

СУЛЬФИДНЫЕ ЭПГ-Cu-Ni И МАЛОСУЛЬФИДНЫЕ Pt-Pd РУДЫ МОНЧЕГОРСКОГО РУДНОГО РАЙОНА (ЗАПАДНЫЙ СЕКТОР АРКТИКИ):

Чащин В. В., Иванченко В. Н.

Аннотация

За последнее время в пределах Мончегорского рудного района (МРР) западного сектора Арктики была выполнена оценка платиноносности известных Cu-Ni месторождений (НКТ, Нюд, РП330 и Терраса) и выявлены новые месторождения (Западный Ниттис) и проявления сульфидных ЭПГ-Cu-Ni руд (Морошковое озеро, Поаз и Арваренч), а также месторождений малосульфидных Pt-Pd руд (Лойпишнюн, Южная Сопча и Вуручуайвенч). 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 и рифовые. Первые из них (Западный Ниттис, НКТ, Нюд, Морошковое озеро, Поаз, Арваренч, Лойпишнюн и Южная Сопча) локализованы в пределах нижних краевых зон интрузий, имеют сложное строение рудных тел с невыдержанной мощностью и неравномерным распределением элементов платиновой группы (ЭПГ). Месторождения рифового типа (РП330, Терраса и Вуручуайвенч) характеризуются выдержанной мощностью и более равномерным распределением полезных компонентов. 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, висмута-теллуридов и арсенидов ЭПГ. Образование сульфидных ЭПГ-Cu-Ni руд происходило при величине R-фактора от 3000 до 5000 и модельном содержании сульфидов около 5 % в результате контаминации исходной магмы коровыми породами, насыщения ее серой и последующим выделением несмешивающегося сульфидного расплава, обогащенного ЭПГ. Процесс малосульфидного Pt-Pd рудообразования протекал при величине R-фактора 10000 и модельном содержании сульфидов около 1 % и обусловлен отделением с последующей кристаллизацией остаточного, богатого флюидами и рудными компонентами остаточного расплава. 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.

Ключевые слова:

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

УДК 553.491:553.062 (470.21)

**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, Мурманская обл., ул. Ферсмана, 14
e-mail: chashchin@geoksc.apatity.ru*

*²Акционерное общество «Росгеология»
199155 Санкт-Петербург, ул. Одоевского, д. 24
e-mail: ivanchenko@list.ru*

За последнее время в пределах Мончегорского рудного района (МРР) западного сектора Арктики была выполнена оценка платиноносности известных Cu-Ni месторождений (НКТ, Нюд, РП330 и Терраса) и выявлены новые месторождения (Западный Ниттис) и проявления сульфидных ЭПГ-Cu-Ni руд (Морошковое озеро, Поаз и Арваренч), а также месторождения малосульфидных Pt-Pd руд (Лойпишнюн, Южная Сопча и Вуручуайвенч). 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, висмута-теллуридов и арсенидов ЭПГ. Сульфидные ЭПГ-Cu-Ni месторождения 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) произошли за счет обогащенных рудными компонентами и флюидами остаточных расплавов, отделение и кристаллизация которых произошла в результате длительных рудообразующих процессов. Месторождение рифового типа

Вуручайвенч является следствием глубокого фракционирования родоначальной магмы с образованием сульфидной жидкости, богатой 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, геохимия ЭПГ, минералы платиновой группы, Мончеплутон, Мончетундровский массив, Мончегорский рудный район

ВВЕДЕНИЕ

В Арктической зоне России сосредоточены наиболее значительные запасы металлов платиновой группы, крупнейшие из которых 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, РПЗ30, 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 которого принимают участие три крупных архейских геологических сегмента: Кольская и Карельская провинции, а также Беломорский подвижный пояс (рис. 1). Упрощенно континентальная кора Кольской и Карельской провинций представлена гранито-гнейсами тоналит-трондьемит-гранодиоритового (ТТГ) состава с фрагментами метаосадочных и метамагматических пород, а также супракрустальными метавулканическими и метаосадочными породами зеленокаменных поясов.

Беломорский подвижный пояс занимает положение между Кольской и Карельской провинциями (рис. 1). В нем выделяются те же структурно-вещественные ансамбли, что и в соседних провинциях, но испытавшие значительные тектонические преобразования в неогарее, 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 (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], основными 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, различающие по возрасту и соотношению с вулканитами. Более ранние расслоенные интрузии (около 2.50 млрд. лет) перекрываются вулканитами с базальными конгломератами в основании и расположены только в пределах Кольской провинции. К этой группе относятся интрузии г. Генеральской и Улитаозерская; Мончегорский и Федорово-Панский комплексы (рис. 1) [Balashov et al., 1993; Amelin et al., 1995; Чащин, 1999].

Напротив, более поздние расслоенные интрузии (около 2.45 млрд. лет), которые интродуцируют вулканиты рифтогенных структур, распространены гораздо шире. Они широко представлены в Карельской провинции (интрузии Торнио, Кеми, Пеникат, Нярянкяваара, Коителайнен, Аканвааара 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) (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; Криволицкая и др., 2010].

Расслоенные интрузии обеих 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 (рис. 2). Мончеплутон представляет большой научный и практический интерес, поскольку в нем сочетаются практически все типы месторождений, характерные для расслоенных

интрузий, с нетипичными для расслоенных интрузий богатыми жильными Cu-Ni рудами. Он приурочен к северо-западному замыканию Имандра-Варзугской осадочно-вулканогенной рифтогенной структуры и залегает на архейском гранитоидном фундаменте (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 Ниттис-Кумужья-Травяная (НКТ). Субширотная ветвь протяженностью около 11 км и шириной около 3 км включает массивы Сопча, Нюд, Поаз и Вуручайвенч (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 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 рудный пласт 330 (РП330) мощностью 4–6 м (рис. 2), более подробная характеристика которого приведена ниже. Вероятно, родоначальная магма ультрамафитовой субкамеры сходна по составу с высокомагнезиальными базальтами U-типа Бушвельда [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 слабо дифференцированных мафитовых кумулатов – норитов и габброноритов. В основании вертикального разреза массива Нюд залегают меланонориты и плагиоортопироксениты мощностью до 300 м, которые выше по разрезу сменяются нормальными мезократовыми норитами мощностью до 350 м. В западной, северной и южной частях массива, между меланократовыми и мезократовыми норитами залегает оливиновый горизонт протяженностью 6 км, имеющий форму полумесяца (рис. 2). Он имеет субгоризонтальное залегание и мощность около 100 м. В состав оливинового горизонта входят ортопироксениты, плагиоортопироксениты и меланонориты 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 Ньюда и образовавшегося из серосодержащей магмы повышенной основности. Массив Поаз сложен меланоритами-плагиопироксенитами 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 Ньюд и Поаз (рис. 2) и по данным бурения наращивает их разрез, представляя собой наиболее верхнюю часть полного разреза Мончеплутона [Гроховская и др., 2000; Расслоенные..., 2004; Рундквист и др., 2015; Karukowski et al., 2018b]. Он протягивается в северо-восточном направлении на 6 км при ширине 0.5–2 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-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-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 бадделеиту, 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 (SIMS SHRIMP-II), соответственно (табл. 1), который противоречит геологическим данным. Более вероятен возраст плагиоклазитов Вуручайвенча равный 2494 ± 4 млн. лет (табл. 1). Дуниты и хромовые руды Дунитового Блока образовались около 2500 млн. лет, а несколько позднее их – нориты массива Ньюд с возрастом 2493 ± 7 млн. лет (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 (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 её 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..., 2004; Чащин 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-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 неупорядоченным чередованием ортопироксенитов и плагиопироксенитов с мело-меланократовыми норитами, которые прорваны габброидами верхней зоны [Чащин 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, примыкающей к Мончетундровскому массиву шириной 150–400 м, развиты многочисленные секущие дайки пород верхней зоны Мончетундровского массива [Чащин 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 положение 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 [Чащин, Савченко, 2021б].

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

Возраст крупнозернистых лейкократовых метагаббро и габброноритов 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). 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 протяженностью составляет 2.5 км при ширине 650–700 м. Она сложена в основном мезократовыми габброноритами с оливиновыми разновидностями в основании и кварцевыми феррогабброноритами в кровле. Возраст пород интрузии определен в 2502 ± 7 млн. лет для оливиновых габброноритов и 2500 ± 8 млн. лет для феррогабброноритов [Чащин и др., 2013].

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Содержания Pt, Pd, Ni, Cu и S, которые были использованы для расчета средних величин, приведенных в Appendix 1 и показанных на рис. 9 и 10, были определены в ЗАО «Механобр Инжиниринг Аналит» (г. Санкт-Петербург) и ОАО «Иргиредмет» (г. Иркутск). В ЗАО «Механобр Инжиниринг Аналит» содержания Pt и Pt 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 определялась титриметрическим йодометрическим методом. Погрешности определения 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 (табл. 4), 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, Морошковое озеро, Арваренч и Терраса. К малосульфидному Pt-Pd типу принадлежат месторождения Лойпишнюн, Южная Сопча и Вуручуайвенч. По своей структурной позиции все месторождения и проявления делятся на два типа: базальные, локализованные в пределах краевых частей интрузий и рифовые (стратиформные) [Чащин, Митрофанов, 2014].

СУЛЬФИДНЫЕ ЭПГ-Cu-Ni МЕСТОРОЖДЕНИЯ И ПРОЯВЛЕНИЯ

Месторождение Западный Ниттис

Это месторождение расположено на юго-западной оконечности массива Ниттис (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 входит два структурных типа сульфидных руд: донная залежь и жильные тела сплошных сульфидов. Донная залежь прослежена на расстояние 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 (Казанов, 2016 г.) характеризуются преобладанием сульфидов (брэггит) с подчиненным количеством арсенидов (палладоарсенид) и теллуру-висмутидов (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 эта минерализация близка к медно-платиновым жилам осевой части НКТ. Основной рудный минерал 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 станно-арсениды и станниды Pd (паларстанид и атокит), а также теллуру-висмутиды Pt и Pd (котульскит и мончеит), реже встречаются Pt-Fe сплавы (изоферроплатина), арсениды (сперрилит и палладоарсенид), в незначительных количествах присутствуют сульфиды ЭПГ (брэггит, висоцкит, куперит и эрлихманит), плюмбиды (звягинцевит), теллуриды (теларгпалит) и сульфоарсениды (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 РП330

РП330 приурочен к ортопироксенитам верхней части массива Сопча (рис. 3а). Он 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 $\epsilon Nd = -6 \pm 0.6$ [Чащин 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 ϵNd варьирует от +1.2 до -2.3 [Расслоенные..., 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..., 2004]. В гарцбургитах МПГ представлены преобладающими Pt-Fe сплавами (изоферроплатина), реже – арсенидами (сперрилит), теллуру-висмутидами (котульскит и мончеит), теллуридами (сопчеит и меренскиит) и висмуто-теллуридами (майченерит). В крупнозернистых ортопироксенитах, напротив, преобладают теллуру-висмутиды (мончеит и котульскит), теллуриды (кейтконнит) и висмуто-теллуриды (майченерит), реже встречаются арсениды (сперрилит), 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. %, 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

Проявление приурочено к породам краевой зоны массива Кумужья (рис. 3б): такситовым, средне-крупнозернистым оливинным и безоливинным 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 основания массива. 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 1–1.5 мм до 2 см, а наиболее крупные гнезда зачастую содержат включения ортопироксена и оливина. МПГ по данным (Иванченко, 2017 г.) представлены теллуру-висмутидами (котульскит), висмута-теллуридами (мончеит и майченерит), теллуридами (меренскиит) и висмутидами (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

Проявление 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 1 или 2

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 (рис. 3в).

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) 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 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 (рис. 3г). Всего выделяется от 2 до 6 рудных тел мощностью от 1.3 до 46 м, образующих рудную зону суммарной мощностью от 14 до 77 м, в среднем около 50 м. Отмечается 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 шлирами, 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 к югу от массива Морошковое озеро в крупнозернистых метагаббро. Мощность рудного

тела здесь достигает 22.5 м при средних содержаниях: Ni – 0.09 мас. %, Cu – 0.70 мас. %, Pt – 0.13 г/т, Pt – 0.89 г/т.

Проявление Поаз

Руда проявления в основном приурочена к меланоноритам-плагиоортопироксенитам нижней части массива Поаз (рис. 3д) 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 выделяется от 1 до 3 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-пирротинный состав и встречается в виде мелкой вкрапленности, реже гнезд в количестве от 1 до 5 об. %. В составе МПГ по данным (Иванченко, 2020 г.) преобладают теллуру-висмутиды (котульскит и мончеит), теллуриды (меренскиит), висмутиды (фрудит и соболевскит), висмито-теллуриды (майченерит) и висмито-антимониды (инсизваит), менее распространены станниды Pd (паоловит и атокит) и арсениды (сперрилит 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

Проявление приурочено к норитам и плагиоортопироксенитам нижней зоны массива Южная Сопча, прорванных жилами крупнозернистых габбро и габброноритов верхней зоны и находится на юго-восточном продолжении месторождения Южная Сопча (рис. 2). Оно представлено несколькими сближенными рудными телами сульфидной вкрапленности мощностью от 6 до 40 м, объединенными в пластообразную рудную зону суммарной мощностью около 70 м (рис. 3е). Ее внутреннее строение и морфология весьма сложные за счет чередования рудных и безрудных участков, раздувов и пережимов. Простираение рудной зоны северо-западное (310–320°), падение юго-западное под углом 15–20°. 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 (табл. 2) среди рассмотренных сульфидных месторождений и проявлений МРР.

Проявление Терраса

Проявление Терраса расположено в западной части массива Нюд (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 (рис. 3в) [Чащин 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 роговиков. Выше «критического» горизонта залегают нормальные нориты массива Нюд (рис. 3в). 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 (рис. 3в). 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, титаномагнетитом, ильменитом и хромитом. Составы МПГ в обоих рифах близки между собой и представлены теллуридами (меренскиит), теллуру-висмутидами (мончеит и котульскит), висмуто-теллуридами (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 месторождений является обогащение ЭПГ относительно сульфидной массы при подчиненной роли Ni и Cu, например,

[Служеникин и др., 1994; Додин и др., 2000; Налдретт, 2003; Шарков, 2006; Green, Peck, 2005; 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 платинометалльные месторождения, такие как риф Меренского Бушвельда (ЮАР), J-M риф Стиллуотера (США) и Главная сульфидная зона Великой Дайки (Зимбабве), поставляющие основную долю платиновых металлов на мировой рынок.

Месторождение Лойпишнюн

Это месторождение расположено в северо-восточной части Мончетундровского массива, вблизи зоны сочленения его с массивом НКТ Мончеплутона (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 выделено 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 (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 м. Зачастую рудные тела прорваны ультраосновными породами, дайками крупнозернистых габброидов и метадолеритов, а также смещаются вдоль тектонических зон (рис. 4) [Чащин и др., 2018].

Рудная зона 2 мощностью 5–35 м прослежена на протяжении 550 м и на северо-западном фланге срезается разломом субмеридионального направления (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 [Чащин 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 [Чащин и др., 2018].

В руде обнаружено 45 МПГ, среди которых ведущую роль играют сульфиды (куперит, брэггит и висоцкит), теллуру-висмутиды (мончеит и котульскит), теллуриды (кейтконнит, теларгпалит и теллурупалладинит), Pt-Fe сплавы (изоферроплатина) и арсениды (сперрилит, палладоарсенид, стиллуотерит и атенеит). В подчиненном количестве развиты соединения платиноидов и меди (скаергардит и хонгшиит), самородный палладий, станниды (станнопалладинитом) и плюмбиды (звягинцевит) [Чащин и др., 2018]. Средние содержания полезных компонентов по месторождению приведены в табл. 2, запасы – в табл. 3.

Месторождение Южная Сопча

Месторождение расположено в северо-восточной части одноименного массива, в зоне, примыкающей к массиву Сопча Мончеплутона (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 пластообразной 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 изомертиит), а также теллуру-висмутидов (мончеит 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

Это месторождение 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.

Платинометальная 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-шлировых 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 сульфоарсениды никеля (герсдорфит) и кобальта (кобальтин), сфалерит и галенит. Такое разнообразие рудных парагенезисов характеризует постмагматическую стадию рудообразования [Гроховская и др., 2000]. МПГ представлены теллуру-висмутитами (котульскит), теллуридами (меренскиит), висмуто-теллуридами (майченерит), висмутитами (соболевскит), арсенидами (сперрилит, гуанглинит и маякит) и сульфоарсенидами (холлингвортит, ирарсит и платарсит) [Гроховская и др., 2000]. Месторождение Вуручуайвенч характеризуется максимальными средними содержаниями Pt + Pd среди всех платинометальных месторождений и проявлений МРР (табл. 2). Средние содержания полезных компонентов в руде 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 рис. 7 представлена обобщенная модель условий локализации разных типов платинометальных руд МРР. Она демонстрирует закономерный характер размещения платинометальных 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 платинометальные месторождения МРР сходны с положением месторождений ЭПГ 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: Федоровотундровскому и Западно-Панскому, соответственно [Groshev et al., 2019].

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 обоих 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 Пенникат, Финляндия [Alarjetti, 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 (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 Appendix 1, 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 (рис. 9а). Исключение составляет месторождение РП330, фигуративные точки которого расположены выше общего тренда, за счет более высоких содержаний Ni в руде (рис. 9а), 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 (рис. 9б). В основном корреляция между содержаниями Pt + Pd и S, а также Ni отсутствует (рис. 9в-г), за исключением месторождения Западный Ниттис, для которого выявлена высокая положительная корреляция Pt + Pd с S и Ni (рис. 9в-г). Для некоторых месторождений и проявлений определена корреляционная зависимость между Pt + Pd и Cu: высокая для

месторождения Западный Нитгис, более слабая для проявления Арваренч и месторождения РПЗ30 (рис. 9д). В целом между содержаниями Pt и Pd существует положительная корреляционная зависимость, за исключением месторождения РПЗ30 и проявления Нюд (рис. 9е).

Малосульфидные Pt-Pd месторождения Вуручайвенч и Южная Сопча имеют отчетливые корреляционные связи содержаний Ni с S (рис. 10а), а Вуручайвенч и Лойпишнюн – более слабые корреляционные связи между Cu и S (рис. 10б). Корреляционная зависимость между содержаниями Pt + Pd и S во всех малосульфидных месторождениях отсутствует (рис. 10в), а с Ni и Cu высокая корреляция определена только для месторождения Вуручайвенч (рис. 9г-д). Между содержаниями Pt и Pd положительная корреляционная связь проявлена во всех малосульфидных Pt-Pd месторождениях, а наиболее высокая установлена для месторождения Вуручайвенч (рис. 10е).

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 относительно IЭПГ, наиболее высокое – в месторождении Вуручайвенч (табл. 4). Особенностью спектра ЭПГ в ЭПГ-Cu-Ni рудах является изрезанный характер графиков за счет положительных аномалий Ir и Rh, и отрицательных – Ru (рис. 11а). 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 слабо выраженной положительной аномалии Rh (рис. 11б).

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 (контактного) 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 тоже время, этот процесс может привести и к разбавлению ранее существовавшего богатого ЭПГ сульфидного расплава, например, [Hutchinson, 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 Морошковое озеро) происходило фракционирование сульфидной жидкости с обогащением ее Cu и просачиванием в породы фундамента (рис. 7). Пример аналогичной миграции сульфидной жидкости известен в расслоенной интрузии Суханко комплекса Портимо, где сульфидная минерализация богатая Cu и ЭПГ встречена в 30 метров ниже базального контакта интрузии [Pjina et al., 2015].

В основном этот рудный процесс протекал при величине R-фактора в диапазоне 3000–5000, модельном содержании сульфидов около 5 % (рис. 12а) и умеренном фракционировании сульфидной жидкости ($F = 0.25–0.50$, рис. 12б), 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, проявлений Поаз и верхнего рифа месторождения Терраса отличаются от выше приведенных: величина R-фактора составляет 10000 и модельное содержание сульфидов – 2–3 % (рис. 12а). По этим признакам руды этих месторождений 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 (рис. 9в). В тоже время, в ряде

случаев наблюдается значимая корреляция Pt + Pd с Cu (рис. 9d), что очевидно свидетельствует о фракционировании сульфидного расплава. Это подтверждается на примере проявления Арваренч, для руды которого характерно преобладание Cu над Ni (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, ассоциация которых, согласно экспериментальным данным [Makovicky, 2002], сосуществует при температуре <500 °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 ортопироксенитов и меньшей мощностью. Полученный возраст ортопироксенитов 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. По-видимому, 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 образованием 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 ортопироксенитов, что привело к их частичной амфиболизации и кристаллизации МПГ, преимущественно, висмута-теллуридного состава.

Альтернативная модель образования РП330 была предложена Karykowski et al. [2018b], согласно которой образование РП330 обусловлено внедрением многофазных кристаллических каш, часть из которых 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 месторождения Терраса также связано с инъекцией более примитивной серонасыщенной магмы в консолидированные нориты массива Нюд. При этом, соотношение ЭПГ и серы в верхнем и нижнем рифах заметно отличаются. Если в

руде верхнего рифа наблюдается положительная корреляция ЭПГ с серой, Ni и Cu, то в руде нижнего рифа такие связи отсутствуют (рис. 9в-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 платинометального рудообразования протекал при величине R-фактора 10000, модельном содержании сульфидов около 1 % (рис. 12а) и повышенном фракционировании сульфидной жидкости (F около 0.25, рис. 12б). Эти параметры свидетельствуют о том, что в их магматических камерах происходило образование небольшого количества сульфидов при высокой концентрации ЭПГ, способной к формированию Pt-Pd месторождений [Godel, 2015]. Что касается генезиса малосульфидных платинометальных месторождений, то в настоящее время широко распространенной является точка зрения, например, [Шарков, Богатиков, 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.

Это подтверждается на примере месторождения Лойпишнюн, где установлено, что рудообразование протекало в условиях изменчивой фугитивности серы [Чащин 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 интерстициях кумулатов ортопироксена [Чащин и др., 2017; 2018]. С заключительным этапом рудного процесса (<500 °С) связано растворение первичных МПГ и образование вторичных, обогащенных Cu соединений [Чащин и др., 2018]. Такой широкий температурный диапазон платинометального 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 месторождению Лойпишнюн и 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 автометасоматически измененных плагиоклазитов к горизонту такситового метагаббронорита, преобладанию Cu над Ni (табл. 2), высокой величиной фракционирования ЭПГ (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, 2005; Nielsen et al., 2005], хотя состав рудовмещающих пород в них заметно различается. Наиболее вероятно образование рифа Вуручуайвенч в результате фракционной кристаллизации мафитовой субкамеры Мончеплутона и, как следствие, существенного увеличения концентрации серы, растворенной в остаточной магме. На заключительном этапе фракционирования этот остаточный, обогащенный флюидами и ЭПГ интеркумулусный расплав мигрировал в верхнюю часть субкамеры, вызывая автометасоматические изменения породообразующих силикатов и образование МПГ в ассоциации с постмагматическими сульфидами.

Прогнозный потенциал и перспективы обнаружения новых месторождений

Перспективы МРР для наращивания запасов существующих 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 ортопироксенитов и гарцбургитов в нижней части массивов НКТ и Сопча по аналогии с локализацией платинометального оруденения в расслоенных интрузиях Мирабела (Бразилия) [Barnes et al., 2011] и Капалагулу (Танзания) [Maier et al., 2008]. В верхней части разреза НКТ благоприятна для обнаружения платинометального месторождения рифового типа зона ортопироксенитов массива Ниттис по аналогии с локализацией месторождения РП330. Кроме того, по данным (Иванченко, 2020 г.) существуют благоприятные предпосылки для обнаружения платинометальной 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 платинометальному сырью Кольского региона. Например, в настоящее время уже ведутся подготовительные работы на Федоровотундровском 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 платинометальных руд различных геолого-промышленных типов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С палеопротерозойскими (около 2.5 млрд. лет) расслоенными интрузиями МРР (Мончеплутоном 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 типа) и Терраса (рифовый тип). Малосульфидными Pt-Pd являются месторождения Лойпишнюн, Южная Сопча (базальный тип) и Вуручуайвенч (рифовый тип). Характерной особенностью сульфидных месторождений 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.

Месторождения этих двух типов 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, образованной вследствие контаминации основными и ультраосновными 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, богатой Cu и ЭПГ.

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

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 Свекофеннский 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 / Отв. ред. Г.И. Горбунов и Х. Папунен. Л., Наука, 1985, с. 27–94.

Гроховская Т.Л., Бакаев Г.Ф., Шелепина Е.П., Лапина М.И., Лапутина И.П., Муравицкая Г.Н. Платинометальная 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 платинометальная 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. Платинометальные 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)» / Ред. И.В. Таловина, Н.И. Воронцова и А.М. Дурягина. СПб., СПГУ, 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 / Гл. ред. Д.А. Додин. Красноярск, 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.

Криволицкая 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.

Минц 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., Рюнгенен 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. / Гл. 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 район: петрология, оруденение, изотопия, глубинное строение / Ред. Ф.П. Митрофанов и В.Ф. Смолькин. 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 бадделеита 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.

Смолькин 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.

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

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

Чащин 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.

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

Чащин 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.

Чащин В.В., Баянова Т.Б., Люлько М.С. Геологическое строение и U-Pb возраст массива габбро-норитов Кириха – Кольский п-ов, Россия // Геология и геохронология породообразующих и рудных процессов в кристаллических щитах. Материалы Всероссийской конференции / Ред. Ф.П. Митрофанов и Т.Б. Баянова. Апатиты, К & М, 2013, с. 179–181.

Чащин 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.

Чащин 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.

Чащин 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.

Чащин 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.

Чащин В.В., Петров С.В., Киселева Д.В., Савченко Е.Э. Платиноносность и условия образования сульфидного ЭПГ-Cu-Ni месторождения Нюд-II 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. Ottawa, Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum. 2002, v. 54, pp. 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 // Miner. 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., 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., 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, Canad. Ins. Mining Metal. Petr. 2002, v. 54, p. 431–458.

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., Gorbatschev 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 and C. Tegner. Springer, Dordrecht, Heidelberg, New York, London, 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, pp. 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 // Miner. Deposita, 2008, v. 43 (6), p. 695–711.

Iljina M., Maier W.D., Karinen T., Halkoaho T. PGE-(Cu-Ni) deposits of the Tornio-Näränkäväära belt of intrusions (Portimo, Penikat, and Koillismaa) // Mineral Deposits of Finland / Eds. W.D. Maier, R. Lahtinen and H. O'Brien. Elsevier, Amsterdam, Oxford, Walrtham, 2015, pp. 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 // Miner. 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, and H. O'Brien. Elsevier, Amsterdam, Oxford, Walrtham, 2015, pp. 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, Canad. Ins. Mining Metal. Petr., 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., 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.

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.

Подписи к рисункам

Рис. 1. Схема расположения палеопротерозойских расслоенных интрузий северо-восточной части Фенноскандинавского щита Европейской Арктической зоны, модифицировано с использованием материалов [Gaál, Gorbatshev, 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 и палеозойский осадочный чехол; 3 – палеопротерозойские гранулитовые пояса: Лапландский (Л), Кандалакшско-Колвицкий (КК); 4 – палеопротерозойские расслоенные интрузии: с возрастом 2.45 млрд. лет (а), с возрастом 2.50 млрд. лет (б); 5 – палеопротерозойские рифтогенные осадочно-вулканогенные пояса; 6–7 – архейские провинции: 6 – Карельская, 7 – Кольская; 8 – Беломорский подвижный пояс; 9 – контуры мантийных плюмов: более раннего (а), более позднего (б), по [Смолькин и др., 2009]. 1–18 – расслоенные интрузии и комплексы: 1 – Торнио, 2 – Кеми, 3 – Пеникат, 4 – комплекс Портимо, 5 – комплекс Коиллисмаа, 6 – Нярьякяваара 7 – Коителайнен, 8 – Аканваара, 9 – Олангский комплекс, 10 – Ковдозерская, 11 – г. Генеральская, 12 – Улитаозерская, 13 – Мончетундровская, 14 – Мончеплутон, 15 – Имандровский комплекс, 16 – Федоровотундровская, 17 – Панская, 18 – Бураковско-Аганозерский комплекс.

Рис. 2. Схема геологического строения Мончегорского рудного района.

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

Рис. 3. Схематические геологические разрезы, соответствующие профилям: а А – Б (массив Сопча), б В – Г (массив НКТ), в Д – Е (массив Нюд), г Ж – З (массив

Морошковое озеро), д И – К (массив Поаз), е Л – М (массив Арваренч), положение которых показано на рис. 2.

1-16 – породы: 1 – дайки метадолеритов, 2 – кварцевое метагаббро, 3 – метавулканисты, 4 – офитовые габбронориты, 5 – оливинный горизонт, 6 – лейкократовые метагаббро и метагаббронориты, 7 – нориты и ортопироксениты, 8 – метагаббронориты с прослоями метаплагиоклазитов, 9 – нориты мезократовые, 10 – меланонориты и плагиоортопироксениты, 11 – «критический» горизонт, 12 – ортопироксениты, 13 – переслаивание гарцбургитов и ортопироксенитов, 14 – гарцбургиты, 15 – трондjemиты, 16 – кварцевые гнейсо-диориты, 17 – сульфидные жилы, 18 – рудные зоны и тела сульфидной минерализации, 19 – буровые скважины.

Рис. 4. Схема геологического строения малосульфидного платинометального месторождения Лойпишнюн с разрезами по линиям I-I и II-II, по [Чащин и др., 2018].

1 – дайки метадолеритов (а), тоже самое вне масштаба (б); 2 – Мончетундровский массив: дуниты и гарцбургиты (а), метагаббронориты и лейкократовые метагаббро среднекрупнозернистые (б), ортопироксениты и меланонориты (в); 3 – гнейсы ставролит-гранат-биотитовые; 4 – малосульфидная платинометальная руда (а), тоже самое вне масштаба (б); 5 – буровые скважины (а), тоже самое на разрезах (б); 6 – разрывные нарушения.

Рис. 5. Схема геологического строения малосульфидного платинометального месторождения Южная Сопча и разрез по линии А-Б, по (Иванченко, 2009 г.).

1 – дайки метадолеритов; 2 – массив Южная Сопча: метаперидотиты (талек-хлорит-амфиболовые сланцы) (а), метагаббро и метагаббронориты (б), ортопироксениты и меланонориты (в); 3 – массив Сопча: ортопироксениты; 4 – диориты; 5 – малосульфидная платинометальная руда (а), тоже самое вне масштаба (б); 6 – буровые скважины (а), тоже самое на разрезе (б); 7 – разрывные нарушения.

Рис. 6. Схема геологического строения малосульфидного платинометального месторождения Вуручайвенч и разрез по линии А-Б, модифицировано с использованием материалов (Иванченко, 2009 г.).

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

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

Рис. 8. Классификационная диаграмма (Pt + Pd), г/т/S, мас. %–(Ni + Cu)/(Pt + Pd) для сульфидных ЭПГ-Cu-Ni и малосульфидных Pt-Pd месторождений и проявлений Мончегорского рудного района.

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

1-9 – месторождения и проявления: 1 – Западный Ниттис, 2 – НКТ, 3 – Нюд, 4 – Морошковое 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.

Рис. 10. Бинарные вариационные диаграммы халькофильных и сидерофильных элементов для средних составов малосульфидных Pt-Pd руд по рудным пересечениям: Ni, мас. %–S, мас. % (а), Cu, мас. %–S, мас. % (б), Pt + Pd, г/т– S, мас. % (в), Ni, мас. %–Pt + Pd, г/т (г), Cu, мас. %–Pt + Pd, г/т (д), Pt, г/т–Pd, г/т (е).

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.

Рис. 12. Диаграммы Cu/Pd–Pd, г/т, 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.

1-9 – 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; 10-12 – малосульфидные Pt-Pd месторождения и проявления: 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 рис. 12б сплошной черной линией показаны модельные составы сульфидов при разных величинах R -фактора. Черные пунктирные 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).

Табл. 1. Возраста пород Мончеплутона и Мончетундровского массива, полученные U-Pb методом по циркону (zrn) и бадделеиту (bdy)

Массивы	Породы	Возраста, млн. лет	Минералы	Источники
Мончеплутон				
НКТ	офитовый габбронорит кварцевый норит	2484.5 ± 7.9	zrn	Чащин, Савченко, 2021a
	краевой зоны дунит	2507 ± 9	zrn	Расслоенные..., 2004
Дунитовый Блок	хромовая руда	2500 ± 10	zrn	Чащин, Баянова, 2021
Нюд	габбро-пегматит	2500 ± 2	zrn	
	габбро-пегматит норит	2504.4 ± 1.5 2500 ± 5	zrn zrn, bdy	Amelin et al., 1995 Расслоенные..., 2004
Нюд-II	норит рудоносный	2493 ± 7	zrn	Balashov et al., 1993
	ортопироксенит	2503 ± 8	zrn	Чащин и др., 2016
Вуручайвенч	ортопироксенит	2506 ± 3	zrn	
	метагаббронорит	2497 ± 21	zrn, bdy	Расслоенные..., 2004
	метагаббронорит	2498.2 ± 6.7	bdy	
	метагаббронорит	2504.2 ± 8.4	zrn	Рундквист и др., 2014
	метаплагиоклазит	2507.9 ± 6.6	zrn	
	метагаббронорит	2504.3 ± 2.2	zrn	Чащин и др., 2016
	метаплагиоклазит	2494 ± 4	zrn	
Мончетундровский массив				
Лойпишнюн	ортопироксенит	2496.3 ± 2.7	zrn	
	норит	2500 ± 2	zrn	Чащин и др., 2020
Южная Сопча	метагаббро	2478 ± 20	zrn	
	метанорит рудоносный	2504 ± 1	zrn	Чащин и др., 2016

Табл. 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, мас. %	Cu, мас. %	S, мас. %	Pt, г/т	Pd, г/т	Pt + Pd, г/т	Pd/Pt	Cu/Ni	Cu/Pd	(Pt + Pd)/S	(Ni + Cu)/(Pt + Pd)
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
РП330 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

П р и м е ч а н и е. Средние содержания металлов и серы, а также запасы и прогнозные ресурсы металлов в табл. 3 приведены по данным:

¹(Казанов, 2016 г.), ²(Иванченко, 2009 г.), ³(Иванченко, 2017 г.), ⁴(Иванченко, 2020 г.).

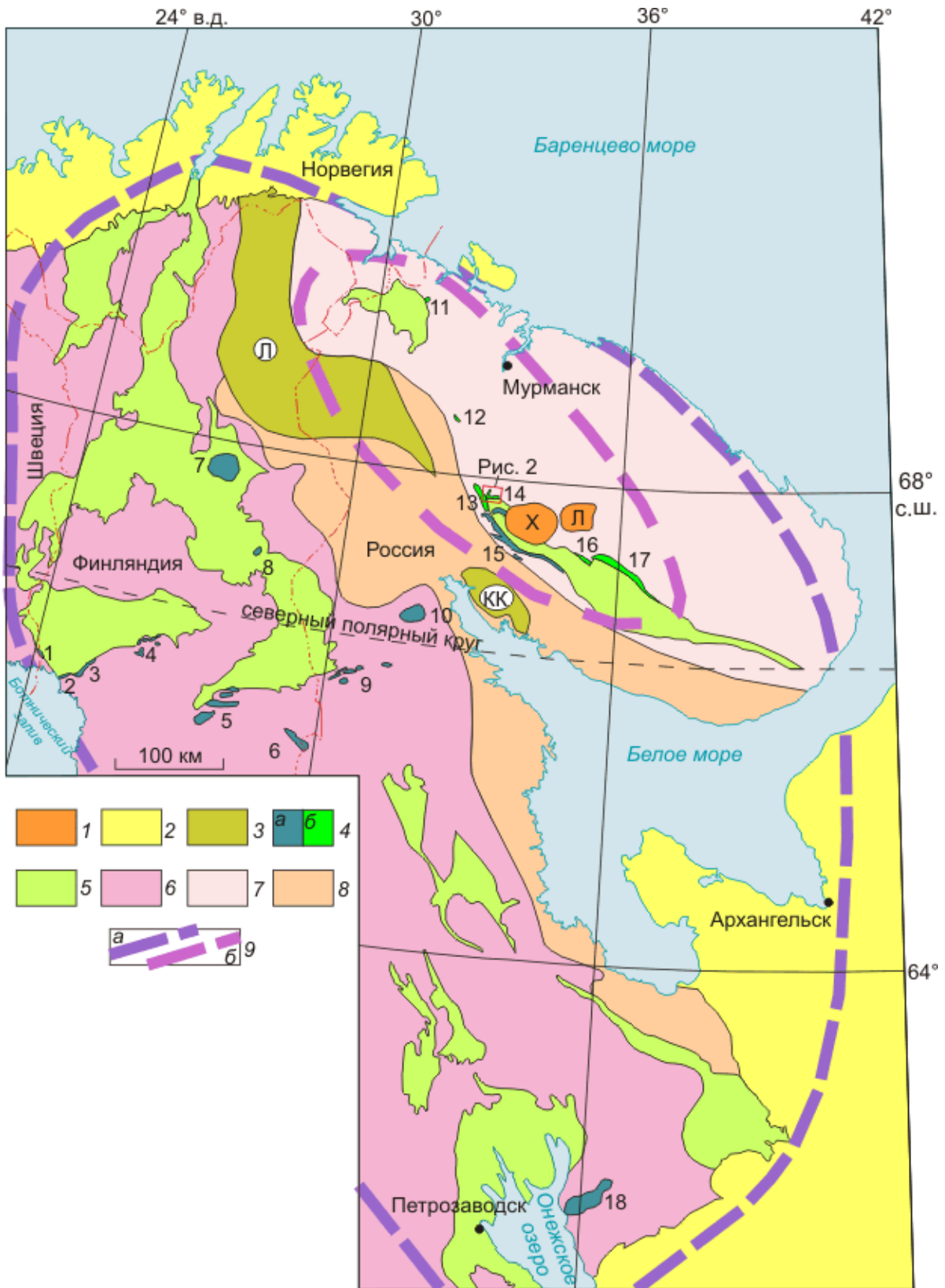
Табл. 3. Запасы и ресурсы металлов в сульфидных ЭПГ-Cu-Ni месторождениях и проявлениях и малосульфидных Pt-Pd месторождениях Мончегорского рудного района

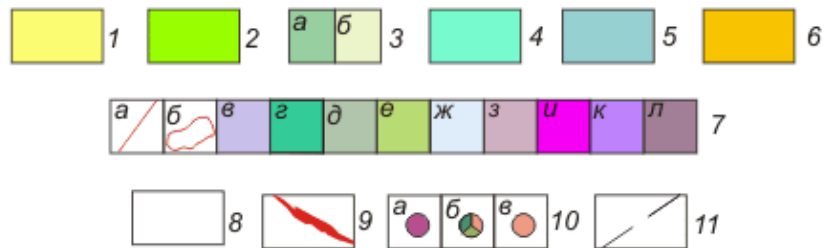
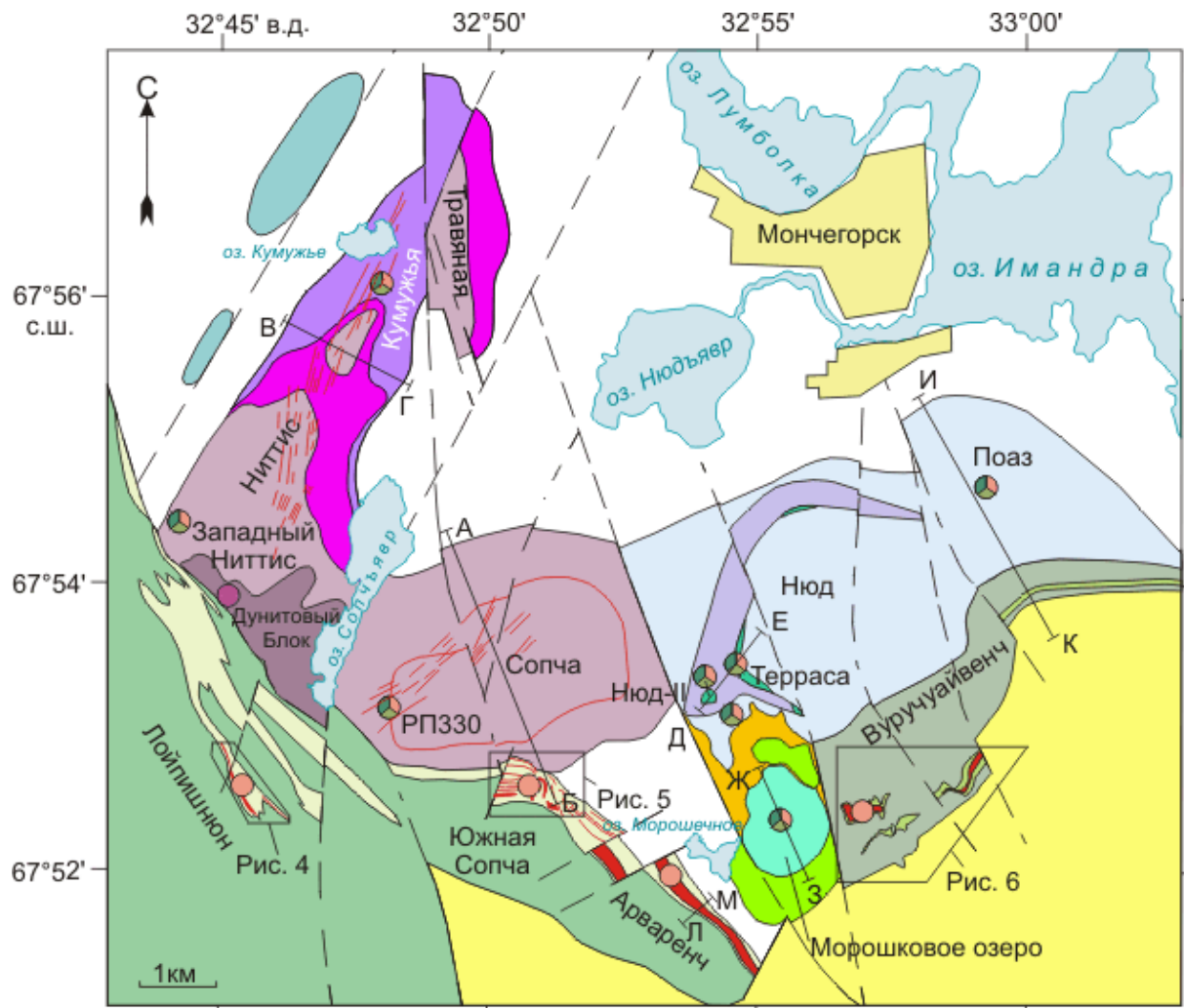
Месторождения и проявления	Ni, тыс. т	Cu, тыс. т	Pt, т	Pd, т	Pt + Pd, т
Сульфидные ЭПГ-Cu-Ni месторождения и проявления					
Западный Ниттис ¹	12	9	2	8	10
РПЗ30 ²	218	109	11	44	55
НКТ ³	298	229	19	55	74
Нюд ³	220	188	6	27	33
Морошковое озеро ³	208	172	8	37	45
Поаз ⁴	649	443	41	342	383
Арваренч ²	79	246	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
Вуручуайвенч ²	23	31	4	34	38

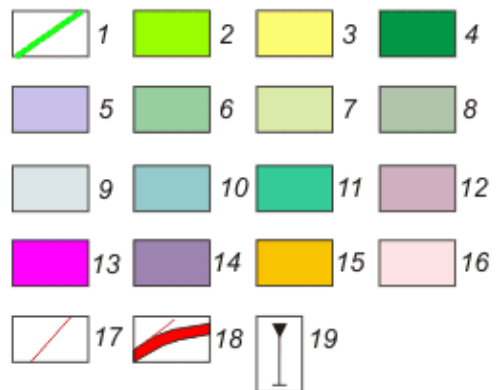
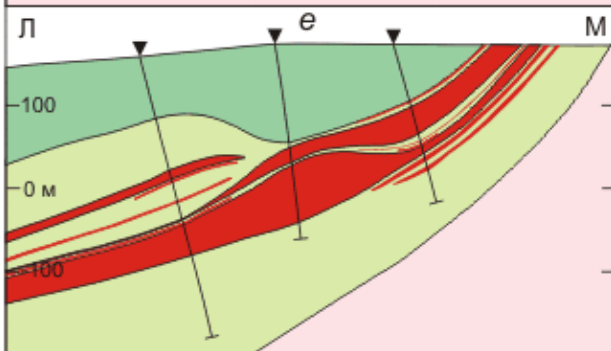
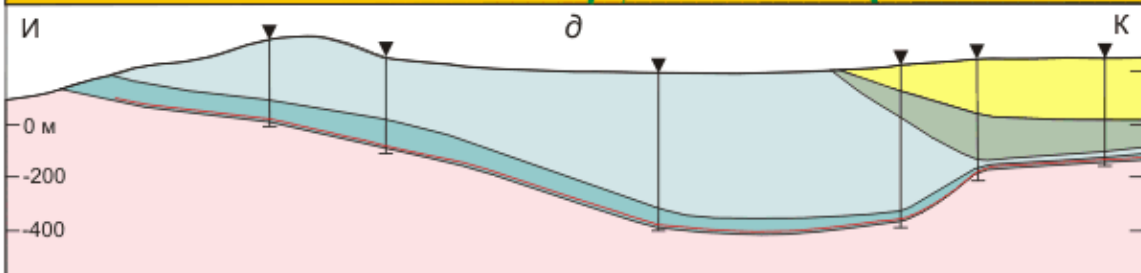
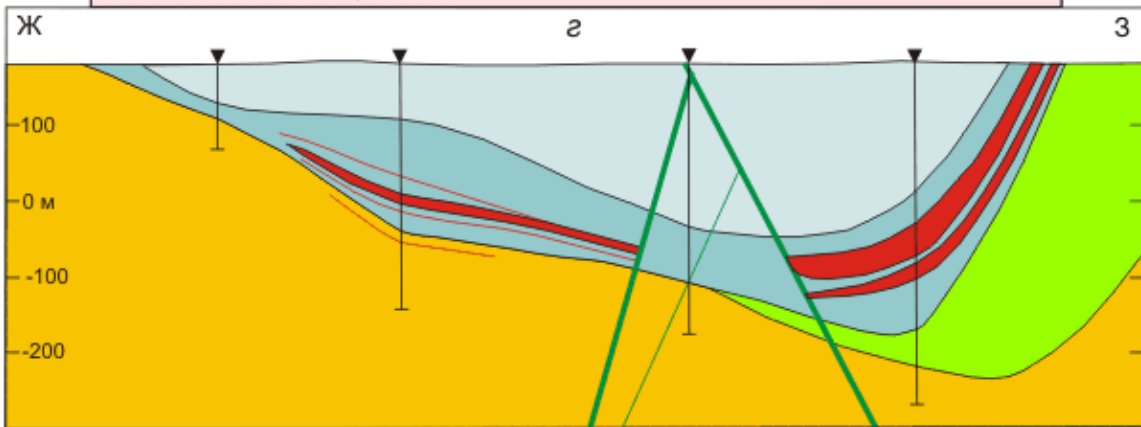
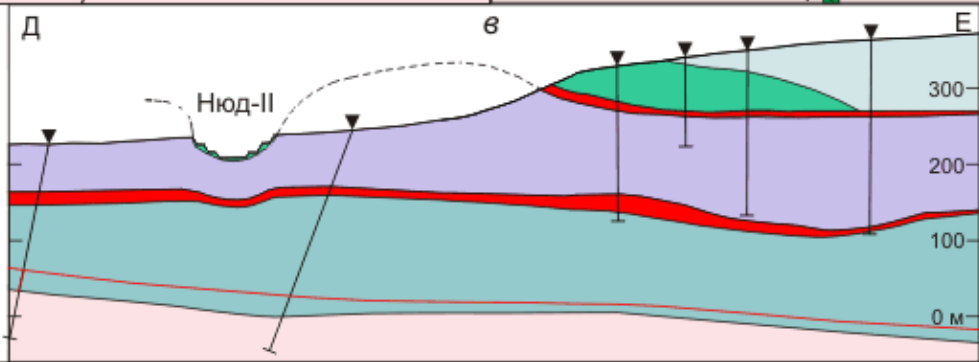
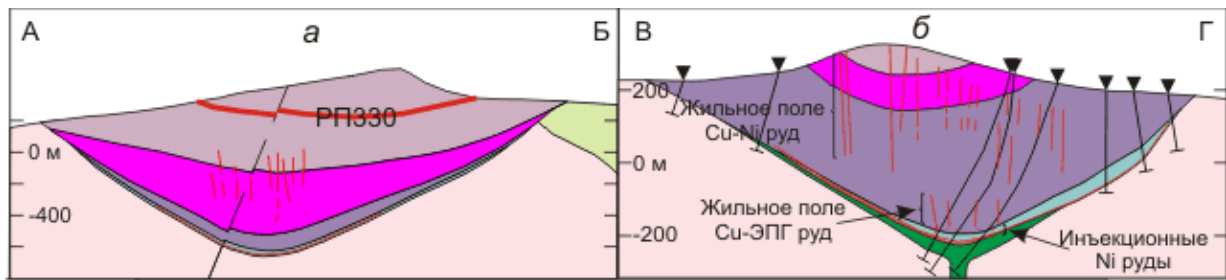
Табл. 4. Содержания ЭПГ, Au, Ni и Cu (г/т) в некоторых сульфидных ЭПГ-Cu-Ni проявлениях и малосульфидных Pt-Pd месторождениях Мончегорского рудного района

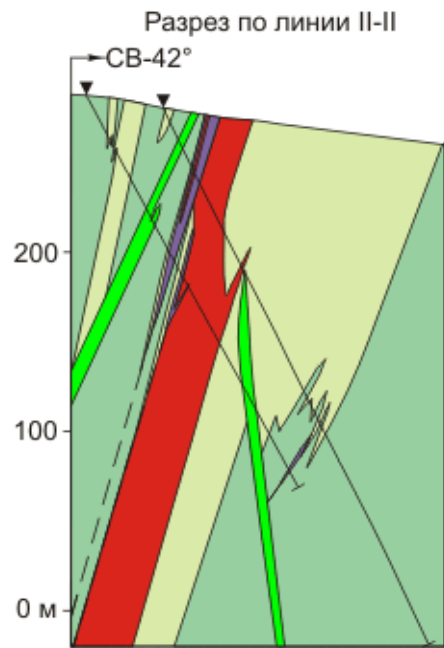
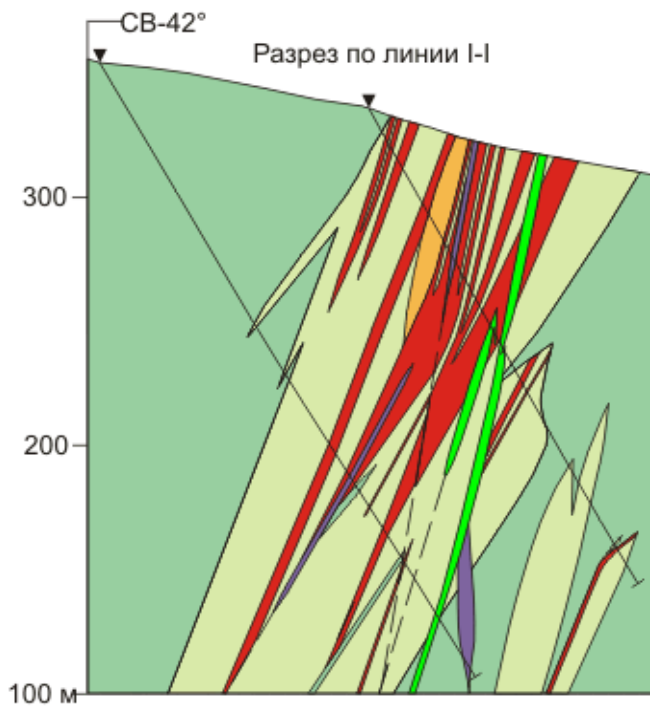
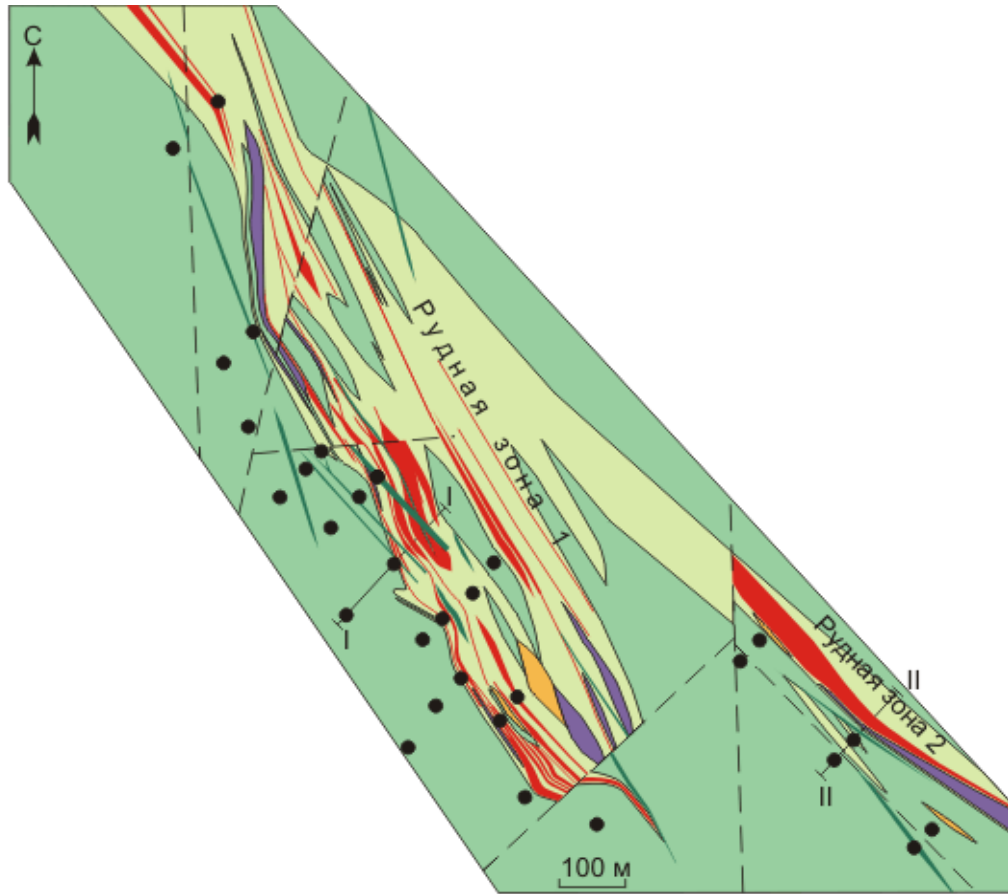
Месторождения и проявления	Верхний риф Террасы					Нижний риф Террасы					Южная Сопча					Вуручайвенч				
	Номера проб	425/1	425/2	425/3	425/4	Сред- нее	C-23/ 77.1	C-23/ 79.3	C-23/ 80.3	C-23/ 82.7	Сред- нее	C-4391/ 123.8	C-4391/ 141.7	C-4391/ 143.7	C-4391/ 153.5	C-4391/ 225.4	Сред- нее	419	419/1	Сред- нее
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	0.004	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	0.016	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	0.008	0.007	0.002	0.004
Rh	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	
Σ РЭПГ/ Σ ИЭПГ	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	

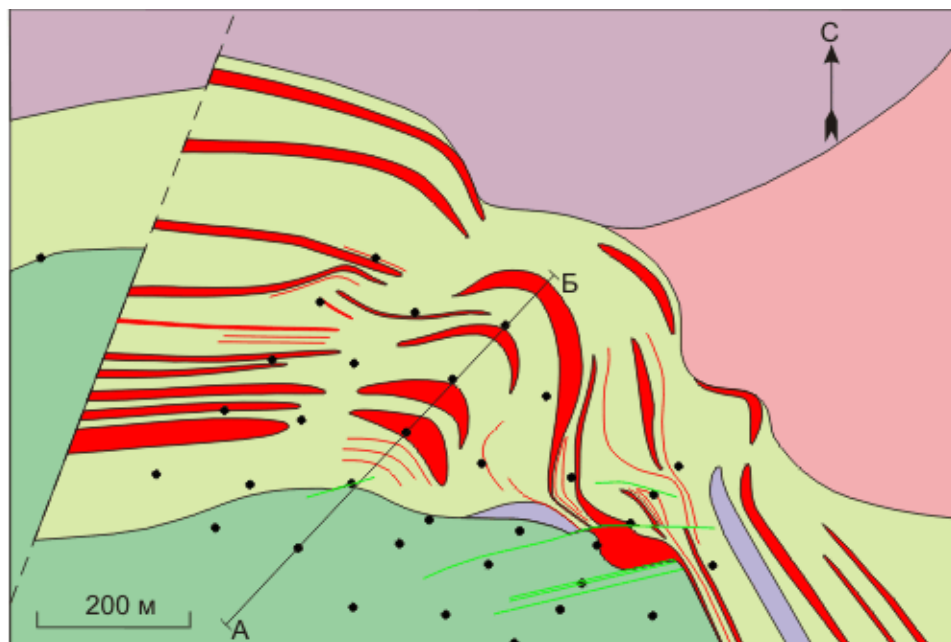
Примечание. РЭПГ: Pt, Pd, Rh; ИЭПГ: Os, Ir, Ru.











Разрез по линии А-Б

