

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕННЫХ МЕТАЛЛОВ В ИЗМЕЛЬЧЕННЫХ МАЛОСУЛЬФИДНЫХ ПЛАТИНОМЕТАЛЛЬНЫХ РУДАХ КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА

МАРЧЕВСКАЯ В. В., МУХИНА Т. Н., ХАШКОВСКАЯ Т. Н.

Платинометалльное оруденение интрузивов Кольского полуострова повсеместно ассоциирует с сульфидной медно-никелевой минерализацией, причем зерна платиновых минералов и их сростки часто находятся в краевой или внутренней частях сульфидов. В статье представлены результаты изучения раскрытия основных сульфидных минералов малосульфидных платинометалльных руд на материале двух проб, отобранных на месторождениях Мончегорского плутона и Панского интрузива, и его влияния на показатели обогащения. Для пентландита наиболее распространенными являются бедные сростки с пирротином, а также трехфазные сростки, сложенные нерудным минералом с фазами пирротина и пентландита. Для халькопирита, наоборот, характерны бедные сростки с нерудными минералами. Показано, что главные минералы цветных металлов пентландит и халькопирит высвобождаются из сростков с породными минералами только в материале крупностью менее 25 мкм. Между количеством сростков минералов цветных металлов с породными в руде и потерями цветных и благородных металлов с флотационными хвостами наблюдается тесная прямая корреляционная связь с коэффициентом корреляции не менее 0,85. Максимальное концентрирование благородных и цветных металлов в малосульфидных рудах Кольского полуострова наблюдается в материале крупностью от 10 до 25 мкм.

Ключевые слова: малосульфидные платинометалльные руды; минералы платиновых металлов; сульфиды; нерудные минералы; цветные металлы; благородные металлы; сростки зерен.

Наиболее значимыми рудными узлами Кольской платинометалльной провинции являются Федорово-Панская расслоенная интрузия и Мончегорский плутон, в которых выявлены малосульфидные платинометалльные месторождения и рудопроявления. Федорово-Панский расслоенный интрузивный комплекс состоит из трех самостоятельных блоков: Федорова Гундра, Западно-Панский и Восточно-Панский. Платинометалльное оруденение интрузивов повсеместно пространственно и генетически связано с сульфидной медно-никелевой минерализацией [1–9].

Основными формами концентрации платиновых металлов в малосульфидных рудах являются их собственные минералы – висмутотеллуриды, арсениды и сульфиды палладия и платины, а также твердые растворы палладия в пентландите. Золото присутствует в виде золото-серебряных сплавов. Типичное положение относительно крупных зерен минералов платиновой группы (около 20 мкм) – на границе с сульфидом, в ореольной зоне тонкозернистых сульфидов и вторичных силикатов. В связи с тем, что зерна платиновых минералов, их сростки, а также золото часто находятся в краевой или внутренней частях сульфидных зерен

Марчевская Валентина Викторовна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник. 184209, г. Апатиты, ул. Ферсмана, 24, Горный институт Кольского научного центра РАН. E-mail: vvm@goi.kolasc.net.ru

Мухина Татьяна Николаевна – кандидат технических наук, заведующая сектором. 184209, г. Апатиты, ул. Ферсмана, 24, Горный институт Кольского научного центра РАН. E-mail: muhina@goi.kolasc.net.ru

Хашковская Татьяна Николаевна – главный специалист. 195220, г. Санкт-Петербург, Гражданский просп., 11, ООО «Институт Гипроникель». E-mail: TNHas@nikel.spb.su

и агрегатов, изучено раскрытие основных сульфидных минералов малосульфидных руд [5–7, 10, 11].

Исследования распределения ценных металлов в малосульфидных рудах проведены на материале двух технологических проб № MS1 и № MS2, отобранных на месторождении Мончегорского плутона и месторождении Панского интрузива соответственно. Частные представительные пробы из дробленого материала технологических проб были измельчены в лабораторной мельнице и предварительно расклассифицированы на ситовом анализаторе «Ротап», а материал крупностью менее 45 мкм – на анализаторе гранулометрического состава Cyclosizer модели LF-II.

Таблица 1

Содержание цветных и благородных металлов в пробах

Проба	Ni, %	Cu, %	Pt, г/т	Pd, г/т	Au, г/т	ΣБМ, г/т
№ MS1	0,22	0,35	0,43	3,65	0,16	4,24
№ MS2	0,09	0,10	0,43	3,00	0,11	3,54

Главными рудообразующими сульфидами исследованных руд являются минералы цветных металлов пентландит и халькопирит (при преобладании второго), а также пирротин, слагающие не менее 95 % рудной минерализации. Поскольку пентландит – концентратор не только никеля, но и 30–50 % палладия от общего баланса этого металла в руде, он является наиболее важным сульфидным минералом.

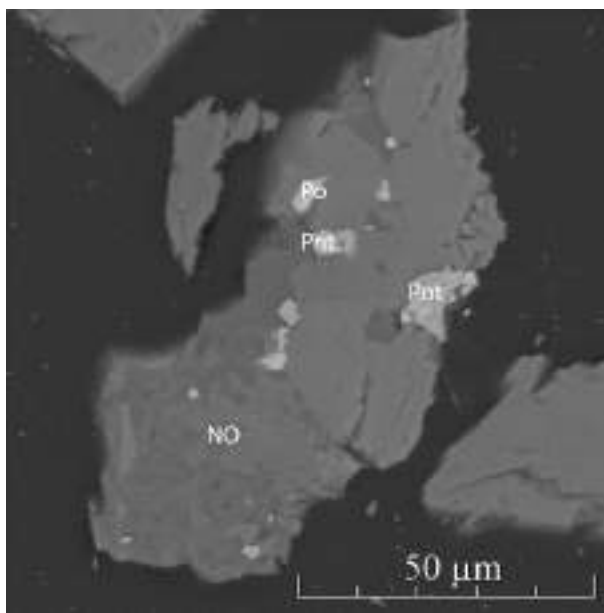


Рис. 1. Включения пирротина Po и пентландита Pnt в частице нерудного минерала NO пробы № MS2, класс крупности –71+45 мкм. Съемка в отраженных электронах

Из платиновых минералов в пробе № MS1 наиболее распространены арсениды палладия и платины: палладоарсенид, стиллуотерит, меньшековит, сперрилит, висмутотеллуриды палладия котульскит и меренскиит; в значительно меньших количествах в руде присутствует сульфоарсенид платиновых металлов холлингвортит. В пробе № MS2 наиболее распространенными являются висмутотеллуриды и сульфиды палладия и платины: котульскит, меренскиит, мончеит, высоцкит,

брэггит; в подчиненном количестве присутствуют арсениды платины и палладия сперрилит и стиллуотерит. Золото в обеих пробах присутствует в виде золото-серебряных сплавов разнообразного состава. Содержание цветных и благородных металлов представлено в табл. 1.

Изучение раскрытия сульфидов в пробах проведено оптическим методом путем прямого подсчета зерен сульфидных минералов под микроскопом Leica. Подсчет проводился в искусственных препаратах – аншлифах – на основе эпоксидных смол, изготовленных из расклассифицированного материала проб № MS1 и № MS2.

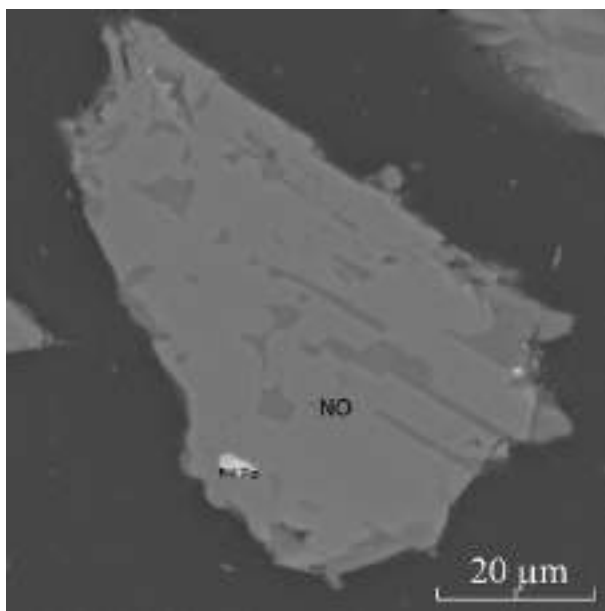


Рис. 2. Сrostок пирротина Po и пентландита Pnt в частице нерудного минерала NO пробы № MS1, класс крупности –71+45 мкм. Съемка в отраженных электронах

Установлено, что для пентландита наиболее распространенными являются сростки с пирротином, а также трехфазные сростки, которые в большинстве сложены нерудным минералом с зерном пирротина, в котором присутствует фаза пентландита. Наиболее часто, особенно в пробе № MS2, пентландит представлен бедными сростками с пирротином с долей пентландита менее 10 % (рис. 1, 2). Мономинеральный пентландит в сростках с силикатами встречается редко.

Сростки халькопирита с нерудными минералами – наиболее часто встречающиеся, а трехфазные сростки, сложенные нерудными минералами с мелкими включениями пирротина и халькопирита, наблюдаются в небольшом количестве. В большинстве случаев халькопирит с нерудными минералами представлен также бедными сростками с долей халькопирита менее 20 % (рис. 3). Сростки с долей халькопирита 20–50 % встречаются значительно реже и только в пробе № MS1. В этой же пробе наблюдаются отдельные зерна халькопирита с включениями тонких фаз пентландита.

Большая часть пирротина в обеих пробах находится в свободных зернах, небольшая часть – в сростках с пентландитом или входит в состав бедных сростков с нерудными минералами, которые представляют собой мелкие включения пирротина в нерудных минералах, а также в трехфазных сростках состава *пентландит+пирротин+нерудные минералы*. Присутствуют единичные сростки пирротина и халькопирита.

Доля свободного пентландита изменяется: в пробе № MS1 – от 3 % в классе +71 мкм до 56 % в тонких классах –25 мкм, в пробе № MS2 – от 17 до 78 % соответственно.

Трехфазные сростки с пентландитом в обеих пробах раскрываются эффективно, их количество – от 50–56 % в классе +71 мкм до 10–30 % в классе –45+25 мкм и менее 0,1 % в более мелком материале. Доля пентландита в сростках с пирротином меняется слабо: от 28–35 % в классе +71 мкм до 22–33 % в классе –25+10 мкм. Это свидетельствует о преимущественном высвобождении пентландита из нерудных минералов в материале крупностью менее 25 мкм и лишь частичном – из сростков с пирротинном.

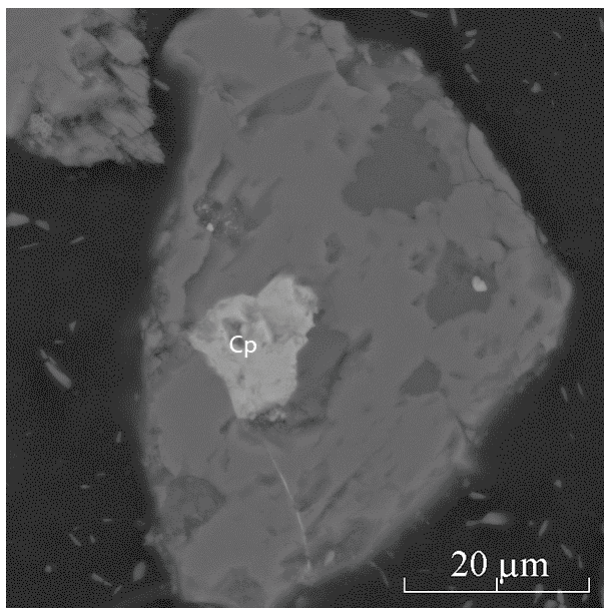


Рис. 3. Включение халькопирита Ср в частице нерудного минерала пробы № MS2, класс крупности –71+45 мкм. Съемка в отраженных электронах

Доля свободного халькопирита в пробах изменяется от 13–18 % в классе +71 мкм до 87–90 % в тонких классах –25 мкм.

Высвобождение халькопирита из сростаний с нерудными минералами происходит эффективно: от 66–73 % в классе +71 мкм до 10 % в тонких классах. Также эффективно раскрываются многофазные сростки: от 13–16 % в классе +71 мкм до 3–6 % в классе –45+25 мкм и менее 0,1 % в тонких классах –25 мкм.

Пирротин является хорошо раскрытым минералом, доля свободного пирротина в классе +71 мкм составляет 30 %, в классе –71+45 мкм достигает 53 %, в материале мельче 25 мкм он почти полностью высвобождается из трехфазных сростков и на 94–97 % из сростков с породными минералами.

Для сульфидной флотации важно высвобождение сульфидных минералов от породных. При разной степени измельчения малосульфидных руд увеличение тонины помола с 76,5 до 93,5 % класса –71 мкм приводит к суммарному уменьшению сростков пентландита (мономинеральных и трехфазных) с породными минералами с 25 до 19 % в руде пробы № MS2 месторождения Панского интрузива и с 22 до 14,5 % в руде пробы № MS1 Мончегорского плутона. При этом суммарное уменьшение сростков халькопирита с породными минералами составляет от 45 до 36 % в руде пробы № MS2 и от 36,5 до 29 % в руде пробы № MS1.

По результатам серии флотационных опытов на материале малосульфидных руд Панского интрузива с выделением черного концентрата и отвальных хвостов при использовании традиционного реагентного режима с оптимизацией фронта флотации установлено, что между количеством сростков минералов цвет-

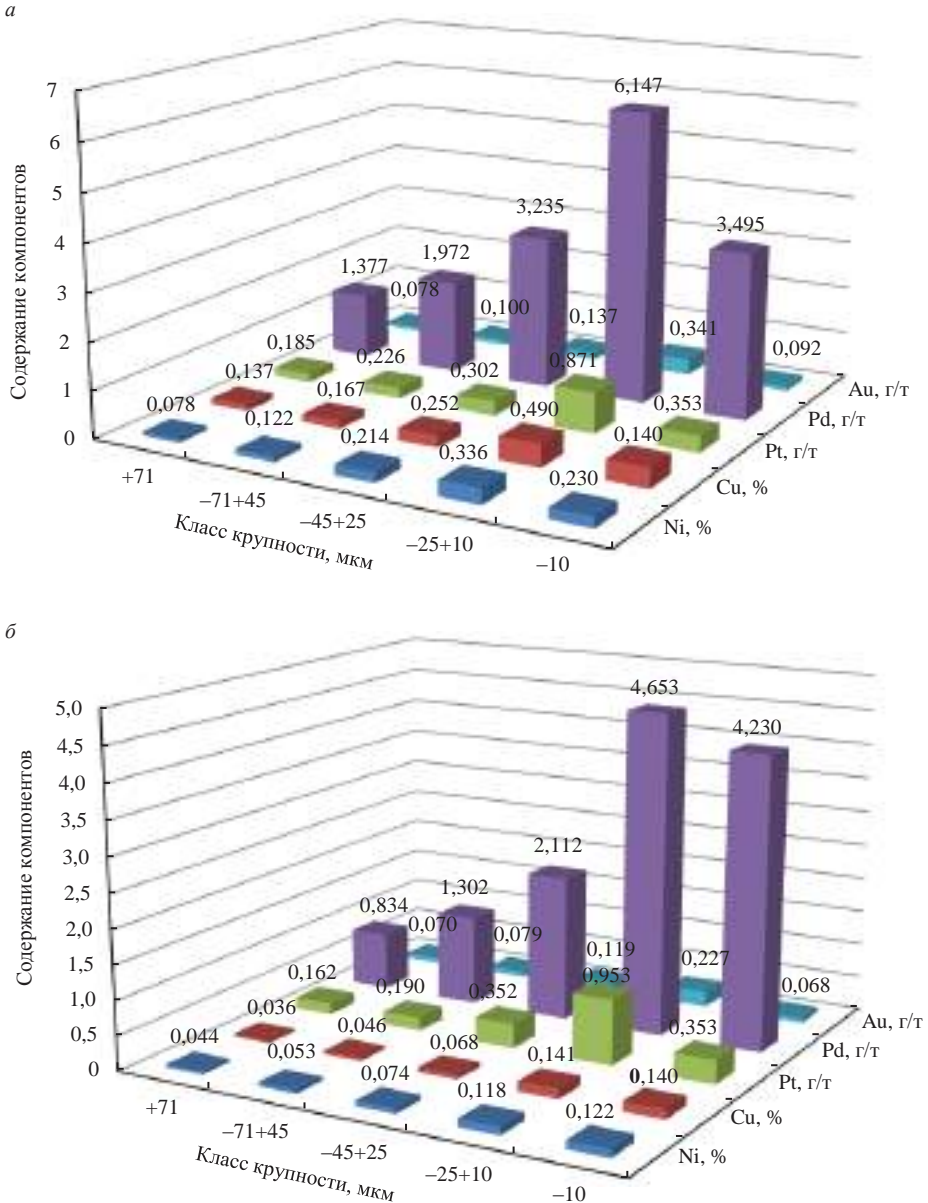


Рис. 4. Массовая доля цветных и благородных металлов в расклассифицированном материале малосульфидных руд крупностью менее 100 мкм:
 а – руда пробы № MS1; б – руда пробы № MS2 с ультратонкозернистым пентландитом

ных металлов с породными и потерями цветных и благородных металлов с хвостами наблюдается тесная прямая корреляционная связь с коэффициентом корреляции не менее 0,85. Зависимость описывается полиномом второй степени. При отмеченном уменьшении сростков снижение потерь ценных компонентов с хвостами флотации составило: никеля – с 24,0 до 17,5 %; меди – с 15,0 до

9,0 %; платины – с 11,5 до 7,9 %; палладия – с 15,7 до 9,0 %; золота – с 33,4 до 19,0 %.

Результаты аналитических определений ценных металлов в расклассифицированном материале малосульфидных руд проб № MS1 и № MS2 представлены в табл. 2 и на рис. 4, из которых следует, что максимальное концентрирование минералов цветных и платиновых металлов происходит в материале крупностью от 10 до 25 мкм. При наличии в руде пробы № MS2 ультратонкозернистого пентландита при массовой доле никеля около 0,1 % в более мелком материале (менее 10 мкм) снижение содержания никеля не происходит, а палладия составляет менее 10 % при уменьшении массовой доли остальных благородных металлов на 60–70 отн. %. Это обусловлено тем, что пентландит является концентратором не только никеля, но и 30–50 % палладия в общем балансе этого металла.

Таблица 2

Массовая доля ценных металлов в материале малосульфидных руд крупностью менее 100 мкм

Класс крупности, мкм	Руда пробы № MS1					Руда пробы № MS2				
	Ni, %	Cu, %	Pt, г/т	Pd, г/т	Au, г/т	Ni, %	Cu, %	Pt, г/т	Pd, г/т	Au, г/т
+71	0,078	0,137	0,18	1,38	0,08	0,044	0,036	0,16	0,83	0,07
–71+45	0,122	0,167	0,23	1,97	0,10	0,053	0,046	0,19	1,30	0,08
–45+25	0,214	0,252	0,30	3,24	0,14	0,074	0,068	0,35	2,11	0,12
–25+10	0,336	0,490	0,87	6,15	0,34	0,118	0,141	0,95	4,65	0,23
–10	0,230	0,430	0,35	3,50	0,09	0,122	0,140	0,35	4,23	0,07

Полученные результаты минералого-технологических и аналитических исследований свидетельствуют о необходимости повышения доли материала –25+10 мкм в питании флотации малосульфидных руд.

Итак, показано, что главные минералы цветных металлов малосульфидных благороднометалльных руд пентландит и халькопирит высвобождаются из сростков с породными минералами только в материале крупностью менее 25 мкм. Между количеством сростков минералов цветных металлов с породными в руде и потерями цветных и благородных металлов с флотационными хвостами наблюдается тесная прямая корреляционная связь с коэффициентом корреляции не менее 0,85.

Впервые установлено, что максимальная концентрация благородных и цветных металлов в малосульфидных рудах Кольского полуострова наблюдается в материале крупностью от 10 до 25 мкм. В случае наличия в руде крайне тонкозернистого пентландита при массовой доле никеля не выше 0,1 % в более мелком материале снижение содержания никеля не происходит, а палладия составляет менее 10 отн. % при уменьшении массовой доли остальных благородных металлов на 60–70 отн. %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Додин Д. А. Минерально-сырьевые ресурсы Арктики. М.: Геоинформмарк, 2005. 176 с.
2. Додин Д. А. Устойчивое развитие Арктики. Проблемы и перспективы. СПб: Наука, 2005. 279 с.
3. Митрофанов Ф. П., Баянова Т. Б., Корчагин А. У., Грошев Н. Ю., Малич К. Н., Жиров Д. В., Митрофанов А. Ф. Восточно-Скандинавская и Норильская плюмовые базитовые обширные изверженные провинции Pt-Pd руд: геологическое и металлогенетическое сопоставление // Геология рудных месторождений. 2013. Т. 55, № 5. С. 357–373.
4. Кольская платиноносная провинция / Ф. П. Митрофанов [и др.] // Платина России. Проблемы развития минерально-сырьевой базы платиновых металлов: сб. науч. трудов. М.: Геоинформмарк, 1994. С. 66–77.
5. Особенности геологического строения Федорово-Панского расслоенного массива и проявления платиновых металлов в его восточной части / А. У. Корчагин [и др.] // Платина России. Про-

блемы развития, оценки, воспроизводства и комплексного использования минерально-сырьевой базы платиновых металлов: сб. науч. трудов. М.: Геоинформмарк, 2004. С. 143–152.

6. Субботин В. В., Корчагин А. У., Савченко Е. Э. Платинометаллическая минерализация Федорово-Панского рудного узла: типы оруденения, минеральный состав, особенности генезиса // Вестник КНЦ. 2012. № 1. С. 55–66.

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

8. Иванченко В. Н., Давыдов П. С. Основные черты геологического строения месторождений и проявлений МПГ южной части Мончегорского рудного района // Стратегические минеральные ресурсы Лапландии – основа устойчивого развития Севера: сб. матер. Апатиты: КНЦ РАН, 2009. С. 70–78.

9. Припачкин П. В., Рундквист Т. В. Геологическое строение и платиноносность восточной части Сопчинского пласта «330» (Мончегорский плутон, Кольский полуостров) // Руды и металлы. 2007. № 1. С. 44–50.

10. Балабонин Н. Л., Субботин В. В., Скиба В. И., Войтеховский Ю. Л., Савченко Е. Э., Пахомовский Я. А. Формы нахождения и баланс благородных металлов в рудах Федорово-Панской интрузии (Кольский полуостров) // Обогащение руд. 1998. № 6. С. 24–30.

11. Минеральный состав оруденения нового платинометаллического месторождения Сев. Каменник, Зап.-Панский массив, Кольский п-ов / В. В. Субботин и др. // Геология и стратегические полезные ископаемые Кольского региона: тр. XII Всерос. Ферсмановской науч. сессии (6–7 апреля 2015 г.) / Апатиты, 2015. С. 176–180.

Поступила в редакцию 25 июля 2017 года

THE VALUABLE METALS DISTRIBUTION IN GRINDED LOW-SULFIDE PLATINUM-METAL ORES FROM THE KOLA PENINSULA

Marchevskaia V. V., Mukhina T. N. – Mining Institute of the Kola Science Centre of RAS, Apatity, the Russian Federation. E-mail: vvm@goi.kolasc.net.ru

Khashkovskaia T. N. – Gipronickel Institute, St. Petersburg, the Russian Federation. E-mail: TNHas@nikel.spb.su

Platinum-metal mineralization of the Kola Peninsula intrusions is universally associated with sulfide copper-nickel mineralization, and platinum mineral grains and their aggregates are often found in the edge or internal parts of sulfides. The article presents the results of the liberation of the main sulfide minerals of low-sulfide platinum-metal ores studying on the material of two samples taken from the Monchegorsk pluton and the Pansky intrusion, and its effect on the processing indexes. For pentlandite, the most common are the poor aggregates with pyrrhotine, as well as three-phase aggregates composed of non-metallic mineral with pyrrhotine and pentlandite phases. For chalcopyrite, on the contrary, poor aggregates with non-metallic minerals are typical. It is shown that the main minerals of non-ferrous metals – pentlandite and chalcopyrite – are liberated from aggregates with rock minerals only in a material smaller than 25 µm. Between the number of aggregates of non-ferrous metals with rock aggregates in ore and losses in non-ferrous and noble metals with flotation tails, there is a close direct correlation with a correlation coefficient of at least 0.85. The maximum concentration of noble and non-ferrous metals in the Kola Peninsula low-sulfide ores is observed in a material with a particle size of 10 to 25 µm.

Key words: low-sulfide platinum-metal ores; platinum-metal minerals; sulfides; rock minerals; non-ferrous metals; noble metals; grains aggregates.

REFERENCES

1. Dodin D. A. *Mineral'no-syr'evye resursy Arktiki* [Mineral raw materials resources of the Arctic]. Moscow, Geoinformmark Publ., 2005. 176 p.
2. Dodin D. A. *Ustoichivoe razvitiie Arktiki. Problemy i perspektivy* [Sustainable development of the Arctic. Problems and prospects]. St. Petersburg, Nauka Publ., 2005. 279 p.
3. Mitrofanov F. P., Baianova T. B., Korchagin A. U., Groshev N. Yu., Malich K. N., Zhironov D. V., Mitrofanov A. F. [East Scandinavian and Norilsk plume basic vast eruptive provinces of Pt-Pd ores: geological and metallogenic comparison]. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii – Geology of Ore Deposits*, 2013, vol. 55, no. 5, pp. 357–373. (In Russ.)
4. Mitrofanov F. P., and others. [Kola platinum-bearing province]. *Platina Rossii. Problemy razvitiia mineral'no-syr'evoi bazy platinovykh metallov: sb. nauch. trudov* [Proc. “Russia platinum. Problems of platinum metals mineral raw materials base development”]. Moscow, Geoinformmark Publ., 1994, pp. 66–77. (In Russ.)
5. Korchagin A. U., and others. [Specificities of the Fedorovo-Pansky layered intrusion and platinum metals prospect in its East part]. *Platina Rossii. Problemy razvitiia, otsenki, vosproizvodstva i kompleksnogo ispol'zovaniia mineral'no-syr'evoi bazy platinovykh metallov: sb. nauch. trudov* [Proc. “Russia platinum. Problems of development, estimation, reproduction and complex use”]. Moscow, Geoinformmark Publ., 2004, pp. 143–152. (In Russ.)
6. Subbotin V. V., Korchagin A. U., Savchenko E. E. [Platinum-metal mineralization of the Fedorovo-Pansky ore node: types of mineralization, mineral composition, genesis features]. *Vestnik KNC – KSC Herald*, 2012, no. 1, pp. 55–66. (In Russ.)
7. Grohovskaya T. L., Bakaev V. F., Sheleпина E. P., Lapina M. I., Laputina I. P., Muravitskaia G. N. [Platinum-metal mineralization in gabbronorites of the Vuruchuaivench intrusion, Monchegorsk pluton (Kola Peninsula, Russia)]. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii – Geology of Ore Deposits*, 2000, vol. 42, no. 2, pp. 147–161. (In Russ.)

8. Ivanchenko V. N., Davydov P. S. [General features of PGM deposits and prospects geological structure in the southern part of the Monchegorsk mineral area]. *Strategicheskie mineral'nye resursy Laplandii – osnova ustoychivogo razvitiia Severa: sb. mater.* [Proc. “Strategic mineral resources of Lapland – base for the sustainable development of the North”]. Apatity, KSC RAS Publ., 2009, pp. 70–78. (In Russ.)
 9. Pripachkin P. V., Rundkvist T. V. [Geological structure and platinum-bearing in the eastern part of the Sopchinsky layer “330” (Monchegorsk pluton, the Kola Peninsula)]. *Rudy i metally – Ores and Metals*, 2007, no.1, pp. 44–50. (In Russ.)
 10. Balabonin N. L., Subbotin V. V., Skiba V. I., Voitekhovskii Yu. L., Savchenko E. E., Pakhomovskii Ya. A. [Forms of occurrence and balance of precious metals in the Fedorovo-Pansky intrusion ores (the Kola Peninsula)]. *Obogashchenie rud – Mineral Processing*, 1998, no. 6, pp. 24–30. (In Russ.)
 11. Subbotin V. V., and others [Mineral composition of the new platinum-metal deposit N. Kamennik mineralization, the West-Pana block, the Kola Peninsula]. *Geologiya i strategicheskie poleznye iskopaemye Kol'skogo regiona: tr. XII Vseros. Fersmanovskoi nauch. sessii (6–7 aprilia 2015 g.)* [Proc. 12th All-Russian Phersman scientific conference “Geology and strategic minerals” (6th–7th April, 2015)]. Apatity, 2015, pp.176–180. (In Russ.)
-