

Платинометалльное оруденение контактового типа: от генетических моделей к новым рудным объектам

Грошев Н.Ю.¹, Karykowski B.T.², Арискин А.А.³, Maier W.D.⁴, Barnes S.-J.⁵, Припачкин П.В.¹, Рундквист Т.В.¹, Степенщиков Д.Г.¹, Чернявский А.В.¹, Компанченко А.А.¹, Каулина Т.В.¹, Сущенко А.М.¹

¹ Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты, groshev@ksc.ru

² АО Фольксваген, Берлин, bkarykowski@yahoo.com

³ Московский государственный университет, Москва, ariskin@rambler.ru

⁴ Кардиффский университет, Кардифф, MaierW@cardiff.ac.uk

⁵ Университет Квебека в Шикутими, Шикутими, sjbarnes@uqac.ca

Аннотация. На примере палеопротерозойского Мончегорского расслоенного комплекса предлагается выделять два генетических типа первично магматической медно-никелево-платинометалльной минерализации: 1) «гравитационный» и 2) «интрузивный». В докладе обсуждаются особенности формирования этих двух типов оруденения с акцентом на их потенциальном экономическом значении, а также первоочередные задачи тематических исследований.

Ключевые слова: медь, никель, элементы платиновой группы, сульфиды, Мончегорский комплекс.

PGE mineralization of the contact type: from genetic models to new ore objects

Groshev N.Yu.¹, Karykowski B.T.², Ariskin A.A.³, Maier W.D.⁴, Barnes S.-J.⁵, Pripachkin P.V.¹, Rundkvist T.V.¹, Stepenchikov D.G.¹, Chernyavsky A.V.¹, Kompanchenko A.A.¹, Kaulina T.V.¹, Sushchenko A.M.¹

¹ Geological Institute, KSC RAS, Apatity, groshev@ksc.ru

² Volkswagen AG, Berlin, bkarykowski@yahoo.com

³ Moscow State University, Moscow, ariskin@rambler.ru

⁴ Cardiff University, Cardiff, MaierW@cardiff.ac.uk

⁵ Université du Québec à Chicoutimi, Chicoutimi, sjbarnes@uqac.ca

Abstract. It is proposed to distinguish two genetic types of primary magmatic PGE-Cu-Ni mineralization of the contact type using the example of the Paleoproterozoic Monchegorsk Complex: 1) «gravitational» and 2) «intrusive». The presentation discusses features of the formation of these two types of mineralization with the emphasis on their potential economic value and major challenges for case studies.

Keywords: copper, nickel, platinum group elements, sulfides, Monchegorsk Complex.

Введение

Главным источником элементов платиновой группы (ЭПГ) в расслоенных интрузиях являются протяженные по латерали рифы, расположенные в пределах кумулятивных толщ интрузий. Месторождения рифов Меренского, UG-2 и J-M хорошо известны, они разрабатываются и обеспечивают большую часть мирового рынка ЭПГ. В последние годы резко возросло значение другого платинометалльного оруденения, расположенного вблизи основания интрузий и относимого к контактовому типу. Во-первых, это связано с открытием глубоких горизонтов Платрифа в Бушвельде, а именно месторождения Флэтриф (Grobler et al., 2019). Во-вторых, если рассматривать расслоенные интрузии Фенноскандии, то, по сравнению с оруденением внутри кумулятивных толщ, контактовое платинометалльное оруденение имеет здесь большие перспективы в виду соотношения объемов открытых запасов. На данный момент Суханко (Финляндия) и Федорова Тундра (Россия) – два главных проекта в регионе, нацеленные на оруденение контактового типа и близкие к стадии добычи руды (The Suhanko ..., 2022; Федорова Тундра ..., 2022).

Поисково-разведочные и тематические работы последних лет выявили большой потенциал платинометалльного оруденения контактового типа вблизи основания палеопротерозойского Мончегорского расслоенного комплекса, расположенного примерно в 120 км к югу от Мурманска. Разведка отдельных небольших участков комплекса, ориентированная на минерализованный контакт между интрузией и породами фундамента, показала 27.8 млн. тонн руды по категории C1 + C2 с содержанием Pt 0.6 ppm и Pd 1.1 ppm (Karykowski et al., 2018).

Мончегорский комплекс включает в себя преимущественно ультрамафитовую интрузию, известную как Мончеплутон (~ 65 км²), и мафитовые интрузии Главного хребта (~ 485 км²), в результате чего общая площадь комплекса составляет около 550 км² (врезка к рис. 1). Два магматических тела разделены Мончетундровским разломом северо-западного простирания (Шарков, 2006). Мончеплутон имеет серповидную форму и состоит из шести холмов, образующих две ветви: 7-километровый ультрамафитовый массив НКТ (горы Ниттис, Кумужья, Травяная) и 9-километровую ультрамафит-мафитовую ветвь, состоящую из гор Сопча, Нюд и Поаз. Кроме того, на пересечении двух ветвей находится «Дунитовый блок», тело ультраосновных пород, вмещающее Сопчеозерское хромитовое месторождение. Стратиграфию Мончеплутона можно разделить на пять основных зон (снизу вверх): (1) перидотитовая зона мощностью около 500 м, включая «Дунитовый блок»; (2) зона переслаивания перидотитов и пироксенитов мощностью до 300 м; (3) пироксенитовая зона мощностью > 750 м; (4) норитовая зона мощностью не менее 450 м и (5) габброноритовая зона мощностью более 700 м, включая интрузию Вуручайвенч, породы которой наращивают разрез нижележащей норитовой зоны (Rundkvist et al., 2016). К интрузиям Главного хребта относятся массивы Волчетундра, Мончетундра и Чунатундра, представляющие собой три тектонических блока первоначально единой интрузии мощностью более 2500 м. Эти интрузивы в основном имеют состав от лейкогабброноритов до анортозитов и, в целом, сходные разрезы (Sharkov, Chistyakov, 2012). Вероятно, интрузии Главного хребта являются продолжением габброноритовой зоны Мончеплутона.

В Мончегорском комплексе можно выделить два генетических типа магматического контактового платинометалльного оруденения (Расслоенные ..., 2004; Pripachkin et al., 2016; Groshev et al., 2018; Karykowski et al., 2018): 1) «гравитационный» и 2) «интрузивный».

Генетические модели

«Гравитационное» оруденение

Скважина МТ79 на горе Ниттис (рис. 1) показывает, что основная часть сульфидной минерализации, развитой на протяжении примерно 30 м в основании интрузии, содержится в породе того же типа, что и в вышележащей толще, представленной трахитоидным/расслоенным ортопироксенитом (Karykowski et al., 2018). Минерализованная зона в районе горы Нюд (скважина 1815) представляет собой пачку сульфидсодержащих меланоритов мощностью примерно 20 м, перекрытых аналогичными меланоритами без сульфидов. Профили по керну скважин показывают, что значительное накопление сульфидов (до 5 мас. % S) связано исключительно с базальной контактовой зоной каждой интрузии. Эти зоны характеризуются повышенными концентрациями цветных металлов, достигающими 2 мас. % Cu и Ni и 0,15 мас. % Co, тогда как концентрации благородных металлов могут достигать 3 ppm ЭПГ. Кроме того, платинометалльная минерализация содержится в различных архейских породах фундамента в непосредственной близости к мафит-ультрамафитовым минерализованным породам. Еще одна интересная зона минерализации находится примерно на 100 м выше базального контакта в районе горы Ниттис (МТ79, рис. 1). Минерализация приурочена к нескольким тонким халькопиритовым прожилкам, секущим ортопироксенитовые кумулаты на протяжении около 3 м пересеченной мощности, и может содержать более 30 ppm ЭПГ (*Cu-Pd минерализация*).

Этот тип оруденения, вероятно, встречается во всех периферийных краевых зонах Мончеплутона, сложенных такими же породами, что и в основных зонах. Расположение и особенности оруденения согласуются с моделью (Karykowski et al., 2018), где ключевым процессом формирования является эффективная аккумуляция сульфидов в краевых зонах интрузии, требующая многостадийного внедрения мафит-ультрамафитовых толщ и позволяющая достичь обширного частичного плавления фундамента. Его взаимодействие с магмой приводит к локальному добавлению в кристалли-

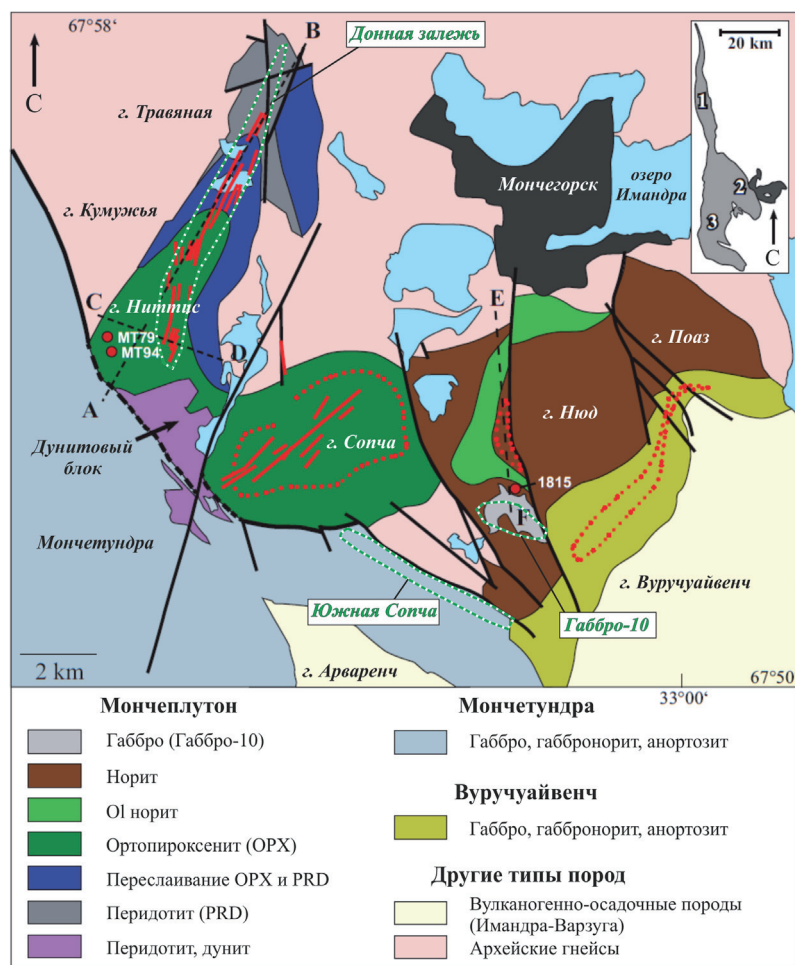


Рис. 1. Упрощенная геологическая карта Мончегорского комплекса, с изменениями по (Чашин, Митрофанов, 2014; Karykowski et al., 2018). Положение скважин, пересекающих контактное платинометалльное оруденение «гравитационного» типа показано красными кружками; распространение контактного платинометалльного оруденения «интрузивного» типа отмечено зелеными штриховыми линиями. Красные сплошные и штриховые линии соответствуют медно-никелево-платинометалльной минерализации в виде секущих жил массивных сульфидов и согласных горизонтов внутри интрузии соответственно. 1 – Волчетундра, 2 – Мончетундра, 3 – Чунатундра.

Fig. 1. Simplified geologic map of the Monchegorsk Complex, modified after (Chashchin and Mitrofanov, 2014; Karykowski et al., 2018). The location of diamond drill holes that crossed the «gravitational» PGE mineralization of the contact type is shown as red circles; «intrusive» contact-type PGE mineralization is marked by green dashed lines. Solid and dashed red lines indicate the Ni-Cu-PGE mineralization as cross-cutting veins and internal horizons respectively. 1 – Volchetundra, 2 – Monchetundra, 3 – Chunatundra.

ческую кашу воды и, возможно, углекислого газа, что приводит снижению вязкости интерстициального расплава и подплавлению кумулятивных фаз. Первое способствует гравитационному осаждению капель сульфидов, а второе увеличивает пористость кристаллической каши вблизи нижнего контакта интрузии, способствуя преимущественному накоплению сульфидной жидкости в основании.

«Интрузивное» оруденение

Этот тип оруденения приурочен к относительно эволюционированным типам пород, включая нориты, габбронориты и габбро, содержащим неравномерную вкрапленность или гнезда сульфидов, часто разнозернистым и всегда прорывающим более примитивные и безрудные породы комплекса. Минерализованные зоны залегают в виде магматических брекчий с оруденелыми породами в их цементе (например, «донная залежь» в осевой части краевой зоны массива НКТ, а также оруденение массива Габбро-10, рис. 1) или серий оруденелых жил преимущественно габброноритового состава, секущих ортопироксениты (массив Южная Сопча, рис. 1).

Ясного понимания происхождения этого оруденения в Мончегорском комплексе на данный момент нет. Однако, обращает на себя внимание сходство геологического строения этих минерализованных зон с месторождением Федорова тундра, для которого внедрение сульфидсодержащей магмы, обогащенной ЭПГ на глубине в промежуточном очаге, является классической моделью формирования (Groshev et al., 2019 и ссылки там). Возможно, эта модель более применима для массивов Габбро-10 и Южная Сопча (Prigachkin et al., 2015; Groshev et al., 2018), тогда как для «донной залежи» можно предложить альтернативу – нисходящую миграцию сульфидной жидкости (первый тип оруденения) вместе с силикатным расплавом вдоль контактов, наклоненных к центральным частям интрузии (рис. 2). Другая модель происхождения «донной залежи» связана с гипотезой о так называемой «ножке» Мончеплутона (рис. 2), представляющей собой питающий канал или норит-габброноритовую дайку, контролирующую распределение платинометалльной минерализации «интрузивного» типа и массивные сульфидные жилы (Иванченко, 2017).

Цели будущих исследований

Мы надеемся продолжить начатую в последние годы дискуссию о происхождении различных типов сульфидного оруденения в Мончегорском комплексе (например, Bekker et al., 2015; Yang et al., 2016; Karykowski et al., 2018). Относительно контактового платинометалльного оруденения наиболее интересны следующие вопросы. (1) Какой из двух типов оруденения – «гравитационный» или «интрузивный» – является экономически более значимым? (2) Существует ли генетическая связь между «интрузивным» контактовым оруденением и массивными сульфидными жилами, которые разрабатывались в Мончеплутоне до 1970-х годов (рис. 2)?

В связи с этой дискуссией одним из важнейших вопросов как в петрологическом, так и в практическом плане является оценка параметров родоначальной магмы для Мончегорского комплекса. Имеющиеся в литературе оценки, базирующиеся на данных о концентрации петрогенных элементов в породах и сделанные с использованием метода геохимической термометрии (Арискин, Бармина, 2000; Николаев, Арискин, 2014), относят родоначальную магму к бонинит-марианитовой серии с содержанием MgO до 14 мас. % (Семенов и др., 2021). В то же время при моделировании R-фактора для контактового платинометалльного оруденения Мончеплутона используется подходящая магма пикритового состава (Karykowski et al., 2018). Более того, детальные геохимические и минералого-геохимические данные по толще закаленных пород Бушвельдского комплекса указы-

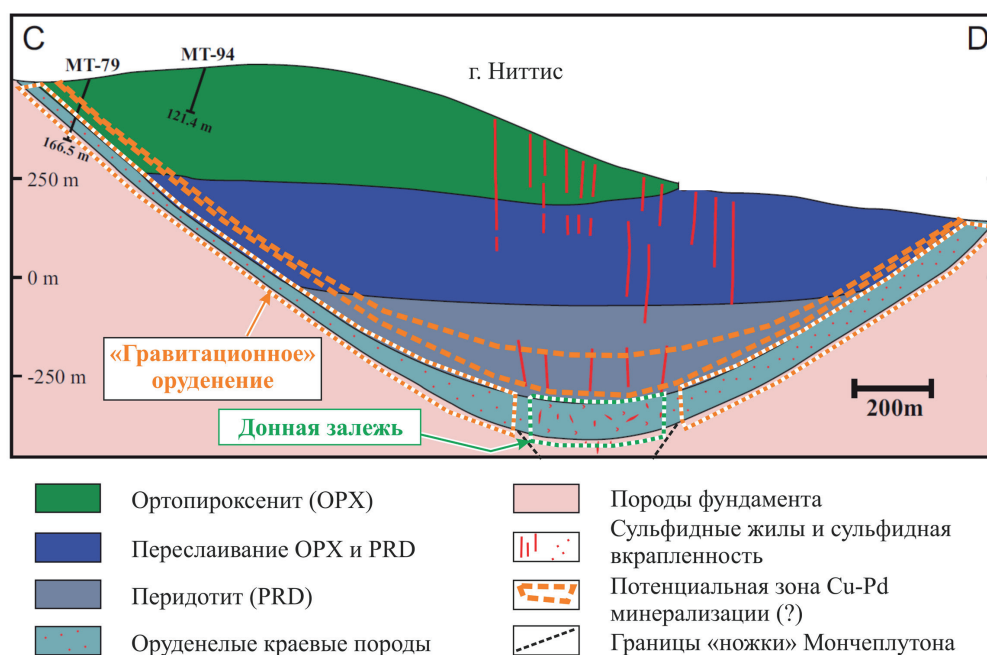


Рис. 2. Схематический геологический разрез, соответствующий профилю C-D на рис. 1.

Fig. 2. Schematic geologic cross section compliant with the profile C-D in Fig. 1.

вают на комагматическую магму, содержащую 19 мас. % MgO (Wilson, 2012). Для уточнения состава родоначальной магмы для Мончеплутона планируется детальное исследование наиболее примитивных пород в перидотитовой и приконтактовых зонах.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект 0226-2019-0053) и программы приграничного сотрудничества Коларктик (проект ARLIN KO5125).

Литература

1. Арискин А.А., Бармина Г.С. Моделирование фазовых равновесий при кристаллизации базальтовых магм. М. Изд-во: Наука. 2000. 365 с.
2. Иванченко В.Н. Поисковые работы на металлы платиновой группы в пределах Мончегорского рудного района (Мурманская область). М. Изд-во: Росгео. 2017.
3. Николаев Г.С., Арискин А.А. Бураковско-Аганозерский расслоенный массив Заонежья. II. Строение краевой группы и оценка состава родоначальной магмы методом геохимической термометрии // Геохимия. 2005. № 7. С. 712–732.
4. Расслоенные интрузии Мончегорского рудного района: петрология, оруденение, изотопия, глубинное строение. В 2 ч. Под ред. Ф.П. Митрофанова, В.Ф. Смолькина. Апатиты. Изд-во: КНЦ РАН. 2004. 344 с.
5. Семенов В.С., Коптев-Дворников Е.В., Семенов С.В., Корнеев С.И. Мончегорский интрузив: реконструкция (состав исходной магмы, расплава, P-T состояние, мощность интрузива) // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. № 2. 2021. С. 64–78.
6. Федорова Тундра – крупнейшее в Европе месторождение металлов платиновой группы URL: <https://fedorovoresources.ru/ru/#field> (дата обращения 22.03.2022)
7. Чашин В.В., Митрофанов Ф.П. Палеопротерозойская Имандра-Варзугская рифтогенная структура (Кольский полуостров): интрузивный магматизм и минерогения // Геод. и тектоноф. 2014. Т. 5. № 1. С. 231–256.
8. Шарков Е.В. Формирование расслоенных интрузивов и связанного с ними оруденения. М. Изд-во: Науч. мир. 2006.
9. Bekker A., Grokhovskaya T.L., Hiebert R. et al. Multiple sulfur isotope and mineralogical constraints on the genesis of Ni-Cu-PGE magmatic sulfide mineralization of the Monchegorsk Igneous Complex, Kola Peninsula, Russia // Miner. Depos. 2015. <https://doi.org/10.1007/s00126-015-0604-1>.
10. Grobler D.F. et al. Litho-and chemostratigraphy of the Flatreef PGE deposit, northern Bushveld Complex // Mineralium Deposita. 2019. V. 54. №. 1. P. 3–28. <https://doi.org/10.1007/s00126-018-0800-x>.
11. Groshev N.Y., Pripachkin P.V., Karykowski B.T. et al. Genesis of a Magnetite Layer in the Gabbro-10 Intrusion, Monchegorsk Complex, Kola Region: U–Pb SHRIMP-II Dating of Metadiorites // Geol. Ore Depos. 2018. 60 P. 486–496. <https://doi.org/10.1134/s1075701518060028>
12. Groshev N.Y., Rundkvist T.V., Karykowski B.T. et al. Low-Sulfide Platinum-Palladium Deposits of the Paleoproterozoic Fedorova-Pana Layered Complex, Kola Region, Russia // Minerals. 2019. 9. 764. <https://doi.org/10.3390/min9120764>.
13. Karykowski B.T., Maier W.D., Groshev N.Y. et al. Critical controls on the formation of contact-style PGE-Ni-Cu mineralization: Evidence from the paleoproterozoic Monchegorsk Complex, Kola Region, Russia // Econ. Geol. 2018. 113 P. 911–935. <https://doi.org/10.5382/econgeo.2018.4576>.
14. Pripachkin P.V., Rundkvist T.V., Miroshnikova Y.A. et al. Geological structure and ore mineralization of the South Sopchinsky and Gabbro-10 massifs and the Moroshkovoe Lake target, Monchegorsk area, Kola Peninsula, Russia // Miner. Depos. 2016. P. 973–992. <https://doi.org/10.1007/s00126-015-0605-0>.
15. Rundkvist T.V., Balashov Y.A., Skublov S.G. et al. Geochemistry and U–Pb age of zircons from the Vurechuaivench massif, Monchegorsk complex, Kola region // Geol. Ore Depos. 2016. 58 P. 525–535. <https://doi.org/10.1134/S1075701516070102>.
16. Sharkov E.V., Chistyakov A.V. The Early Paleoproterozoic Monchegorsk layered mafite-ultramafite massif in the Kola Peninsula: Geology, petrology, and ore potential // Petrology. 2012. 20. P. 607–639. <https://doi.org/10.1134/S0869591112070041>.
17. The Suhanko Project could be the next mining operation to be implemented in Finland URL: <https://www.suhanko.com/what> (дата обращения 22.03.2022)
18. Wilson A. H. A chill sequence to the Bushveld Complex: insight into the first stage of emplacement and implications for the parental magmas // Journal of Petrology. 2012. V. 53. №. 6. P. 1123–1168. <https://doi.org/10.1093/petrology/egs011>.
19. Yang S.H., Hanski E., Li C. et al. Mantle source of the 2.44–2.50-Ga mantle plume-related magmatism in the Fennoscandian Shield: evidence from Os, Nd, and Sr isotope compositions of the Monchepluton and Kemi intrusions. Miner. Depos. 2016. 51. P. 1055–1073. <https://doi.org/10.1007/s00126-016-0673-9>.