль играют сульфиды (куперит, брэггит и высокоцит), теллуrowисмутиды (мончеит и котульскит), теллуриды (кейтконнит, теларгпалит и теллуropалладинит), Pt-Fe сплавы (изоферроплатина) и арсениды (сперриллит, палладоарсенид, стиллаутерит и атенеит). В подчиненном количестве развиты соединения платиноидов и меди (скаергардит и хонгшиит), самородный палладий, станниды (станнопалладинит) и плюмбиды (звягинцевит) [Чашин и др., 2018]. Средние содержания полезных компонентов по месторождению приведены в табл. 2, запасы — в табл. 3.

Месторождение Южная Сопча расположено в северо-восточной части одноименного массива, в зоне, примыкающей к массиву Сопча Мончеплутона (см. рис. 2). Оно приурочено к чередованию такситовых норитов и ортопироксенитов нижней зоны массива мощностью 150—200 м и развито главным образом в норитах, реже ортопироксенитах. Рудная зона месторождения имеет протяженность около 1 км при ширине от 100 до 500 м. В пределах рудной зоны встречается около 20 рудных тел пласто-

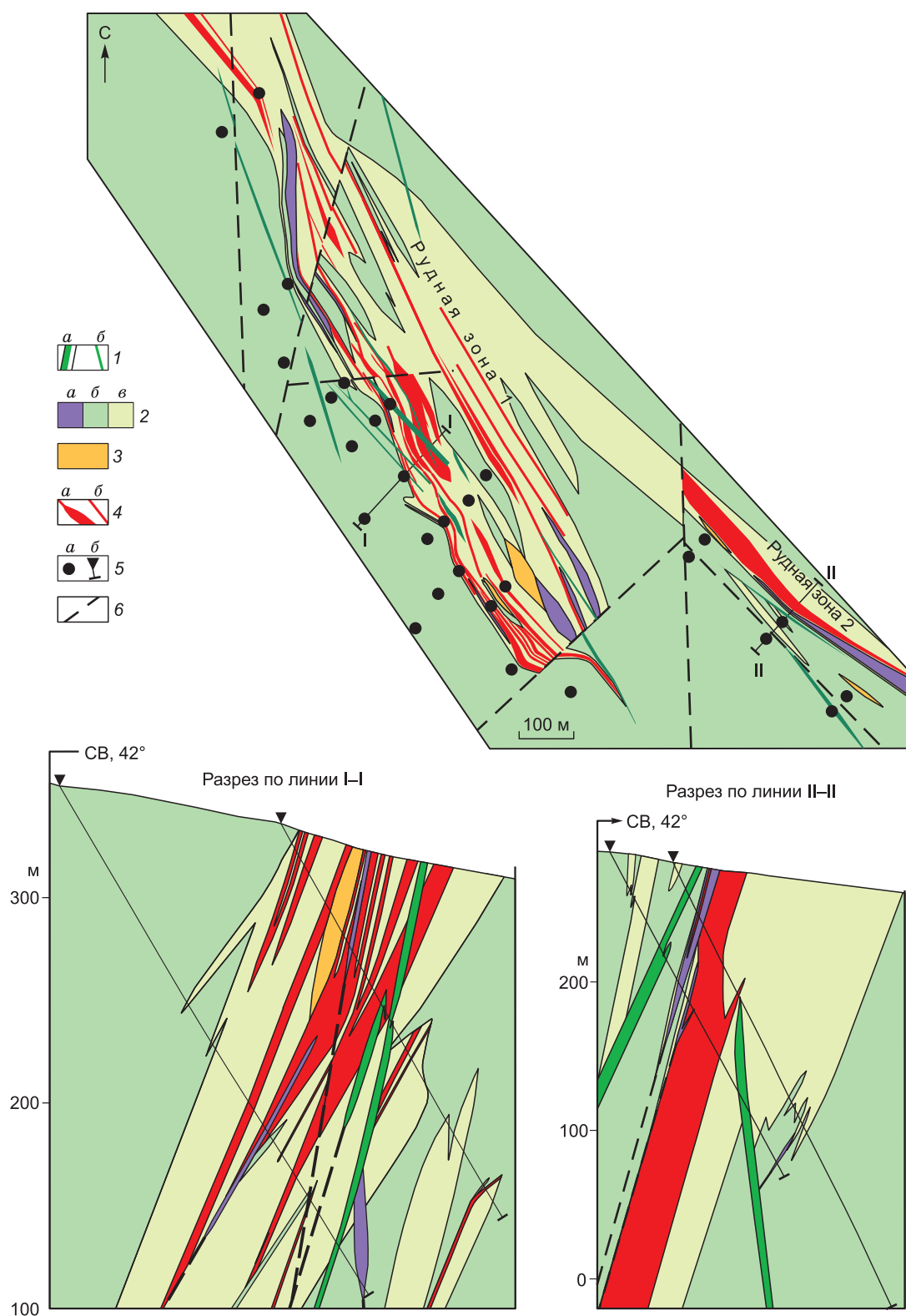


Рис. 4. Схема геологического строения малосульфидного платинометалльного месторождения Лойпишнюн с разрезами по линиям I—I и II—II, по [Чашин и др., 2018].

1 — дайки метадолеритов (а), то же самое вне масштаба (б); 2 — Мончегундровский массив: дуниты и гарцбургиты (а), метагаббронориты и лейкократовые метагаббро средне- и крупнозернистые (б), ортопироксениты и меланонориты (в); 3 — гнейсы ставролит-гранат-биотитовые; 4 — малосульфидная платинометалльная руда (а), то же самое вне масштаба (б); 5 — буровые скважины (а), то же самое на разрезах (б); 6 — разрывные нарушения.

образной и линзовидно-уплощенной формы. Прослеженная длина рудных тел по падению составляет 100—500 м, мощность варьирует от 1 до 78 м, составляя в среднем 5—30 м (рис. 5). В западной части месторождения рудные тела срезаются разрывным нарушением северо-восточного простирания. В центральной части месторождения они смяты в системы синформных складок с размахом крыльев около 300 м и вертикальной амплитудой около 90 м.

В норитах сульфидная минерализация встречается в виде вкрапленности, гнезд и тонких просечек миллерит-борнит-пирротин-халькопиритового состава в количестве 2—5 об. %. В ортопироксенитах она представлена мелкой вкрапленностью пентландит-пирротин-халькопиритового состава в количестве 1—2 об. %. Состав МПГ характеризуется видовым разнообразием с широким развитием арсенидов (сперрилит, палладоарсенид, стиллуотерит, арсенопалладинит и изомертит), а также теллуровисмутидов (мончит и котульскит). В меньшей степени распространены сульфиды (куперит и брэггит), станниды (атокит и рустенбургит) и интерметаллиды [Гроховская и др., 2012]. Средние содержания полезных компонентов в руде месторождения приведены в табл. 2, запасы — в табл. 3.

Месторождение Вуручайвенч имеет отчетливо выраженный стратиформный характер и приурочено к горизонту сосюритизированных плагиоклазитов. Рудная зона месторождения протяженностью около 2 км включает несколько рудных тел пластообразной и линзовидной формы мощностью 3—6 м и протяженностью до 300—500 м, которые залегают субсогласно границам плагиоклазитов [Гроховская и др., 2000]. Иногда рудные тела осложнены раздувами мощностью около 20 м, которые сопровождаются серией линзовидных апофиз мощностью 2—3 м. В западной и восточной частях месторождения рудная зона имеет субгоризонтальное залегание размерами (60—240) × 600 м и (30—70) × 650 м соответственно (рис. 6). Прослеженная длина рудной зоны по падению составляет 1200 м с тенденцией к выполаживанию.

Платинометалльная минерализация месторождения тесно ассоциирует с сульфидной вкрапленностью, которая распределена неравномерно: от единичных гнездовых скоплений размером 1—2 мм с содержанием сульфидов около 1 об. % до гнездовой вкрапленности размером 1—5 мм в количестве 2—3 об. %, реже гнездово-шпировых скоплений сульфидов в количестве 5—10 об. %. Сульфиды представлены в основном халькопиритом (40—90 об. %) и миллеритом (10—50 об. %), с подчиненным количеством пирротина, пентландита, ковеллина, халькозина и пирита. Кроме того, присутствуют сульфид-арсениды никеля (герсдорфит) и кобальта (кобальтин), сфалерит и галенит. Такое разнообразие рудных парагенезисов характеризует постмагматическую стадию рудообразования [Гроховская и др., 2000]. МПГ представлены теллуровисмутидами (котульскит), теллуридами (меренскиит), висмутотеллуридами (майченерит), висмутидами (соболевскит), арсенидами (сперрилит, гуанглинит и маякит) и сульфид-арсенидами (холлингвортит, ирарсит и платарсит) [Гроховская и др., 2000]. Месторождение Вуручайвенч характеризуется максимальными средними содержаниями Pt + Pd среди всех платинометалльных месторождений и проявлений МРР (см. табл. 2). Средние содержания полезных компонентов в руде

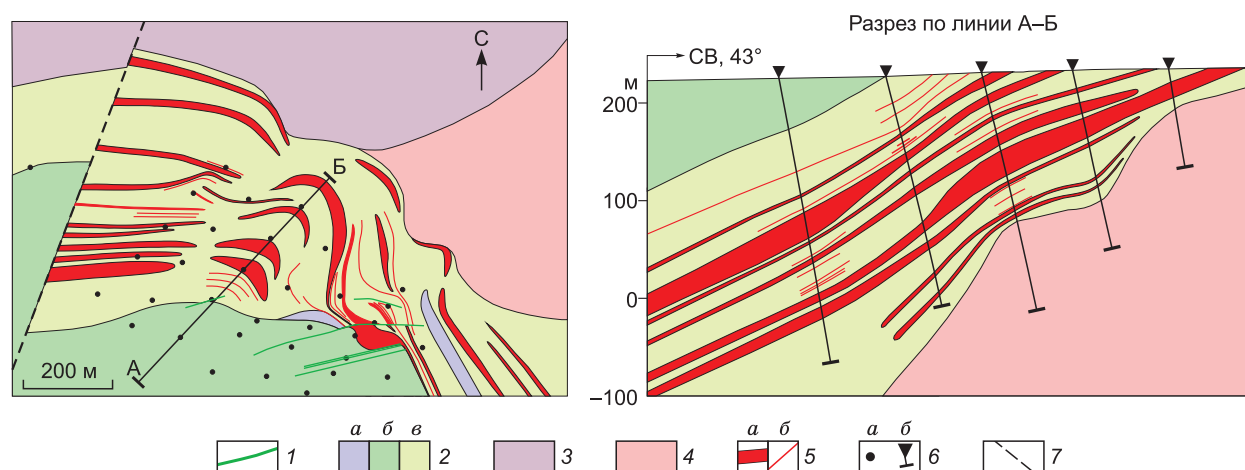


Рис. 5. Схема геологического строения малосульфидного платинометалльного месторождения Южная Сопча и разрез по линии А—Б, по (В.Н. Иванченко, 2009 г.).

1 — дайки метадолеритов; 2 — массив Южная Сопча: метапироксениты (таляк-хлорит-амфиболовые сланцы) (а), метагаббро и метагаббронориты (б), ортопироксениты и меланонориты (в); 3 — массив Сопча: ортопироксениты; 4 — диориты; 5 — малосульфидная платинометалльная руда (а), то же, вне масштаба (б); 6 — буровые скважины (а), то же, на разрезе (б); 7 — разрывные нарушения.

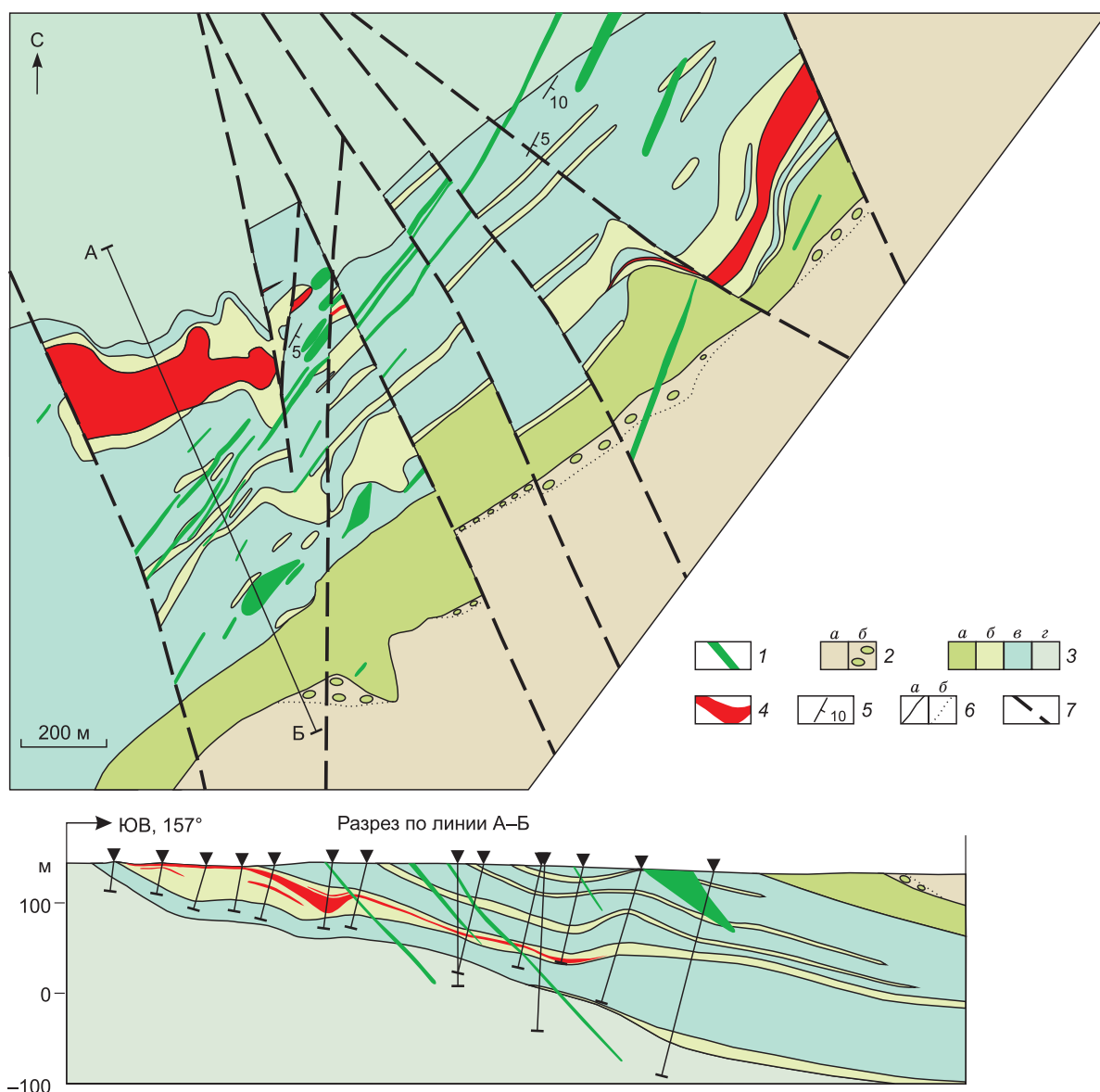


Рис. 6. Схема геологического строения малосульфидного платинометалльного месторождения Вуручуайвенч и разрез по линии А—Б, модифицировано с использованием материалов (В.Н. Иванченко, 2009 г.).

1 — дайки метадолеритов; 2 — Имандра-Варзугская рифтогенная структура: метабазальты (а), полимиктовые базальные конгломераты (б); 3 — массив Вуручуайвенч: лейко- и мезократовые метагаббро и кварцевые метагаббронориты (а), плагиоклазиты сосюритизированные (б), мезократовые метагаббронориты (в), мезо- и меланократовые метагаббронориты (г); 4 — платинометалльная руда; 5 — элементы залегания; 6 — геологические границы: достоверные (а), фациальные (б); 7 — разрывные нарушения.

приведены в табл. 2, запасы — в табл. 3. В результате технологических испытаний получен высококачественный концентрат при извлечении: Ni — 78 %, Cu — 90 %, Pt — 65 %, Pd — 88 %.

На рисунке 7 представлена обобщенная модель условий локализации разных типов платинометалльных руд МРР. Она демонстрирует закономерный характер размещения платинометалльных руд в результате рудно-магматической эволюции ультрамафитовой и мафитовой субкамер. Характерно, что в каждой из них присутствуют месторождения и проявления базального типа в основаниях субкамер и рифового типа в верхней части. По этому признаку платинометалльные месторождения МРР сходны с положением аналогичных месторождений в структуре расслоенного комплекса Портимо, Финляндия [Pijina et al., 2015], но отличаются от таковых Федорово-Панского рудного района, месторождения базального и рифового типа которого приурочены к разным массивам: Федорово-Тундровскому и Западно-Панскому соответственно [Groshev et al., 2019].

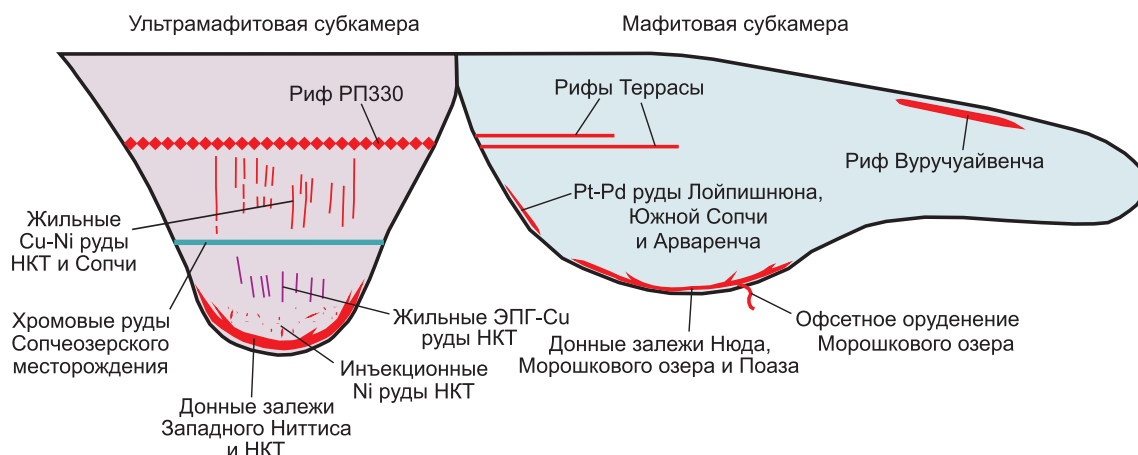


Рис. 7. Модель локализации сульфидных ЭПГ-Cu-Ni и малосульфидных Pt-Pd руд в расслоенных интрузиях Мончегорского рудного района.

ГЕОХИМИЯ ХАЛЬКОФИЛЬНЫХ И СИДЕРОФИЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Наличие двух типов платинометалльных месторождений в МРР обуславливает необходимость в числовых критериях различия их между собой. Одним из них является величина относительной концентрации ЭПГ, которая, согласно [Служеникин и др., 1994], рассчитывается как сумма ЭПГ (г/т)/S (мас. %) и для малосульфидных Pt-Pd месторождений она составляет ≥ 4 , отражая обогащение ЭПГ относительно сульфидной массы. Мы дополнили этот показатель величиной $(Ni + Cu)/(Pt + Pd)$, которая для малосульфидных Pt-Pd руд составляет < 2000 , а для сульфидных ЭПГ-Cu-Ni руд > 2000 . Совместное использование обеих величин позволяет надежно разбраковать сульфидный и малосульфидный типы платинометалльных месторождений, что продемонстрировано на рис. 8. На нем все типы платинометалльных руд МРР разделяются на три кластера. Первый кластер представлен малосульфидными Pt-Pd месторождениями (Лойпишнюн, Южная Сопча и Вуручайвенч), а также платинометалльным оруденением рифового типа интрузии Пеникат, Финляндия [Alapieti, Lahtinen, 2002]. Второй кластер включает сульфидные ЭПГ-Cu-Ni месторождения и проявления (НКТ, РП330, Морошковое озеро, Нюд и нижний риф Террасы). Третий кластер является переходным между первыми двумя, и его представители (Западный Ниттис, Поаз, Арваренч и верхний риф Террасы) имеют признаки как малосульфидных, так и сульфидных месторождений (см. рис. 8).

Средневзвешенные содержания халькофильных и сидерофильных элементов по рудным телам сульфидных ЭПГ-Cu-Ni и малосульфидных Pt-Pd месторождений и проявлений, при условии $(Pt + Pd) \geq 0.5$ г/т, приведены в дополнительных материалах, а их соотношения показаны на рис. 9 и 10. Для сульфидных ЭПГ-Cu-Ni месторождений и проявлений характерна в целом значимая положительная корреляция между Ni и S, наиболее высокая для проявления Морошковое озеро, при этом фигуративные точки большинства из них укладываются в единый тренд (см. рис. 9, а). Исключение составляет месторождение РП330, фигуративные точки которого расположены выше общего тренда за счет более высоких содержаний Ni в руде (см. рис. 9, а), присутствующего, по-видимому, как в сульфидной, так и силикатной форме. Наиболее высокая корреляционная связь между Cu и S определена для месторождения Западный Ниттис, менее значимая — для проявления Морошковое озеро, а для остальных месторождений и проявлений она отсутствует (см. рис. 9, б). В основном корреляция между содержаниями $(Pt + Pd)$ и S, а также Ni отсутствует (см. рис. 9, в, г), за исключением месторождения Западный Ниттис, для которого выявлена высокая положительная корреляция $(Pt + Pd)$ с S и Ni (см. рис. 9, в, г). Для некоторых месторождений и проявлений определена корреляционная зависимость между $(Pt + Pd)$ и Cu: высокая для месторождения Западный Ниттис, более слабая для проявления Арваренч и месторождения РП330 (см. рис. 9, д). В целом между содержаниями Pt и Pd существует положительная корреляционная зависимость, за исключением месторождения РП330 и проявления Ньюда (см. рис. 9, е).

Малосульфидные Pt-Pd месторождения Вуручайвенч и Южная Сопча имеют отчетливые корреляционные связи содержаний Ni с S (см. рис. 10, а), а Вуручайвенч и Лойпишнюн — более слабые корреляционные связи между Cu и S (см. рис. 10, б). Корреляционная зависимость между содержаниями $(Pt + Pd)$ и S во всех малосульфидных месторождениях отсутствует (см. рис. 10, в), а с Ni и Cu высокая корреляция определена только для месторождения Вуручайвенч (см. рис. 10, г, д). Между содержания-

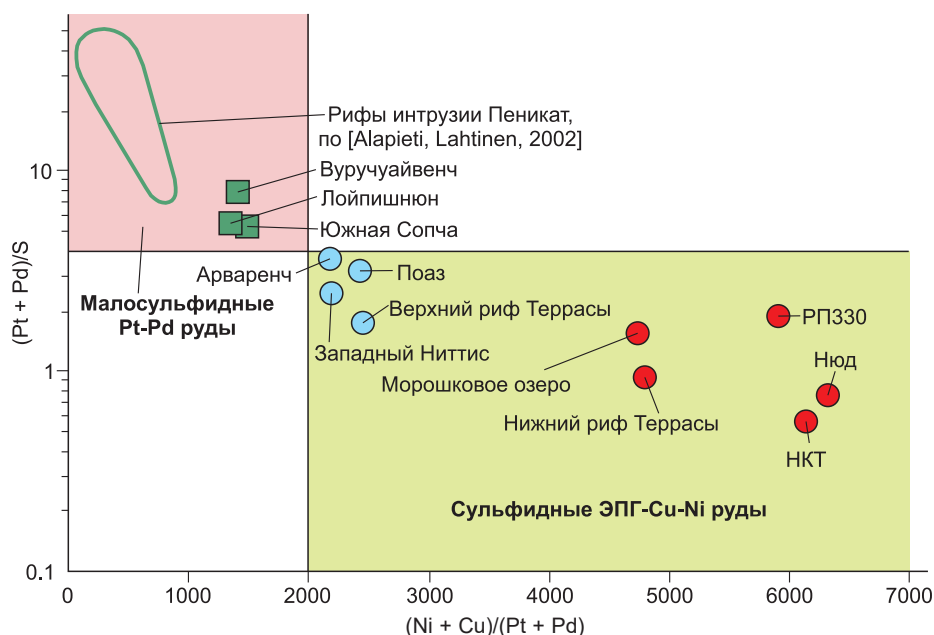


Рис. 8. Классификационная диаграмма $(Pt + Pd) \text{ (г/т)/S (мас. \%)} — (Ni + Cu)/(Pt + Pd)$ для сульфидных ЭПГ-Cu-Ni и малосульфидных Pt-Pd месторождений и проявлений Мончегорского рудного района.

ми Pt и Pd положительная корреляционная связь проявлена во всех малосульфидных Pt-Pd месторождениях, а наиболее высокая установлена для месторождения Вуручайвенч (см. рис. 10, е).

Содержание полного спектра ЭПГ, а также Ni, Cu и Au в некоторых сульфидных ЭПГ-Cu-Ni проявлениях и малосульфидных Pt-Pd месторождениях приведено в табл. 4, а их распределение показано на рис. 11. Для всех изученных месторождений и проявлений характерно весьма значимое фракционирование РЭПГ (Pt, Pd, Rh) относительно ИЭПГ (Os, Ir, Ru), наиболее высокое — в месторождении Вуручайвенч (см. табл. 4). Особенностью спектра ЭПГ в ЭПГ-Cu-Ni рудах является изрезанный характер графиков за счет положительных аномалий Ir и Rh и отрицательных — Ru (см. рис. 11, а). Положительные аномалии Ir и Rh при отсутствии собственных минеральных фаз могут быть объяснены присутствием их в качестве изоморфной примеси в пентландите, как это было установлено для комплекса Бушвельд [Junge et al., 2015].

Графики распределения ЭПГ в малосульфидных месторождениях Южная Сопча и Вуручайвенч имеют такой же характер, что и в сульфидных месторождениях, как отмечалось ранее в работе [Karykowski et al., 2018b]. Заметно отличается от них месторождение Лойпишнюн менее изрезанным графиком за счет слабовыраженной положительной аномалии Rh (см. рис. 11, б).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Генетические аспекты образования месторождений МРР

Общепризнанной является концепция о магматогенной природе сульфидных Cu-Ni месторождений, образованных в результате ликвации несмешивающейся сульфидной жидкости в процессе охлаждения насыщенной серой основной и ультраосновной магмы. Важную роль в насыщении расплава серой могла играть, как считается [Шарков, Богатиков, 1998; Hutchinson, McDonald, 2008; Naldrett, 2010; Sharman et al., 2013], контаминация базитовой магмой коровых пород, которая способствует увеличению предела насыщения расплавов сульфидной серой. Эта концепция вполне применима и к сульфидным ЭПГ-Cu-Ni месторождениям и проявлениям МРР. При этом механизмы образования руд базального и рифового типов имеют свои особенности.

В сульфидных ЭПГ-Cu-Ni рудах Мончеплутона базального типа рудные тела приурочены к нижним частям интрузий и зачастую пространственно сопряжены с измененными породами (метаноритами и метаортопироксенитами), что указывает на локальное добавление воды к магме в результате частичного плавления фундамента, по мнению [Karykowski et al., 2018a]. В то же время этот процесс может привести и к разбавлению ранее существовавшего богатого ЭПГ сульфидного расплава [Hutchinson,

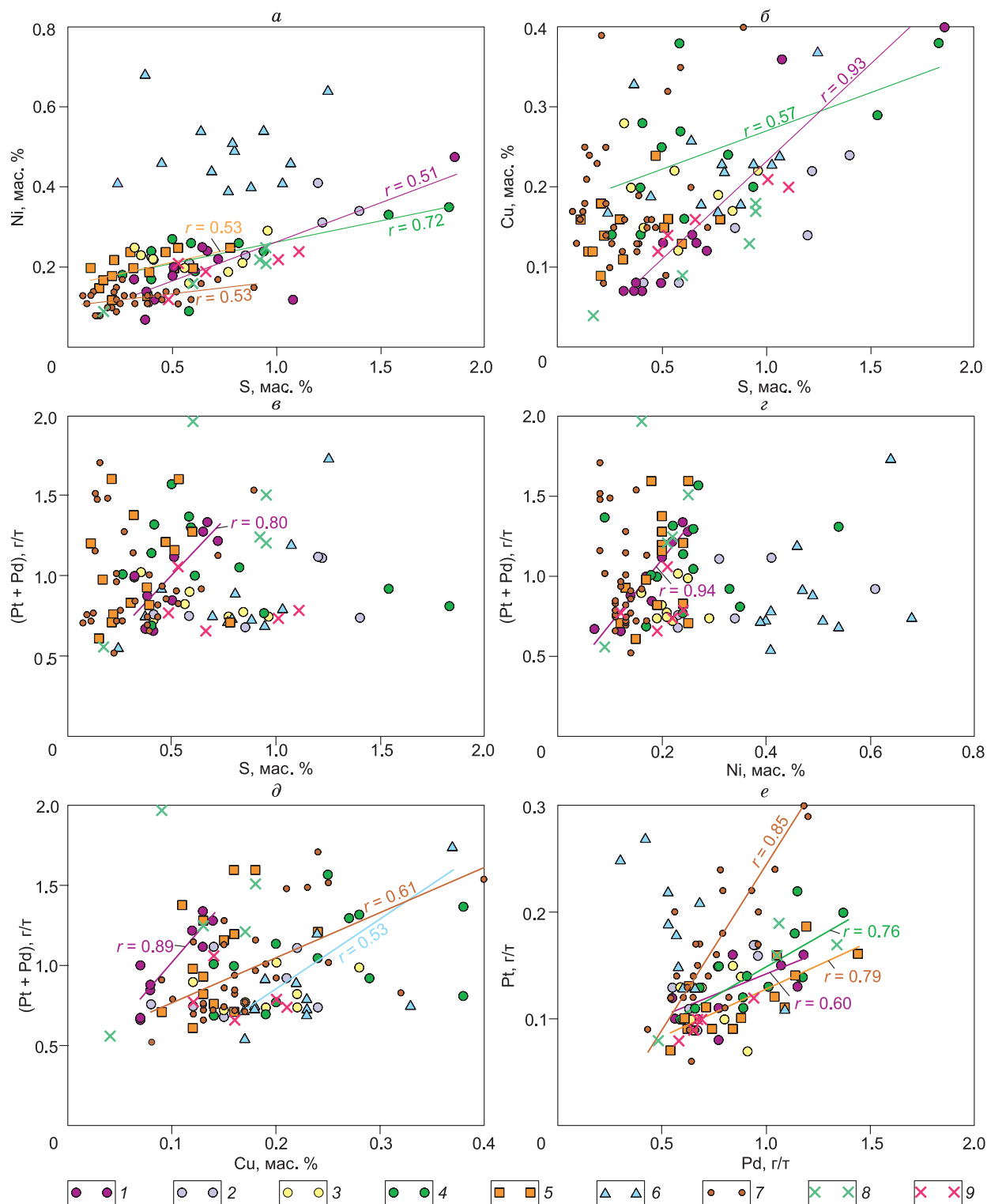


Рис. 9. Бинарные вариационные диаграммы халькофильных и сидерофильных элементов для средних составов сульфидных ЭПГ-Cu-Ni руд по рудным пересечениям: Ni—S (a), Cu—S (б), (Pt + Pd)—S (в), (Pt + Pd)—Ni (г), (Pt + Pd)—Cu (д), Pt—Pd (е).

1—9 — месторождения и проявления: 1 — Западный Ниттис, 2 — НКТ, 3 — Нюд, 4 — Моршковое озеро, 5 — Поаз, 6 — РП330, 7 — Арваренч, 8, 9 — Терраса: 8 — верхний риф, 9 — нижний риф. Здесь и на рис. 10 — линии трендов и значимые величины коэффициентов корреляции (r) соответствуют цвету точек составов месторождений и проявлений.

Таблица 4. Содержания ЭПГ, Au, Ni и Cu (г/т) в некоторых сульфидных ЭПГ-Cu-Ni проявлениях и малосульфидных Pt-Pd месторождениях Мончегорского рудного района

Компо- нент	Верхний риф Террасы				Нижний риф Террасы				Южная Сопка						Вуручайвенч				
	425/1	425/2	425/3	425/4	Сред- нее	C-23/77.1	C-23/79.3	C-23/80.3	C-23/82.7	Сред- нее	C-4391/ 123.8	C-4391/ 141.7	C-4391/ 143.7	C-4391/ 153.5	C-4391/ 225.4	Среднее	419	419/1	Среднее
Os	0.002	0.001	0.002	0.001	0.002	0.0008	0.0005	0.0009	0.0004	0.001	0.004	0.008	0.005	0.001	0.001	0.004	0.003	0.001	0.002
Ir	0.007	0.007	0.008	0.004	0.007	0.007	0.004	0.005	0.005	0.005	0.013	0.030	0.028	0.003	0.006	0.016	0.012	0.004	0.008
Ru	0.007	0.006	0.008	0.009	0.008	0.004	0.002	0.004	0.004	0.004	0.006	0.015	0.014	0.002	0.002	0.008	0.007	0.002	0.004
RRh	0.071	0.049	0.057	0.025	0.051	0.061	0.026	0.035	0.033	0.039	0.053	0.125	0.107	0.015	0.024	0.065	0.119	0.036	0.078
Pt	0.19	0.16	0.17	0.86	0.35	0.17	0.08	0.10	0.11	0.12	0.68	1.63	1.06	0.10	0.48	0.79	0.64	0.25	0.45
Pd	1.06	1.05	1.34	1.11	1.14	1.21	0.62	0.76	0.77	0.84	1.76	3.40	2.25	0.35	0.89	1.73	5.49	2.07	3.78
Сумма ЭПГ	1.337	1.273	1.585	2.009	1.551	1.450	0.736	0.908	0.919	1.003	2.517	5.208	3.464	0.472	1.401	2.613	6.274	2.364	4.319
ΣРЭПГ/ ΣЭПГ	83	90	87	143	99	122	112	91	97	106	109	97	72	86	148	94	287	363	325
Au	0.066	0.081	0.104	0.066	0.079	0.066	0.028	0.034	0.040	0.042	0.168	0.186	0.086	0.135	0.148	0.145	0.300	0.019	0.160
Ni	2190	2060	2460	1600	2078	2700	1800	2100	2800	2350	800	3200	700	500	800	1200	3200	800	2000
Cu	1340	1650	1820	940	1438	2100	1700	1800	2200	1950	2800	4900	800	1400	1500	2280	4900	1900	3400

McDonald, 2008; Sharman et al., 2013]. При относительно невысоких содержаниях Ni, Cu и S в исходной магме локализация сульфидной жидкости обусловлена сегрегацией обогащенных ЭПГ сульфидных капель, которые росли, соединялись между собой в более крупные капли, реже гнезда и под действием силы тяжести опускались в нижнюю часть магматической камеры [Godel, 2015]. При последующем отделении они могут концентрироваться с образованием слоев и линз, богатых сульфидами. В некоторых случаях (проявление Моршковое озеро) происходило фракционирование сульфидной жидкости с обогащением ее Cu и просачиванием в породы фундамента (см. рис. 7). Пример аналогичной миграции сульфидной жидкости известен в расслоенной интрузии Суханко комплекса Портимо, где сульфидная минерализация, богатая Cu и ЭПГ, встречается в 30 м ниже подошвы интрузии [Iljina et al., 2015].

В основном этот рудный процесс протекал при величине *R*-фактора в диапазоне 3000–5000, модельном содержании сульфидов около 5 % (рис. 12, *а*) и умеренном фракционировании сульфидной жидкости ($F = 0.25—0.50$, см. рис. 12, *б*), что согласуется с данными [Karykowski et al., 2018a]. Такая сравнительно низкая величина *R*-фактора отражает значительное количество сульфидов по сравнению с вмещающей магмой, достаточное для образования Cu-Ni руд при пониженной концентрации ЭПГ [Godel, 2015]. Параметры рудообразования месторождения Западный Ниттис, проявления Поаз и верхнего рифа проявления Терраса отличаются от вышеприведенных: величина *R*-фактора составляет 10 000 и модельное содержание сульфидов 2–3 % (см. рис. 12, *а*). По этим признакам эти руды близки малосульфидным Pt-Pd месторождениям, что подтверждается данными на рис. 8.

Для большинства сульфидных ЭПГ-Cu-Ni руд характерна слабая корреляция Pt + Pd с S и Ni, за исключением месторождения Западный Ниттис (см. рис. 9, *в*, *г*). В то же время в ряде случаев наблюдается значимая корреляция Pt + Pd с Cu (см. рис. 9, *д*), что, очевидно, свидетельствует о фракционировании сульфидного расплава. Это подтверждается на примере проявления Арваренч, для руды которого типично преобладание Cu над Ni (см. табл. 2). Об этом же свидетельствует широкое развитие в ЭПГ-Cu-Ni рудах среди МПГ соединений Pd, реже Pt, с Te и Bi, в частности, майченерита и меренскиита, которые, согласно экс-

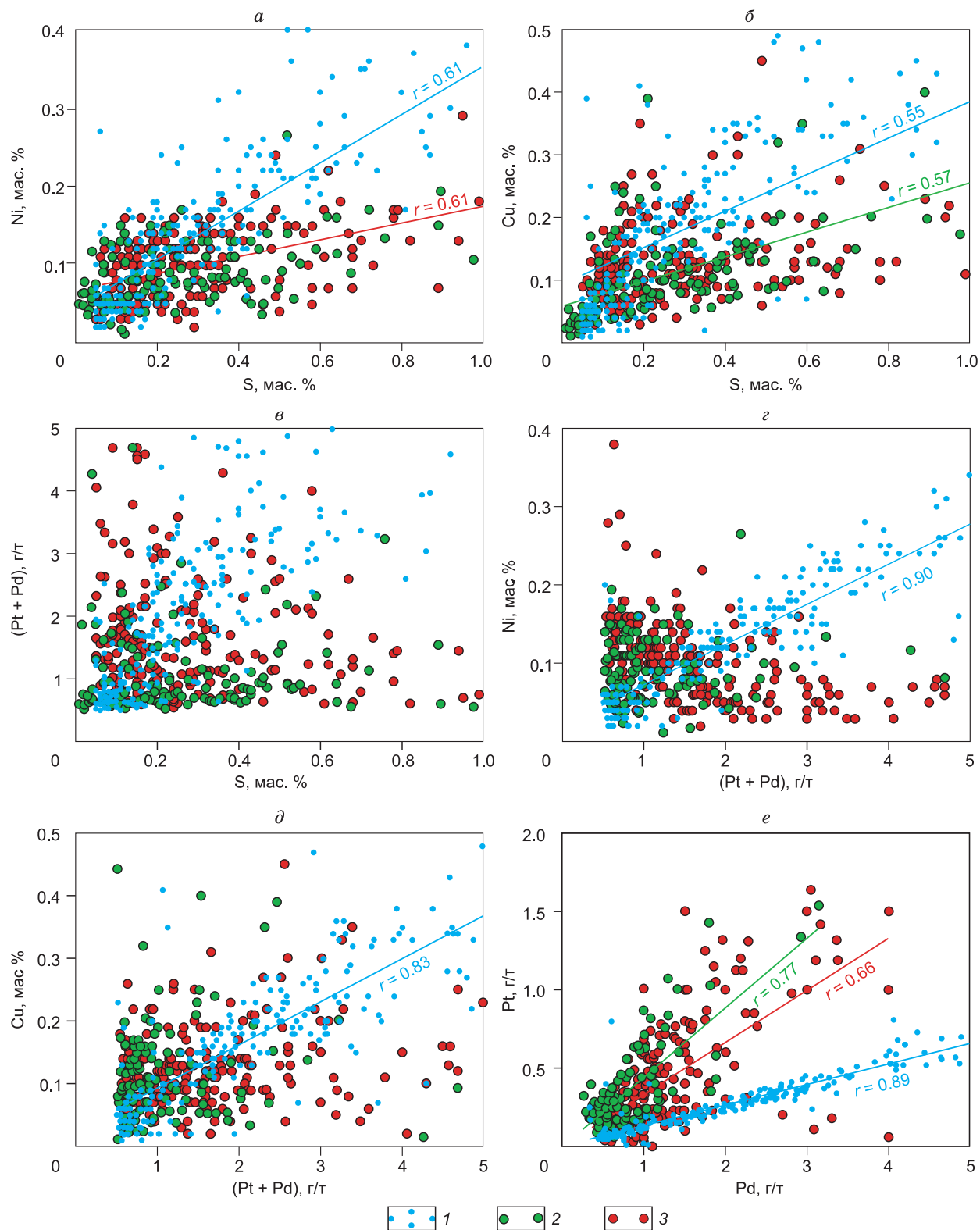


Рис. 10. Бинарные вариационные диаграммы халькофильных и сидерофильных элементов для средних составов малосульфидных Pt-Pd руд по рудным пересечениям: Ni—S (*a*), Cu—S (*b*), (Pt + Pd)—S (*c*), Ni—(Pt + Pd) (*d*), Cu—(Pt + Pd) (*e*), Pt—Pd (*f*).

1—3 — месторождения: 1 — Вуручайвенч, 2 — Лойпишнюн, 3 — Южная Сопча.

Рис. 11. Распределение ЭПГ, Au, Ni и Cu, нормализованных к примитивной мантии, согласно [McDonough, Sun, 1995], в сульфидных ЭПГ-Cu-Ni (а) и малосульфидных Pt-Pd (б) рудах Мончегорского рудного района.

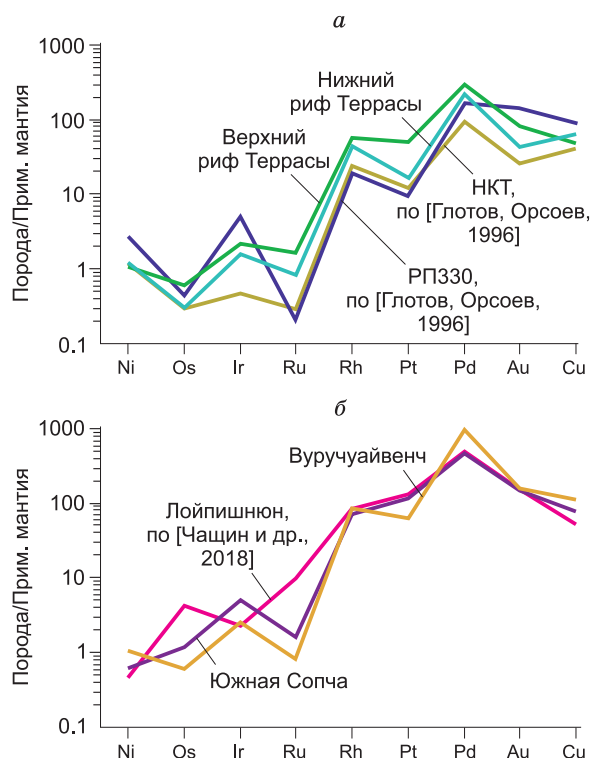
периментальным данным [Makovicky, 2002], сосуществуют при температуре $< 500\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Сульфидные ЭПГ-Cu-Ni руды Мончеплутона рифового типа (РП330 и Терраса) не характерны для месторождений этого типа. Месторождение РП330 по своему положению в разрезе массива Сопча сходно с нижней сульфидной зоной Великой Дайки, Зимбабве [Wilson et al., 1989; Naldrett, Wilson, 1990; Wilson, Prendergast, 2001], однако отличается от нее размещением в средней части толщи ортопироксенов и меньшей мощностью. Полученный возраст ортопироксенов РП330 (2492.5 ± 4.1 млн лет) является надежным свидетельством того, что РП330 образовался позднее вмещающих пород массива Сопча в результате инъекции насыщенной серой магмы. Повидимому, такая насыщенность серой обусловлена контаминацией базитовой магмой коровых пород на уровне промежуточного очага, что доказывается аномально низкой величиной изотопного состава Nd в гарцбургитах РП330 [Чашин и др., 2016]. В процессе охлаждения и кристаллизации силикатной составляющей образовалась несмешивающаяся сульфидная жидкость, которая улавливала ЭПГ. Эти выделившиеся сульфиды осаждались с формированием рудных концентраций и МПГ, представленных в основном Pt-Fe сплавами, в нижней части РП330, в связи с гарцбургитами. В дальнейшем, после затвердевания силикатного кумулуса, остаточная жидкость, насыщенная флюидами и обогащенная ЭПГ, мигрировала вверх к горизонту пегматоидных ортопироксенов, что привело к их частичной амфиболизации и кристаллизации МПГ, преимущественно висмутотеллуридного состава.

Альтернативная модель образования РП330 была предложена в работе [Karykowski et al., 2018b], согласно которой формирование РП330 обусловлено внедрением многофазных кристаллических каш, часть из них содержала сульфиды. Однако механизм подъема кашеобразного расплава по вертикальному каналу небольшой мощности, сопоставимой с мощностью РП330, представляется маловероятным из-за высокой вязкости такого расплава, и им трудно объяснить процесс растекания магмы по субгоризонтальной поверхности.

Образование рифов проявления Терраса также связано с инъекцией более примитивной серонасыщенной магмы в консолидированные нориты массива Нюд. При этом соотношения Pt + Pd с S, Ni и Cu в верхнем и нижнем рифах заметно отличаются. Если в руде верхнего рифа наблюдается положительная корреляция Pt + Pd с этими компонентами, то в руде нижнего рифа такие связи отсутствуют (см. рис. 9, в-д). Это свидетельствует о том, что концентрация ЭПГ в верхнем рифе связана с сульфидной жидкостью так же, как и в рифе РП330, тогда как в нижнем рифе она обусловлена, вероятно, процессами флюидного переноса.

Процесс малосульфидного платинометалльного рудообразования протекал при величине R -фактора 10 000, модельном содержании сульфидов около 1 % (см. рис. 12, а) и повышенном фракционировании сульфидной жидкости (F около 0.25, см. рис. 12, б). Эти параметры свидетельствуют, что в магматических камерах происходило образование сравнительно небольшого количества сульфидов при высокой концентрации ЭПГ, способной к формированию Pt-Pd месторождений [Godel, 2015]. Что касается генезиса малосульфидных платинометалльных месторождений, то в настоящее время широко распространена является точка зрения [Шарков, Богатилов, 1998; Шарков, 2006; Гроховская и др., 2009; и др.], согласно которой формирование промышленных концентраций ЭПГ в малосульфидных Pt-Pd рудах является результатом сложных и многостадийных минералообразующих процессов, начинающихся с собственно магматической стадии и заканчивающихся гидротермально-метасоматическими преобразованиями.



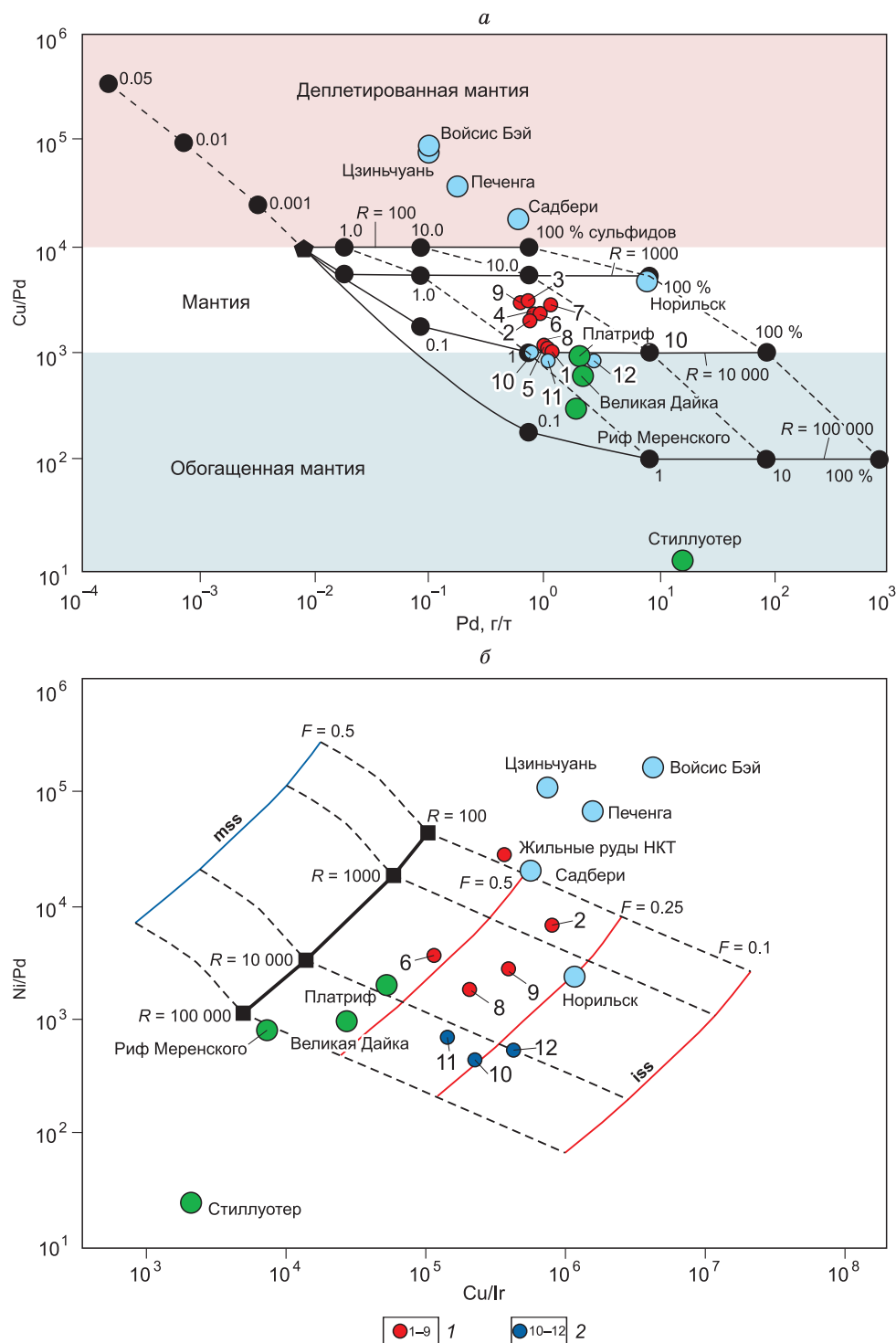


Рис. 12. Диаграммы Cu/Pd—Pd, по [Barnes et al., 1993] (а) и Ni/Pd—Cu/Ir, по [Karykowski et al., 2018a] (б) для сульфидных ЭПГ-Cu-Ni и малосульфидных Pt-Pd руд Мончегорского рудного района.

1 — сульфидные ЭПГ-Cu-Ni месторождения и проявления: 1 — Западный Ниттис, 2 — НКТ, 3 — Нюд, 4 — Морошковое озеро, 5 — Поаз, 6 — РП330, 7 — Арваренч, 8 — верхний риф Террасы, 9 — нижний риф Террасы; 2 — малосульфидные Pt-Pd месторождения: 10 — Лойпишнюн, 11 — Южная Сопча, 12 — Вуручайвенч. R — отношение силикатной жидкости к сульфидной. Положение мировых сульфидных ЭПГ-Cu-Ni (синий кружок) и малосульфидных Pt-Pd (зеленый кружок) месторождений показано по [Naldrett, 2010]. На части б сплошной черной линией показаны модельные составы сульфидов при разных величинах R -фактора. Черные штриховые линии отражают составы смесей моносульфидного твердого раствора (mss) и промежуточного сульфидного твердого раствора (iss) при разных величинах R -фактора. Синяя линия показывает состав mss, а красные — составы остаточной сульфидной жидкости при разной степени фракционирования (F — фракция остаточной жидкости).

Это подтверждается на примере месторождения Лойпишнюн, где установлено, что рудообразование протекало в условиях изменчивой фугитивности серы [Чашин и др., 2017], начиная с позднемагматического этапа (1000—700 °С), когда кристаллизация безводных силикатов привела к отделению остаточного насыщенного флюидами интеркумулусного расплава и его миграции вверх магматической камеры. Последующее остывание этого расплава сопровождалось кристаллизацией водных темноцветных минералов, сульфидов основных металлов и МПГ, локализованных в интересиях кумулатов ортопироксена [Чашин и др., 2017, 2018]. С заключительным этапом рудного процесса (< 500 °С) связано растворение первичных МПГ и образование вторичных обогащенных Cu соединений [Чашин и др., 2018]. Такой широкий температурный диапазон платинометалльного рудообразования нашел свое отражение в значительных вариациях состава МПГ.

Сходная точка зрения [Кнауф, Гусева, 2011] существует на образование месторождения Южная Сопча, по многим параметрам, прежде всего структурному положению, близкого к месторождению Лойпишнюн, согласно которой его рудные концентрации обусловлены кристаллизацией обогащенного рудными компонентами и флюидами остаточного расплава.

Малосульфидное месторождение рифового типа Вуручуайвенч обладает своими характерными особенностями: положением в верхней части разреза массива в пространственной связи с полосчатой зоной, приуроченностью рудоносных соскюритизированных плагиоклазитов к горизонту такситового метагбронорита, преобладанием Cu над Ni (см. табл. 2), высокой величиной фракционирования ЭПГ (см. табл. 4) и наличием ассоциации МПГ с постмагматическим сульфидным парагенезисом [Гроховская и др., 2000]. По некоторым из этих особенностей это месторождение сходно с рифом Платинова расслоенной интрузии Скаергаард [Andersen, 2006; Nielsen et al., 2005], хотя состав рудовмещающих пород в них заметно различается. Наиболее вероятно образование рифа Вуручуайвенч в результате фракционной кристаллизации магмы мафитовой субкамеры Мончеплутона и, как следствие, существенного увеличения концентрации серы, растворенной в остаточном расплаве. На заключительном этапе фракционирования этот остаточный, обогащенный флюидами и ЭПГ, интеркумулусный расплав мигрировал в верхнюю часть субкамеры, вызывая аутометасоматические изменения породообразующих силикатов и образование МПГ в ассоциации с постмагматическими сульфидными.

Прогнозный потенциал и перспективы обнаружения новых месторождений

Перспективы МРР для наращивания запасов месторождений и выявления крупных промышленных платинометалльных месторождений на базе существующих проявлений весьма высоки. В частности, значительный интерес для постановки оценочных и разведочных работ представляют северо-восточный фланг месторождения Вуручуайвенч, а также проявления Поаз и Арваренч, где выявлены крупные прогнозные ресурсы платиноидов. При этом некоторые массивы Мончеплутона в отношении платиноносности изучены явно недостаточно. В частности, поисковые работы, проведенные на небольших участках массива НКТ и Ньюда, не дают полного представления о перспективах этих массивов на платиноиды, а платиноносность придонной части массива Сопча не изучена вовсе.

В настоящее время суммарные подсчитанные запасы Pt + Pd в месторождениях МРР составляют около 200 т, а прогнозные ресурсы оценены в более чем 700 т Pt + Pd. Несмотря на невысокие средние содержания Pt + Pd (в основном не более 1.5 г/т) в платинометалльных месторождениях и проявлениях МРР, проведенная геолого-экономическая оценка показала рентабельность их эксплуатации.

Кроме того, исходя из анализа геологического строения Мончеплутона, существуют геологические предпосылки для обнаружения платинометалльного оруденения рифового типа в нижних и верхних частях его разреза. В частности, весьма благоприятна для этого зона переслаивания ортопироксенов и гарцбургитов в нижней части массивов НКТ и Сопча по аналогии с локализацией платинометалльного оруденения в расслоенных интрузиях Миранела (Бразилия) [Barnes et al., 2011] и Капалагулу (Танзания) [Maier et al., 2008]. В верхней части разреза НКТ благоприятна для обнаружения платинометалльного месторождения рифового типа зона ортопироксенов массива Ниттис по аналогии с локализацией месторождения РП330. Кроме того, по данным (В.Н. Иванченко, 2020 г.), существуют предпосылки для обнаружения платинометалльной минерализации рифового типа в верхней части массива Поаз, полученные в результате поисковых работ АО «Росгеология».

Следует отметить, что в последнее время резко вырос интерес к платинометалльному сырью Кольского региона. Например, в настоящее время уже ведутся подготовительные работы на Федорово-Тундровском месторождении. Это обусловлено, не в последнюю очередь, преимущественно Pd составом руд и устойчивыми высокими мировыми ценами на него. Кроме того, важными благоприятными факторами являются: сравнительно большая мощность рудных зон в сульфидных месторождениях базального типа и значительная протяженность рудных тел рифового типа, в основном неглубокое залегание месторождений, хорошие результаты обогатимости руд и их малосернистый состав, способствующий пониженной нагрузке при воздействии на окружающую среду.

Таким образом, в расслоенных интрузиях МРР имеются значительные запасы и крупные прогнозные ресурсы сульфидных ЭПГ-Cu-Ni и малосульфидных Pt-Pd руд. Это выдвигает его в ряд одного из крупнейших мировых металлогенических таксонов с большим потенциалом платинометаллических руд различных геолого-промышленных типов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С палеопротерозойскими (около 2.5 млрд лет) расслоенными интрузиями МРР (Мончеплутон и Мончетундровским массивом) пространственно и генетически связаны месторождения и проявления сульфидных ЭПГ-Cu-Ni и малосульфидных Pt-Pd руд базального и рифового структурных типов. К сульфидным ЭПГ-Cu-Ni относятся месторождения Западный Ниттис (базальный тип) и РП330 (рифовый тип), проявления НКТ, Нюд, Морошковое озеро, Поаз, Арваренч (базальный тип) и Терраса (рифовый тип). Малосульфидными Pt-Pd являются месторождения Лойпишнюн, Южная Сопча (базальный тип) и Вуручайвенч (рифовый тип). Характерной особенностью сульфидных месторождений базального типа является сложное строение рудных тел с невыдержанной мощностью и неравномерным распределением полезных компонентов. Тогда как месторождения рифового типа отличаются значительной протяженностью рудных тел по простиранию и падению при сравнительно стабильной мощности.

Сульфидные и малосульфидные типы руд отличаются минералогией ЭПГ и своими геохимическими особенностями. В частности, сульфидные ЭПГ-Cu-Ni месторождения характеризуются в основном довольно слабыми вариациями состава МПГ, тогда как в малосульфидных Pt-Pd месторождениях ассоциации МПГ отличаются значительным разнообразием состава. Сульфидные ЭПГ-Cu-Ni месторождения образованы в результате сульфидной несмесимости, возникшей вследствие контаминации основными магмами коровых пород, аккумуляции сульфидов основных металлов и ЭПГ в ассоциации с ними и последующей сегрегации рудных компонентов в экономических концентрациях. Месторождение РП330 и проявление Терраса рифового типа сформированы в результате инъекции дополнительных порций серонасыщенной магмы.

Образование рудных концентраций в малосульфидных Pt-Pd месторождениях базального типа (Лойпишнюн и Южная Сопча) обусловлено кристаллизацией остаточных расплавов, обогащенных рудными компонентами и флюидами, и последующими гидротермально-метасоматическими преобразованиями. Месторождение рифового типа Вуручайвенч произошло вследствие глубокого фракционирования родоначальной магмы с образованием сульфидной жидкости, обогащенной Cu и ЭПГ.

В целом наличие весьма крупных платинометаллических месторождений в пределах МРР и значительный ресурсный потенциал служат надежной минерально-сырьевой базой для развития добывающей промышленности в Кольском регионе западного сектора Арктики.

Авторы выражают благодарность рецензентам за доброжелательные критические замечания, устранение которых способствовало существенному улучшению статьи.

Исследование выполнено по теме НИР 0226–2019–0053 Геологического института КНЦ РАН. Сведения по месторождениям Западный Ниттис и Лойпишнюн приведены с использованием материалов и с согласия ЗАО «Терская горная компания».

ЛИТЕРАТУРА

Балаганский В.В., Горбунов И.А., Мудрук С.В. Палеопротерозойские Лапландско-Кольский и Свекофенский орогены (Балтийский щит) // Вестник КНЦ РАН, 2016, № 3, с. 5—11.

Баянова Т.Б., Нерович Л.И., Митрофанов Ф.П., Жавков В.А., Серов П.А. Мончетундровский базитовый массив Кольского региона: новые геологические и изотопно-возрастные данные // ДАН, 2010, т. 431, № 2, с. 216—222.

Глотов А.И., Орсов Д.А. Распределение благородных металлов в ЭПГ-Cu-Ni-сульфидных рудах мончегорского комплекса, Кольский полуостров // ДАН, 1996, т. 347, № 5, с. 670—673.

Горбунов Г.И., Яковлев Ю.Н., Гончаров Ю.В., Горелов В.А., Тельнов В.А. Никеленосные районы Кольского полуострова // Медно-никелевые месторождения Балтийского щита / Под ред. Г.И. Горбунова, Х. Папунена. Л., Наука, 1985, с. 27—94.

Гроховская Т.Л., Бакаев Г.Ф., Шелепина Е.П., Лапина М.И., Лапутина И.П., Муравицкая Г.Н. Платинометаллическая минерализация в габброноритах массива Вуручайвенч, Мончегорский плутон (Кольский полуостров, Россия) // Геология рудных месторождений, 2000, т. 42, № 2, с. 147—161.

Гроховская Т.Л., Бакаев Г.Ф., Шолохнев В.В., Лапина М.И., Муравицкая Г.Н., Войтехович В.С. Рудная платинометаллическая минерализация в расслоенном мончегорском магматическом комплексе (Кольский полуостров, Россия) // Геология рудных месторождений, 2003, т. 45, № 4, с. 329—352.

Гроховская Т.Л., Лапина М.И., Мохов А.В. Ассоциации и генезис минералов платиновой группы в малосульфидных рудах месторождения Мончетундра // Геология рудных месторождений, 2009, т. 51, № 6, с. 520—539.

Гроховская Т.Л., Иванченко В.Н., Каримова О.В., Грибоедова И.Г., Самошникова Л.А. Геологическое строение, минералогия и генезис ЭПГ-минерализации массива Южная Сопча, мончегорский комплекс, Россия // Геология рудных месторождений, 2012, т. 54, № 5, с. 416—440.

Гурская Л.И., Додин Д.А. Минеральные ресурсы платиновых металлов России: перспективы расширения // Региональная геология и металлогения, 2015, № 64, с. 84—93.

Додин Д.А., Чернышов Н.М., Яцкевич Б.А. Платинометалльные месторождения России. СПб, Наука, 2000, 753 с.

Казанов О.В., Корнеев С.И., Петров С.В., Фролова А.А. Особенности распределения минералов благородных металлов в медно-платиновых жилах участка Западный Ниттис Мончегорского расслоенного плутона (Кольский полуостров) // Материалы Всероссийской конференции с международным участием «Проблемы геологии и эксплуатации месторождений платиновых металлов (I научные чтения памяти проф. В.Г. Лазаренкова)» / Под ред. И.В. Таловиной, Н.И. Воронцовой и А.М. Дурягиной. СПб, СПбГУ, 2016, с. 62—65.

Кнауф В.В., Гусева Н.С. О новом рудно-формационном типе платинометаллических руд в двучленных разрезах массивов южного обрамления Мончегорского расслоенного плутона // Платина России / Ред. Д.А. Додин. Красноярск, Изд-во КНИИГиМС, 2011, т. VII, с. 313—329.

Козлов Н.Е., Иванов А.А., Нерович Л.И. Лапландский гранулитовый пояс — первичная природа и развитие. Апатиты, КНЦ РАН, 1990, 170 с.

Козлов Н.Е., Сорохтин Н.О., Глазнев В.Н., Козлова Н.Е., Иванов А.А., Кудряшов Н.М., Мартынов Е.В., Тюремнов В.А., Матюшкин А.В., Осипенко Л.Г. Геология архея Балтийского щита. СПб, Наука, 2006, 329 с.

Коровкин В.А., Турылева Л.В., Руденко Д.Г., Журавлев В.А., Кличникова Г.Н. Недра Северо-Запада Российской Федерации. СПб, СПб картфабрика ВСЕГЕИ, 2003, 520 с.

Криволюцкая Н.А., Смолькин В.Ф., Свирская Н.М., Мамонтов В.П., Фаныгин А.С., Беляцкий Б.В., Рощина И.А. Геохимические особенности массивов друзитового комплекса центральной части Беломорского подвижного пояса: I. Распределение главных и редких элементов в породах // Геохимия, 2010, № 5, с. 496—524.

Миц М.В., Глазнев В.Н., Конилов А.Н., Кунина Н.М., Никитичев А.П., Раевский А.Б., Седых Ю.Н., Ступак В.М., Фонарев В.И. Ранний докембрий северо-востока Балтийского щита: палеогеодинамика, строение и эволюция континентальной коры. М., Научный мир, 1996, 287 с.

Митрофанов Ф.П., Балаганский В.В., Балашов Ю.А., Ганнибал Л.Ф., Докучаева В.С., Нерович Л.И., Радченко М.К., Рюнгген Г.И. U-Pb возраст габбро-анортозитов Кольского полуострова // ДАН, 1993, т. 331, № 1, с. 95—98.

Митрофанов Ф.П., Балабонин Н.Л., Баянова Т.Б., Корчагин А.У., Латыпов Р.М., Осокин А.С., Субботин В.В., Карпов С.М., Нерадовский Ю.Н. Кольская платинометаллическая провинция: новые данные // Платина России. Проблемы развития минерально-сырьевой базы платиновых металлов в XXI в. / Ред. В.П. Орлов. М., ЗАО «Геоинформмарк», 1999, с. 43—52.

Налдретт А.Дж. Магматические сульфидные месторождения медно-никелевых и платинометаллических руд. СПб, СПбГУ, 2003, 487 с.

Нерадовский Ю.Н., Рундквист Т.В., Галкин А.С., Климентьев В.Н. К проблеме платиноносности рудного «пласта-330» г. Сопчи и его промышленного использования (Мончегорский плутон) // Вестник МГТУ, 2002, т. 5, № 1, с. 85—90.

Нерович Л.И., Баянова Т.Б., Савченко Е.Э., Серов П.А., Екимова Н.А. Новые данные по геологии, петрографии, изотопной геохимии и ЭПГ минерализации Мончетундровского массива // Вестник МГТУ, 2009, т. 12, № 3, с. 461—477.

Расслоенные интрузии Мончегорского рудного района: петрология, оруденение, изотопия, глубинное строение / Под ред. Ф.П. Митрофанова, В.Ф. Смолькина. В 2-х частях. Апатиты, КНЦ РАН, 2004, 354 с.

Рундквист Т.В., Баянова Т.Б., Сергеев С.А., Припачкин П.В., Гребнев Р.А. Палеопротерозойский расслоенный платиноносный массив Вурэчуайвенч (Кольский полуостров): новые результаты U-Pb (ID-TIMS, SHRIMP) датирования бадделита и циркона // ДАН, 2014, т. 454, № 1, с. 67—72.

Слабунов А.И., Балаганский В.В., Щипанский А.А. Мезоархей-палеопротерозойская эволюция земной коры Беломорской провинции Фенноскандинавского щита и тектоническая позиция эклогитов // Геология и геофизика, 2021, т. 62 (5), с. 650—677.

Служеникин С.Ф., Дистлер В.В., Дюжиков О.А., Кравцов В.Ф., Кунилов В.Е., Лапутина И.И., Туровцев Д.М. Малосульфидное платиновое оруденение в Норильских дифференцированных интрузивах // Геология рудных месторождений, 1994, т. 36, № 3, с. 195—217.

Смолюкин В.Ф., Кременецкий А.А., Ветрин В.Р. Геолого-генетическая модель формирования палеопротерозойских рудно-магматических систем Балтийского щита // Отечественная геология, 2009, вып. 3, с. 54—62.

Чашин В.В. Палеопротерозойский комплекс расслоенных интрузий Кольского полуострова и его металлогения (Россия) // Геология рудных месторождений, 1999, т. 41, № 2, с. 131—142.

Чашин В.В., Митрофанов Ф.П. Палеопротерозойская Имандра-Варзугская рифтогенная структура (Кольский полуостров): интрузивный магматизм и минералогия // Геодинамика и тектонофизика, 2014, т. 5, № 1, с. 231—256.

Чашин В.В., Баянова Т.Б. Сопчеозерское хромовое месторождение Мончеплутона: геохимия и U-Pb возраст // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. Апатиты, КНЦ РАН, 2021, № 18, с. 403—408.

Чашин В.В., Савченко Е.Э. Офитовые габбронориты основания массива Кумужья, Мончеплутон: минералогия, петрогеохимия, U-Pb возраст // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. Апатиты, КНЦ РАН, 2021а, № 18, с. 392—396.

Чашин В.В., Савченко Е.Э. Дуниты нижней зоны палеопротерозойского Мончетундровского массива: геологические и минералого-геохимические свидетельства процесса океанизации // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. Апатиты, КНЦ РАН, 2021б, № 18, с. 397—402.

Чашин В.В., Баянова Т.Б., Люлько М.С. Геологическое строение и U-Pb возраст массива габброноритов Кириха — Кольский п-ов, Россия // Геология и геохронология породообразующих и рудных процессов в кристаллических щитах. Материалы Всероссийской конференции. Апатиты, К & М, 2013, с. 179—181.

Чашин В.В., Баянова Т.Б., Митрофанов Ф.П., Серов П.А. Малосульфидные платинометалльные руды палеопротерозойского Мончегорского плутона и массивов его южного обрамления (Кольский полуостров, Россия): геологическая характеристика и изотопно-геохронологические свидетельства полихронности рудно-магматических систем // Геология рудных месторождений, 2016, т. 58, № 1, с. 41—63.

Чашин В.В., Кульчицкая А.А., Елизарова И.Р. Флюидный режим формирования малосульфидного платинометалльного месторождения Лойпишнюн, Мончетундровский базитовый массив (Кольский полуостров, Россия) // Литосфера, 2017, т. 17, № 6, с. 91—109.

Чашин В.В., Петров С.В., Дрогобужская С.В. Малосульфидное платино-палладиевое месторождение Лойпишнюн Мончетундровского базитового массива (Кольский полуостров, Россия) // Геология рудных месторождений, 2018, т. 60, № 5, с. 472—503.

Чашин В.В., Баянова Т.Б., Савченко Е.Э., Киселева Д.В., Серов П.А. Петрогенезис и возраст пород нижней платиноносной зоны Мончетундровского базитового массива, Кольский полуостров // Петрология, 2020, т. 28, № 2, с. 150—183.

Чашин В.В., Петров С.В., Киселева Д.В., Савченко Е.Э. Платиноносность и условия образования сульфидного ЭПГ-Cu-Ni месторождения Нюд-П Мончегорского плутона, Кольский полуостров, Россия // Геология рудных месторождений, 2021, т. 63, № 2, с. 99—131.

Шарков Е.В. Формирование расслоенных интрузивов и связанного с ними оруденения. М., Научный мир, 2006, 368 с.

Шарков Е.В., Богатиков О.А. Механизмы концентрирования элементов платиновой группы в расслоенных интрузивах Карело-Кольского региона // Геология рудных месторождений, 1998, т. 40, № 5, с. 419—439.

Шарков Е.В., Богатиков О.А., Красивская И.С. Роль мантийных плюмов в тектонике раннего докембрия восточной части Балтийского щита // Геотектоника, 2000, № 2, с. 3—25.

Шарков Е.В., Красивская И.С., Чистяков А.В. Диспергированный мафит-ультрамафитовый интрузивный магматизм подвижных зон раннего палеопротерозоя Балтийского щита на примере друзитового (коронитового) комплекса Беломорья // Петрология, 2004, т. 12, № 6, с. 632—655.

Alapieti T.T., Lahtinen J.J. Platinum-group element mineralization in layered intrusions of northern Finland and the Kola Peninsula, Russia // The geology, geochemistry, mineralogy and mineral beneficiation of platinum-group elements / Ed. L.J. Cabri. Montreal, Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, 2002, v. 54, p. 507—546.

Alapieti T.T., Filen B.A., Lahtinen J.J., Lavrov V.V., Smolkin V.F., Voitsekhovskiy S.N. Early Proterozoic layered intrusions in the northeastern part of the Fennoscandian Shield // Mineral. Petrol., 1990, v. 42, p. 1—22.

Amelin Yu.V., Heaman L.M., Semenov V.S. U-Pb geochronology of layered mafic intrusions in the eastern Baltic Shield: implications for the timing and duration of Paleoproterozoic continental rifting // *Precambrian Res.*, 1995, v. 75 (1—2), p. 31—46.

Andersen J.C.Ø. Postmagmatic sulphur loss in the Skaergaard intrusion: implications for the formation of the Platinova Reef // *Lithos*, 2006, v. 92, p. 198—221.

Balashov Yu.A., Bayanova T.B., Mitrofanov F.P. Isotope data on the age and genesis of layered basic-ultrabasic intrusions in the Kola Peninsula and northern Karelia, northeastern Baltic Shield // *Precambrian Res.*, 1993, v. 64 (1—4), p. 197—205.

Barnes S.-J., Maier W.D. Platinum-group element distributions in the Rustenburg layered suite of the Bushveld complex, South Africa // *The geology, geochemistry, mineralogy and mineral beneficiation of platinum-group elements* / Ed. L.J. Cabri. Montreal, Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, 2002, v. 54, p. 431—458.

Barnes S.-J., Couture J.-F., Sawyer E.W., Bouchaib C. Nickel-copper occurrences in the Belleterre-Angliers belt of the Pontiac subprovince and the use of Cu-Pd ratios in interpreting platinum-group element distributions // *Econ. Geol.*, 1993, v. 88, p. 1402—1418.

Barnes S.-J., Osborne G., Cook D., Barnes L., Maier W.D., Godel B. The Santa Rita nickel sulfide deposit in the Fazenda Mirabela intrusion, Bahia, Brazil: geology, sulfide geochemistry and genesis // *Econ. Geol.*, 2011, v. 106, p. 1083—1110.

Gaál G., Gorbatshev R. An outline of the Precambrian evolution of the Baltic shield // *Precambrian Res.*, 1987, v. 35, p. 15—52.

Godel B. Platinum-group element deposits in layered intrusions: recent advances in the understanding of the ore forming processes // *Layered intrusions* / Eds. B. Charlier, O. Namur, R. Latypov, C. Tegner. Dordrecht, Heidelberg, New York, London, Springer, 2015, p. 379—432.

Green T., Peck D. Platinum group elements exploration: economic considerations and geological criteria // *Exploration for platinum-group elements deposits* / Ed. J.E. Mungall. Mineralogical Association of Canada, Short Course Series, 2005, v. 35, p. 247—274.

Groshev N.Yu., Rundkvist T.V., Karykowski B.T., Maier W.D., Korchagin A.U., Ivanov A.N., Junge M. Low-sulfide platinum-palladium deposits of the Paleoproterozoic Fedorova-Pana layered complex, Kola Region, Russia // *Minerals*, 2019, № 12, doi:10.3390/min9120764.

Hutchinson D., McDonald I. Laser ablation ICP-MS study of platinum-group elements in sulfides from the Platreef at Turfspruit, northern limb of the Bushveld Complex, South Africa // *Mineral. Deposita*, 2008, v. 43 (6), p. 695—711.

Iljina M., Maier W.D., Karinen T. PGE-(Cu-Ni) deposits of the Tornio-Näränkävää belt of intrusions (Portimo, Penikat, and Koillismaa) // *Mineral deposits of Finland* / Eds. W.D. Maier, R. Lahtinen, H.O'Brien. Amsterdam, Oxford, Waltham, Elsevier, 2015, p. 133—164.

Junge M., Wirth R., Oberthür T., Melcher F., Schreiber A. Mineralogical siting of platinum-group elements in pentlandite from the Bushveld Complex, South Africa // *Mineral. Deposita*, 2015, v. 50, p. 41—54.

Karykowski B.T., Maier W.D., Groshev N.Y., Barnes S.-J., Pripachkin P.V., McDonald I., Savard D. Critical controls on the formation of contact-style PGE-Ni-Cu mineralization: evidence from the Paleoproterozoic Monchegorsk complex, Kola Region, Russia // *Econ. Geol.*, 2018a, v. 113 (4), p. 911—935.

Karykowski B.T., Maier W.D., Groshev N.Y., Barnes S.-J., Pripachkin P.V., McDonald I. Origin of reef-style PGE mineralization in the Paleoproterozoic Monchegorsk Complex, Kola Region, Russia // *Econ. Geol.*, 2018b, v. 113 (6), p. 1333—1358.

Maier W.D. Geology and petrogenesis of magmatic Ni-Cu-PGE-Cr-V deposits: An introduction and overview // *Mineral deposits of Finland* / Eds. W.D. Maier, R. Lahtinen, H. O'Brien. Amsterdam, Oxford, Waltham, Elsevier, 2015, p. 73—92.

Maier W.D., Barnes S.-J., Bandyayera D., Livesey T., Li C., Ripley E. Early Kibaran rift-related mafic-ultramafic magmatism in western Tanzania and Burundi: Petrogenesis and ore potential of the Kapalagulu and Musongati layered intrusions // *Lithos*, 2008, v. 101, p. 24—53.

Makovicky E. Ternary and quaternary phase systems with PGE // *The geology, geochemistry, mineralogy and mineral beneficiation of platinum-group elements* / Ed. L.J. Cabri. Montreal, Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, 2002, v. 54, p. 131—175.

McDonough W.F., Sun S.-S. The composition of the Earth // *Chem. Geol.*, 1995, v. 120, p. 223—253.

Naldrett A.J. Secular variation of magmatic sulfide deposits and their source magma // *Econ. Geol.*, 2010, v. 105, p. 669—688.

Naldrett A.J., Wilson A.H. Horizontal and vertical variations in noble-metal distribution in the Great Dyke of Zimbabwe: a model for the origin of the PGE mineralization by fractional segregation of sulfide // *Chem. Geol.*, 1990, v. 88, p. 279—300.

Nielsen T.F.D., Andersen J.C.Ø., Brooks C.K. The Platinova Reef of the Skaergaard intrusion // Exploration for platinum group element deposits / Ed. J.E. Mungall. Mineralogical Association of Canada, Short Course 35, 2005, p. 431—455.

Sharman E.R., Penniston-Dorland S.C., Kinnaird J.A., Nex P.A.M., Brown M., Wing B.A. Primary origin of marginal Ni-Cu-(PGE) mineralization in layered intrusion: $\Delta^{33}\text{S}$ evidence from the Platreef, Bushveld, South Africa // Econ. Geol., 2013, v. 108 (2), p. 365—377.

Sluzhenikin S.F., Yudovskaya M.A., Stephen J., Barnes S.J., Abramova V.D., Le Vaillant M., Petrenko D.B., Grigor'eva A.V., Brovchenko V.D. Low-sulfide platinum group element ores of the Norilsk-Talnakh camp // Econ. Geol., 2020, v. 115 (6), p. 1267—1303.

Wilson A.H., Prendergast M.D. Platinum-group element mineralization in the Great Dyke, Zimbabwe, and its relationship to magma evolution and magma chamber structure // S. Afr. J. Geol., 2001, v. 104, p. 319—342.

Wilson A.H., Naldrett A.J., Tredoux M. Distribution and controls of platinum group element and base metal mineralization in the Darwendale subchamber of the Great Dyke, Zimbabwe // Geology, 1989, v. 17, p. 649—652.

*Поступила в редакцию 2 августа 2021 г.,
принята в печать 30 ноября 2021 г.*