

РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.34

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-4-4-9>ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ
ЗОЛОТА И СЕРЕБРА ИЗ ПИРИТОВЫХ КОНЦЕНТРАТОВ
МЕТОДОМ СВЧ-ТЕХНОЛОГИЙ

Ратникова Н.С., Панкратьев П.В.

Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы): в статье описаны особенности и потенциальные преимущества процесса извлечения золота из пиритовых концентратов с помощью СВЧ технологий. На примере Гайского месторождения были произведены расчеты и получены теоретические результаты. **Цель работы:** повысить эффективность извлечения золота из пиритовых отвалов, увеличить минерально-сырьевую базу Урала. **Используемые методы:** применялся метод СВЧ-технологий, при котором минералы пустой породы нагреваются, происходит растрескивание оболочки, и частицы золота становятся доступными для извлечения. **Новизна:** к элементам новизны относятся усовершенствование методов расчетов, показывающих повышение извлекаемости золота и серебра. **Результат:** в статье приведено сравнение методик и использование методов использования СВЧ-технологий применительно к месторождениям Южного Урала, в частности Гайского. Проведены расчеты, показывающие повышение эффективности извлечения благородных металлов при помощи СВЧ-технологий. **Практическая значимость:** Данные расчеты помогут осуществить комплексную переработку упорных золотосодержащих руд, что позволит улучшить экологическую обстановку Южного Урала.

Ключевые слова: золото, серебро, пирит, медно-колчеданные руды, СВЧ-технологии, извлечение золота, благородные металлы, пиритовые концентраты, добыча золота и серебра.

Введение

В Оренбургской части Южного Урала широко развиты колчеданные промышленные месторождения медно-цинковых руд, основными продуктами которых кроме меди, цинка, реже свинца, являются сопутствующие редкие и благородные элементы. Среди последних особую значимость имеет золото, составляющее более 90% всей добычи золота в области [1].

Материалы и методы исследования

Определенная часть золота связана с пиритом (сульфидом железа), оно остается в очень больших количествах в технологически сложных для переработки пиритовых отвалах.

Для развития минерально-сырьевой базы страны важно не только открытие новых месторождений полезных ископаемых, но и рациональное использование уже имеющихся. Это можно добиться только при более полном извлечении из руд полезных компонентов.

После обогащения руд образуются отвальные «хвосты», содержащие пирит, халькопирит, пирротин и др. Пиритные «хвосты» являются очень ценными минеральными ресурсами, находящимися на горно-обогатительных фабриках при обогащении сульфидного медно- и свинцово-цинкового сырья. Содержание пирита в рудах – 60–80%, в хвостах – 90–95%. Отвалы меднорудных ГОКов содержат в меньших концентрациях те же полезные элементы, что и исходная руда. В образцах отвалов и хвостохранилищ Гайского, Бурибаевского и Учалинского ГОКов установлено содержание Cu на уровне 0,05–0,17%, Zn – 0,05–0,37% [3].

Для серноколчеданных руд наиболее характерно повышенное содержание золота – от 0,5-1 (43,5% случаев) до 0,5 г/т (30,4% случаев). Содержание золота класса I–1,5 г/т отмечается реже (15%) и лишь в единичных случаях может доходить до 3 г/т (рис. 1). Исходя из многочисленных данных, можно сделать вывод, что в серноколчеданных рудах увеличение содержания серы сопровождается увеличением концентрации золота [4].

© Ратникова Н.С., Панкратьев П.В., 2019

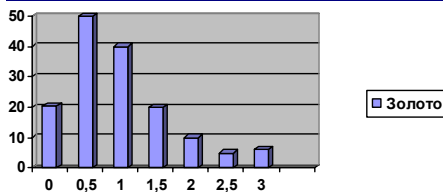


Рис. 1. Гистограмма распределения золота

Геохимическое изучение месторождений показывает, что золотосодержащие колчеданные руды определяются, в основном, в минералах-концентраторах, и особенно в пиритах, где стабильно низкое содержание тонкодисперсного золота [5].

Основными технологиями, применяемыми при обогащении колчеданных руд, являются: цианирование, гравитация-цианирование флотационного концентрата, гравитация-флотация-цианирование объединенного гравитационно-флотационного концентрата, позволяющие повысить степень извлекаемости золота из пирита. Однако этими методами не достигается полного извлечения. Перспективным методом при решении этой актуальной проблемы может быть СВЧ-технология [6].

К категории упорных относятся руды и концентраты, переработка которых в «стандартных» условиях цианирования не обеспечивает полного извлечения золота или же связана с повышенными затратами на отдельные технологические операции (измельчение, выщелачивание, обезвоживание, выделение золота из растворов и т.д.) [7,8].

Анализ исследований большинства месторождений Урала, касающихся вопросов нахождения и распределения благородных металлов в рудах, показывает, что золото и серебро в колчеданных рудах концентрируется как в виде самостоятельных (самородных) обособлений, так и в виде тонкодисперсированной вкрапленности в сульфидных.

Пирит является основным концентратом золота в колчеданных рудах, хотя его большая часть идет в отвалы. Значительная часть золота содержится в кристаллической решетке сульфидных минералов, обычно в пирите, пирротине и арсенопирите. Золото может быть как химически связанным, так и в виде зерен нано-размера [9].

Как известно, большинство медноколчеданных месторождений являются комплексными по наличию в них полезных компонентов. Поэтому нет сомнений в важности работ, направленных

на полную изученность месторождений. Только глубокая и разносторонняя информация о месторождениях позволит добиться максимальной экономической эффективности последующих эксплуатационных работ [10].

Рудные тела сложены медными, медно-цинковыми и серно-колчеданными рудами, причем роль последних с глубиной возрастает. По структурно-текстурным особенностям и составу среди них выделяются сплошные и прожилково-вкрапленные халькопирит-пиритовые, сфалерит-халькопирит-пиритовые и пиритовые руды [11].

Наиболее высокие концентрации золота и серебра отмечаются в приконтактных частях рудных тел с вмещающими породами, а также на выклинках и периферии рудных тел и участках их резких пережимов, где часто наблюдаются полосчатые и плейчатые текстуры руд, обусловленные проявлением пострудной тектоники и метаморфическим преобразованием руд [12]. В таких тектонно-метаморфогенных зонах отмечено повышенное количество борнита, теннантита, галенита, барита [13].

На месторождении золото концентрируется не только в промышленных рудах, но и в зонах непромышленной вкрапленной сульфидной минерализации, а также в метасоматитах и рудовмещающих породах, в различной степени подвергавшихся гидротермальным изменениям [14].

Важным экономическим фактором является потенциальная возможность вовлечения в переработку забалансовых вкрапленных руд и редковкрапленной сульфидной минерализации метасоматитов рудовмещающих толщ с целью извлечения из них полезных компонентов, в том числе золота и серебра [15].

Современная минеральная база России определяет тонковкрапленные и труднообогащаемые руды, которые находятся в отвалах, из-за сложной структуры и вещественного состава. Для их переработки необходимы современные технологии, которые могут позволить качественно, эффективно и безопасно извлекать необходимые ценные компоненты.

В практике обогащения и извлечения золота из колчеданных руд применяются следующие методы: бесцианидное выщелачивание, окислительный обжиг, гидрохлорирование и др. [16].

Предлагается применение СВЧ-технологий для извлечения золота из колчеданных руд Оренбургской области:

Под СВЧ-технологиями понимают совокупность процессов преобразования, связанных с воздействием электромагнитного поля, которые направлены на разрушение золотосодержащих

минералов в диапазоне частиц от 1 кГц до 300 ГГц. Электромагнитное поле СВЧ диапазона избирательно взаимодействует с различными химическими элементами и соединениями, в результате чего кристаллическая решетка минерала разрушается [17].

Примерное время обработки руды составляет 13–16 мин при температуре 420°C вместо обычного обжигания с временем 2,5 ч и температурой 550°C с выходом золота 98%. При облучении СВЧ минералов пирита и арсенопирита выделяются пары SO_2 и As_2O_3 [17].

При обработке СВЧ-импульсом минералы пустой породы нагреваются, происходит растрескивание оболочек, и частицы золота становятся доступными для извлечения.

Разработки исследовательской фирмы EME Microwave Technology Corp подтверждают снижение расходов на подготовку упорных пород к цианированию при использовании СВЧ-технологий. Так, при обработке 200 т концентрата в день СВЧ-полем расходы составляют 3,84 млн долл., при обычном обжиге – 6,9 млн долл., при окислении под высоким давлением 26,5 млн долл., бактериальном окислении – 3,0–3,7 млн долл. Если из необработанных карбонатных руд методом цианирования извлекается 5% металла, то из обработанных СВЧ-полями выход повышается до 83% [18].

Специалистами компании EME Microwave Technology Corp создана опытная установка, в состав которой входят два СВЧ-реактора и один СВЧ-генератор мощностью 75 кВт, который используется для окисления пиритовых и арсенопиритовых концентратов. Производительность установки составляет 5–10 т/сут. Расход электроэнергии – около 3 кВт · ч/т [19].

Установка для СВЧ-разупрочнения горных пород включает: генератор СВЧ, линию передачи, рабочую камеру, системы загрузки, а также необходимые согласующие и подстроечные элементы СВЧ-тракта, элементы защиты СВЧ-деталей от разрушающего и загрязняющего воздействия горной породы, элементы защиты персонала от паразитного излучения. Экранирование СВЧ-поля в местах загрузки и выгрузки породы осуществляется ее прохождением через заградительные волноводы или специальные окна с металлической спиралью, введением в загрузочные патрубки пазов глубиной в четверть длины волны и т.д. В волноводной рабочей камере ставят дополнительные элементы, улучшающие согласование СВЧ-генератора с нагрузкой и концентрирующие СВЧ-поле на обрабатываемом материале. При необходимости облучение

породы сочетают с ее механической обработкой в дробилках, мельницах, а также бурами и резцами [20].

Использование СВЧ-генераторов мощностью 100–1000 кВт в непрерывном режиме и до гигавайт в импульсном улучшает эффективность обработки горных пород и уменьшает затраты на их обработку.

При увеличении мощности P температура T уменьшается, что обозначает – нонообменные преобразования могут осуществляться в широком интервале температур 250–850°C. Изменением температуры или мощности можно достигать одинаковых результатов при разных энергетических затратах. То есть фазовые переходы могут быть получены при высокой температуре, но при низкой мощности или при высокой мощности, но при низкой температуре.

Применение способа СВЧ-воздействия не только позволяет увеличить добычу золота из богатых (до 300 г/т) россыпей, но и открывает новые возможности по освоению руд, в которых содержание драгоценных металлов очень мало (5–15 г/т); позволяет перерабатывать промежуточные продукты свинцово-цинковых, колчеданных и других руд с содержанием 0,5–3 г/т, вторично перерабатывать хвосты старых разработок, содержащих 1–3 г/т и более золота. Сложность переработки данного вида сырья состоит в том, что частицы золота в нем имеют размер от сотых до десятых долей микрометра и находятся в связанном с другими минералами (пирит, арсенопириты) состоянии [20].

Заключение

На основании приведенных данных был произведен расчет возможной извлекаемости золота и серебра из пиритовых отходов при помощи СВЧ-технологий.

В температурных режимах 350–400°C возможны переходы немагнитных пирита и арсенопирита в магнитный пирротин. Время выдержки определяет степень намагничивания и объем образующихся ферритов. Магнитную фракцию выделяли магнитной сепарацией в постоянном магнитном поле. Оптимальное время – примерно 20 мин при температуре 350–400°C. Исследована извлекаемость золота и серебра в результате облучения в магнитной фракции «хвостов» Гайского месторождения с глубины 695 м. Их содержание возрастает от 0,24 и 2,88 г/т соответственно до 2,7 г/т золота и 32,2 г/т серебра (см. таблицу) [20].

**Повышение извлекаемости золота и серебра
из «хвостов» Гайского месторождения
после применения СВЧ-облучения**

Номер образца	«Хвосты» без гравитационного обогащения	Концентрация золота, г/т	Концентрация серебра, г/т
1	Исходная проба	0,24	2,88
2	Магнитная фракция из исходной пробы	0,72	5,96
3	Магнитная фракция после СВЧ обработки	2,7	32,2

Такое распределение золота при магнитной сепарации можно объяснить намагничиванием золотоносных составляющих пробы – пирита и арсенопирита. Извлекаемость золота из магнитной и немагнитной фракции составила около 80%. Извлекаемость до облучения составляла в аналогичных режимах не более 36%. Таким образом, применение СВЧ-технологий способствует повышению извлекаемости золота и серебра [20].

Внедрение СВЧ-технологий позволит осуществить комплексную переработку упорных золотоносных руд, другого техногенного сырья, тем самым улучшить экологическую обстановку в районах недропользования.

Список литературы

1. Седелникова Г.В., Романчук А.И.. Эффективные технологии извлечения золота из руд и концентратов // Прогрессивные технологии комплексной переработки минерального сырья. М.: Изд. дом «Руда и металлы», 2008. С. 120–133.
2. К вопросу об использовании и переработке отходов горно-обогатительных комбинатов Южного Урала / Гильмутдинова Р.А., Мичурин С.В., Ковтуненко С.В., Елизарьева Е.Н. // Успехи современного естествознания. 2017. № 2. С. 68–73.
3. Башлыкова Т.В. Сертификация минерального сырья по его свойствам // Научные основы и практика разведки и переработки руд и техногенного сырья с извлечением благородных металлов // Труды международной научно-технической конференции (12–15 ноября 2002 г.). Екатеринбург: Уральская государственная горно-геологическая академия, 2002. Ч. 2. С. 3–6.
4. Чантурья В.А. и др. Вскрытие упорных золотосодержащих руд при воздействии мощных электромагнитных импульсов // Доклады РАН. 1999. 366. №5. С. 680–683.
5. Нормуратов Р.И., Стрижко Л.С., Холикулов Д.Б. Исследования по извлечению золота из золотосодержащей магнитной фракции // Металлургия. 2009. № 4. С. 35–38.

6. Мелекесцева И.Ю., Зайков В.В. Минералогия руд Южно-Юлукского колчеданного месторождения, Южный Урал // Минералогия Урала-2007. Миасс: ИМин УрО РАН, 2007. С. 77–79.
7. Hutchison R.W. Volcanogenic sulfide deposits and their metallogenic significance // Econ. Geol., 1973. V. 68. № 8. P. 1223–1246.
8. Hutchison R.W. Massive base metal deposits as guides to tectonic evolution. The continental crust and its deposits // Geol. Assoc. Can. Spec. Pap., 1980. V. 20. P. 660–684.
9. Hutchison R.W. Precious metals in the massive base metal sulfide deposits // Geologische Rundschau., 1990. 79/2. P. 241–263.
10. Sawkins F.I. Massive sulfide deposits in relation to geotectonics // Geol. Assoc. Can. Spec. Pap., 1976. № 14. P. 221–240.
11. Благородные металлы в рудах и древних золотых изделиях Южного Урала / Зайков В.В., Таиров А.Д., Зайкова Е.В. и др. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2012. 232 с.
12. Масленников В.В. Литогенез и колчеданообразование. Миасс: ИМин УрО РАН, 2006. 384 с.
13. Масленникова С.П., Масленников В.В. Сульфидные трубы палеозойских черных курильцев. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 312 с.
14. Holland N.G. The formation of an ancient gold-rich volcanogenic massive sulfide deposit: a study of the Baltat Tau deposit in the Southern Urals of Russia // PhD thesis. University of Southampton, 2002. 250 p.
15. Контарь Е.С. Геолого-промышленные типы месторождений меди, цинка, свинца на Урале (геологические условия размещения, история формирования, перспективы). Екатеринбург: Изд-во УГТУ, 2013. 199 с.
16. Лещиков В.И. Обеспеченность минерально-сырьевыми ресурсами горнодобывающих предприятий // Изв. вузов. Горный журнал. 1993. Вып. 6. С. 10–19.
17. Haque K.E. Microwave irradiation pretreatment of a refractory gold concentrate. Proc. Of the Internet/Symposium on gold metallurgy. Winnipeg, Canada, 1987. P. 327.
18. А.с. №1592958 СССР, H05B6/64. Устройство для СВЧ обработки сыпучих материалов / Москалев А.Н. и др. 1998.
19. Исследование возможности применения СВЧ поля для процессов рудоподготовки при получении золота / Хван А.Б., Колесник В.Г., Саттаров Г.С., Латышев В.Е., Урусова Е.В. // Горный вестник Узбекистана. 2002. №2 (9). С. 56–60.
20. Влияние СВЧ-обработки на извлечение золота из минерального сырья / Колесник В.Г., Урусова Е.В., Павлий К.В., Козлов В.В., Панкратьев П.В., Смирнова С.К. // Цветные металлы. 2000. №8. С. 72–75.

Поступила 19.07.19

Принята в печать 26.08.19

IMPROVING THE EFFICIENCY OF GOLD AND SILVER RECOVERY FROM PYRITE CONCENTRATES BY APPLYING MICROWAVE TECHNOLOGIES

Nataliya S. Ratnikova – Postgraduate Student
Orenburg State University, Orenburg, Russia. E-mail: nata.ratnikova.96@mail.ru

Petr V. Pankratiev – DrSc (Geol.-Min.), Professor
Orenburg State University, Orenburg, Russia.

Abstract. Problem Statement (Relevance): The paper describes the features and potential benefits of gold recovery from pyrite concentrates using microwave technologies. We made calculations and obtained the theoretical results using the example of the Gaiskoye deposit.

Objective: The objective is to improve the efficiency of recovering gold from pyrite heaps, and to increase the mineral resource base of the Urals. **Methods Used:** The microwave technology was used to heat minerals of waste rock and crack the shell, and then gold particles may be recovered. **Novelty:** The elements of novelty include the improvement of calculation methods, showing an increase in the recoverability of gold and silver. **Findings:** The paper presents a comparison of methods and the use of microwave technologies in relation to the deposits in the Southern Urals, in particular, the Gaiskoye deposit. We made the calculations showing an increase in the efficiency of noble metal recovery using microwave technologies. **Practical relevance:** These calculations will contribute to a comprehensive processing of refractory gold-bearing ores, thereby improving the environmental situation in the Southern Urals.

Keywords: gold, silver, pyrite, copper pyrite ores, microwave technologies, gold recovery, noble metals, pyrite concentrates, gold and silver mining.

References

- Sedelnikova G.V., Romanchuk A.I. Efficient technologies of gold recovery from ores and concentrates. *Progressivnyye tekhnologii kompleksnoy pererabotki mineralnogo syrya* [Advanced technologies for the integrated processing of mineral raw materials]. Moscow: Ore and Metals, 2008, pp.120–133. (In Russ.)
- Gilmutdinova R.A., Michurin S.V., Kovtunenko S.V., Elizarieva E.N. On the issue of the use and processing of wastes from mining and processing plants of the Southern Urals. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* [Advances in current natural sciences], 2017, no. 2, pp. 68–73. (In Russ.)
- Bashlykova T.V. Certification of mineral raw materials by its properties. *Nauchnye osnovy i praktika razvedki i pererabotki rud i tekhnogennogo syrya s izvlecheniem blagorodnykh metallov. Trudy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii (12–15 noyabrya 2002 g.)* [Scientific bases and practice of exploration and processing of ores and technology-related raw materials with the recovery of noble metals. Proceedings of the International Scientific and Technical Conference (November 12–15, 2002)]. Yekaterinburg: Ural State Academy of Mining and Geology, 2002, part 2, pp.3–6. (In Russ.)
- Chanturiya V.A. et al. Opening of refractory gold-bearing ores under the influence of powerful electromagnetic pulses. *Doklady RAN* [Reports of the Russian Academy of Sciences], 1999, 366, no. 5, pp. 680–683. (In Russ.)
- Normurotov R.I., Strizhko L.S., Kholikulov D.B. Studies on gold recovery from a gold-bearing magnetic fraction. *Metallurgiya* [Metallurgy], 2009, no. 4, pp. 35–38. (In Russ.)
- Melekestseva I.Yu., Zaikov V.V. *Mineralogiya rud Yuzhno-Yuluskogo kolchedannogo mestorozhdeniya, Yuzhnyi Ural. Mineralogiya Urala-2007* [Mineralogy of ores of the Yuzhno-Yulusk pyrite deposit, the Southern Urals. Mineralogy of the Urals-2007]. Miass: Institute of Mineralogy, the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2007, pp. 77–79. (In Russ.)
- Hutchison R.W. Volcanogenic sulfide deposits and their metallogenic significance. *Econ. Geol.*, 1973, vol. 68, no. 8, pp. 1223–1246.
- Hutchison R.W. Massive base metal deposits as guides to tectonic evolution. The continental crust and deposits. *Geol. Assoc. Can. Spec. Pap.*, 1980, vol. 20, pp. 660–684.
- Hutchison R.W. Precious metals in the massive metal sulfide deposits. *Geologische Rundschau*, 1990, 79/2, pp. 241–263.
- Sawkins F.I. Massive sulfide deposits in geotectonics. *Geol. Assoc. Can. Spec. Pap.*, 1976, no. 14, pp. 221–240.
- Zaikov V.V., Tairov A.D., Zaikova E.V. et al. *Blagorodnye metally v rudakh i drevnikh zolotykh izdelyakh Yuzhnogo Urala* [Noble metals in ores and ancient gold products in the Southern Urals]. Yekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2012, 232 p. (In Russ.)
- Maslennikov V.V. *Litogenez i kolchedanoobrazovanie* [Lithogenesis and pyrite formation]. Miass: Institute of Mineralogy, the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2006, 384 p. (In Russ.)
- Maslennikova S.P., Maslennikov V.V. *Sulfidnye trubyy paleozoyskikh chernykh kurlshchikov* [Sulphide pipes of paleozoic black smokers]. Yekaterinburg-Miass: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2007, 312 p. (In Russ.)
- Holland N.G. The formation of an ancient gold-rich volcanogenic massive sulfide deposit: a study of the Balta-Tau deposit in the Southern Urals of Russia. PhD thesis. University of Southampton, 2002, 250 p.
- Kontar E.S. *Geologo-promyshlennyye tipy mestorozhdeniy medi, tsinka, svintsa na Urale (geologicheskie usloviya razmeshcheniya, istoriya formirovaniya, perspektivy)* [Geological and industrial types of copper, zinc, and lead deposits in the Urals (geological conditions of their location, history of the formation, and prospects)]. Yekaterinburg: Ural State Mining University, 2013, 199 p. (In Russ.)
- Leshchikov V.I. Provision of mineral resources to mining enterprises. *Izv. vuzov. Gomyi zhurnal* [News of the Higher Institutions. Mining Journal], 1993, vol. 6, pp. 10–19. (In Russ.)

17. Haque K.E. Microwave irradiation pretreatment of a refractory gold concentrate. Proceedings of the International Symposium on Gold Metallurgy. Winnipeg, Canada, 1987, p. 327.
18. Moskalev A.N. et al. *Ustroystvo dlya SVCh obrabotki syuchikh materialov* [A device for the microwave processing of bulk materials]. Author's certificate USSR no. 1592958, cl. H05B6/64, 1998.
19. Khvan A.B., Kolesnik V.G., Sattarov G.S., Latyshev V.E., Urusova E.V. Studies on a potential application of a microwave field for ore preparation processes, when producing gold. *Gornyi vestnik Uzbekistana* [Mining bulletin of Uzbekistan], 2002, no. 2 (9), pp. 56–60. (In Russ.)
20. Kolesnik V.G., Urusova E.V., Pavliy K.V., Kozlov V.V., Pankratiev P.V., Smirnova S.K. The influence of microwave processing on gold recovery from mineral raw materials. *Tsvetnye metally* [Non-ferrous metals], 2000, no. 8, pp.72–75. (In Russ.)

Received 19/07/19

Accepted 26/08/19

Образец для цитирования

Ратникова Н.С., Панкратьев П.В. Повышение эффективности извлечения золота и серебра из пиритовых концентратов методом СВЧ-технологий // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т.17. №4. С. 4–9. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-4-4-9>

For citation

Ratnikova N.S., Pankratiev P.V. Improving the Efficiency of Gold and Silver Recovery from Pyrite Concentrates by Applying Microwave Technologies. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2019, vol. 17, no. 4, pp. 4–9. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-4-4-9>
