

ДВУХСТАДИЙНОЕ СОЛЯНОКИСЛОЕ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ ОКИСЛЕННОЙ НИКЕЛЕВОЙ РУДЫ СЕРОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

© 2020 г. **О.Б. Колмачихина, О.Ю. Маковская, В.Г. Лобанов, С.Э. Польшгалов**

Уральский федеральный университет (УрФУ)
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург

Статья поступила в редакцию 12.03.20 г., доработана 20.03.20 г., подписана в печать 23.03.20 г.

В Уральском регионе сосредоточены значительные запасы окисленных никелевых руд как в крупных, так и в небольших месторождениях, которые разрабатываются открытым способом. Руда достаточно рыхлая, что делает стоимость добычи относительно невысокой. В то же время технологии, используемые на уральских никелевых заводах, не удовлетворяют требованиям энергосбережения и экологии и являются убыточными. В работе предложена двухстадийная гидрометаллургическая технология переработки окисленных никелевых руд Серовского месторождения. Исследована руда следующего состава, мас. %: 1,01 Ni, 0,031 Co, 15,32 Fe_{общ}, 8,51 Al₂O₃, 21,76 MgO, 43,97 SiO₂. Фазовый состав пробы установлен методом порошковой дифракции на рентгеновском дифрактометре XRD-7000 («Shimadzu», Япония). Основными никельсодержащими минералами идентифицированы серпентин Mg₆[Ni, Si₄O₁₀](OH)₈ и нимит (Ni, Mg, Al)₆(Si, Al)₄O₁₀(OH)₈. Никель входит в кристаллическую решетку силикатов, изоморфно замещая магний и железо, что существенно затрудняет вскрытие таких минералов гидрометаллургическим способом. Приведены результаты лабораторных исследований атмосферного выщелачивания руды соляной кислотой (на первой стадии) и автоклавного выщелачивания полученной пульпы (на второй) в зависимости от температуры, продолжительности выщелачивания и расхода кислоты. Суммарное (по двум стадиям) извлечение в раствор составило, мас. %: 82 Ni, 73,6 Co, 22 Fe, 22 Mg, 50,4 Al. Соляная кислота в данных условиях расходуется практически полностью — ее остаточная концентрация составила около 3 г/дм³. Автоклавная пульпа обладает хорошей фильтруемостью. Состав кека после автоклавного выщелачивания, следующий, мас. %: 0,35 Ni, 0,01 Co, 12 Fe_{общ}, 10,63 Mg, 1,2 Al, 55 SiO₂.

Ключевые слова: окисленная никелевая руда, соляная кислота, автоклавное выщелачивание.

Колмачихина О.Б. — канд. техн. наук, доцент кафедры металлургии цветных металлов (МЦМ) УрФУ (620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19). E-mail: o.b.kolmachikhina@urfu.ru.

Маковская О.Ю. — канд. техн. наук, доцент кафедры МЦМ УрФУ. E-mail: o.i.makovskaia@urfu.ru.

Лобанов В.Г. — канд. техн. наук, доцент кафедры МЦМ УрФУ. E-mail: v.g.lobanov@urfu.ru.

Польшгалов С.Э. — ассистент кафедры МЦМ УрФУ. E-mail: sergey.polygalov@urfu.ru.

Для цитирования: Колмачихина О.Б., Маковская О.Ю., Лобанов В.Г., Польшгалов С.Э. Двухстадийное солянокислое выщелачивание окисленной никелевой руды Серовского месторождения. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2020. No. 4. С. 16–21. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2020-4-16-21.

Kolmachikhina O.B., Makovskaya O.Yu., Lobanov V.G., Polygalov S.E.

Two-stage hydrochloric leaching of oxidized nickel ore of the Serovsky deposit

Significant reserves of oxidized nickel ores are concentrated in the Ural region, in the deposits of various sizes that are mined by open-pit method. Ore is rather loose, which makes the cost of production relatively low. At the same time, the technologies employed at Ural nickel plants fail to meet the energy conservation requirements, and they are environmentally unfriendly and unprofitable. The paper proposes a two-stage hydrometallurgical technology for processing oxidized nickel ores from the Serovsky deposit. The composition of investigated ore is, wt. %: 1.01 Ni, 0.031 Co, 15.32 Fe_{total}, 8.51 Al₂O₃, 21.76 MgO, 43.97 SiO₂. The phase composition of the sample was determined by powder diffraction on the XRD-7000 X-ray diffractometer (Shimadzu, Japan). Serpentine Mg₆[Ni, Si₄O₁₀](OH)₈ and nimit (Ni, Mg, Al)₆(Si, Al)₄O₁₀(OH)₈ were identified as the main nickel-containing minerals. Nickel enters the crystal lattice of silicates and replaces magnesium and iron isomorphically, which significantly complicates the disintegration of such minerals by the hydrometallurgical method. The paper provides the results of laboratory studies into atmospheric ore leaching with hydrochloric acid at the first stage and autoclave leaching of the obtained slurry at the second stage depending on temperature, leaching time and acid consumption. The total (in two stages) extraction into the solution was, wt. %: 82 Ni, 73.6 Co, 22 Fe, 22 Mg, 50.4 Al. Hydrochloric acid is almost completely consumed under these conditions with residual

acid concentration of about 3 g/dm³. The autoclave slurry has good filterability. Cake composition after autoclave leaching is as follows, wt.%: 0.35 Ni, 0.01 Co, 12 Fe_{total}, 10.63 Mg, 1.2 Al, 55 SiO₂.

Keywords: oxidized nickel ore, hydrochloric acid, high-pressure leaching.

Kolmachikhina O.B. – Cand. Sci. (Eng.), Associate prof., Department of metallurgy of non-ferrous metals (MNFM), Ural Federal University (UrFU) (620002, Russia, Yekaterinburg, Mira str., 19). E-mail o.b.kolmachikhina@urfu.ru.

Makovskaya O.Yu. – Cand. Sci. (Eng.), Associate prof., Department of MNFM, UrFU. E-mail o.i.makovskaia@urfu.ru.

Lobanov V.G. – Cand. Sci. (Eng.), Associate prof., Department of MNFM, UrFU. E-mail v.g.lobanov@urfu.ru.

Polygalov S.E. – Assistant lecturer, Department of MNFM, UrFU. E-mail: sergey.polygalov@urfu.ru.

Citation: Kolmachikhina O.B., Makovskaya O.Yu., Lobanov V.G., Polygalov S.E. Two-stage hydrochloric leaching of oxidized nickel ore of the Serovsky deposit. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya (Universities' Proceedings. Non-Ferrous Metallurgy)*. 2020. No. 4. P. 16–21 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2020-4-16-21.

Введение

Спрос на никель ежегодно повышается на 4–5 % за счет роста производства аккумуляторных батарей, в том числе для электромобилей. На аккумуляторы приходится около 5 % мирового потребления металла. Несмотря на стремительное развитие сегмента электромобилей, основной отраслью потребления никеля пока остается производство нержавеющей стали, обеспечивающей 2/3 спроса на него. Традиционно для производства нержавеющей стали используют никель, полученный из окисленных руд.

Более 99 % разведанных и эксплуатируемых мировых запасов никелевых руд представлены месторождениями двух геолого-промышленных типов: сульфидного медно-никелевого и силикатно-железониелевого (железокобальт-никелевого). На долю латеритных кобальт-никелевых месторождений приходится более 60 % подтвержденных и свыше 80 % общих мировых запасов никеля [1]. В то же время его производство из этого сырья не превышает 45 % общемирового объема.

В России месторождения окисленных никелевых руд (ОНР) сосредоточены на Урале. Российские силикатные никелевые руды по своему качеству сильно уступают аналогичным рудам зарубежных стран. Если в России добывают руды со средним содержанием никеля 0,9 %, то в других странах — от 1,2 % (Греция) до 2,1 % (Новая Каледония).

На уральских заводах была принята пирометаллургическая технология получения никеля, требующая большого расхода дорогостоящего кокса [2]. Себестоимость выплавляемого металла была слишком высока, что делало его неконкурентоспособным. Это привело к полной или частичной остановке производства на ведущих предприяти-

ях РФ, производящих ферроникель из окисленных никелевых руд: ПАО «Комбинат Южуралникель» (г. Орск, Оренбургская обл.), ОАО «Уфалейникель» (г. Верхний Уфалей, Челябинская обл.), ЗАО «ПО «Режникель» (г. Реж, Свердловская обл.).

Тем не менее имеющиеся запасы окисленных никелевых руд весьма значительны, и создание рентабельной технологии даст толчок возобновлению производства никеля в регионе.

Основной рудной базой Режского никелевого завода и Уфалейского никелевого комбината являлось Серовское месторождение, характеризующееся значительными запасами ОНР — около 3 % от всех запасов никеля в России. Оно расположено на Северном Урале в Серовском, Краснотурьинском и Ново-Лялинском районах Свердловской обл. Среднее содержание никеля в его рудах составляет 1,09 %, кобальта — 0,065 % [3]. Их особенностью является повышенное содержание оксида магния, что затрудняет плавку в шахтной печи — основной операции на уральских заводах в технологии получения никеля. Кроме того, руды разрабатываемого участка № 7 Серовского месторождения имеют повышенное содержание железа [4].

Таким образом, окисленные никелевые руды уральских месторождений при большом объеме разведанных запасов сейчас не используются. Эффективных методов обогащения подобного сырья пока не найдено, и разработка рентабельных металлургических технологий осложняется низким содержанием никеля (0,7–1,5 %) и высоким — железа (20–30 %), а также высокой влажностью руд (более 10–15 %).

Гидрометаллургические схемы являются более гибкими по сравнению с пирометаллургическими. Ключевым моментом в гидрометаллургической

технологии является выбор растворителя. Так, в известном процессе Карон используется аммиак [5, 6]. Также весьма распространено применение серной кислоты [7–10]. В работе [11] показано, что при автоклавном выщелачивании серная кислота может быть заменена более дешевой элементной серой. При этом достигается извлечение 90–97 % никеля и 88–98 % кобальта при сниженных значениях основных параметров процесса: температуре 190–200 °С и общем давлении 1,8–2,3 МПа. Известны примеры успешного использования азотной кислоты [12–15].

Однако все эти технологии применяют для латеритовых руд, характерных для зарубежных месторождений. Такие руды образуются в тропическом климате при так называемом латеритовом выветривании — процессе разложения первичных минералов в условиях жаркого и теплого климата. В этом случае происходят формирование и накопление в коре выветривания свободных оксидов железа, что и приводит к возникновению латеритов — глиноподобной кирпично-красной или светло-бурой горной породы с высоким содержанием железа (до 45 %) и низким — MgO (1–4 %). Основные минералы этих руд — железистые с общей формулой $Fe_2O_3 \cdot nH_2O$. Никель при разрушении первичных минералов высвобождается и изоморфно замещает железо в железистых минералах или находится в адсорбированном виде [16].

Для месторождений Урала характерны силикатные руды, образовавшиеся в результате выветривания серпентинитовых пород. Основные минералы уральских руд — магнезиевые, алюмомагнезиевые и алюможелеземагнезиевые силикаты, кварц. Никель входит в кристаллическую решетку силикатов, изоморфно замещая магний и железо, что существенно затрудняет вскрытие таких минералов гидрометаллургическим способом с использованием традиционных растворителей. В этой связи рассмотрение альтернативных растворителей является перспективным направлением гидрометаллургии ОНР Урала.

Идея использования солянокислого выщелачивания рассматривалась многими исследователями как в России, так и за рубежом [17–20]. Полученные данные свидетельствуют о том, что применение соляной кислоты для выщелачивания никеля из ОНР вполне эффективно. Лучшие результаты достигнуты при $t = 80$ °С в 4 М растворе соляной кислоты в течение 1 ч.

Одной из главных проблем солянокислого вы-

щелачивания является заметное растворение железа. С учетом того, что его содержание в руде значительно больше, чем никеля (13–15 % Fe и 0,6–1,4 % Ni), формируется большой расход кислоты и получение растворов, загрязненных железом. Полностью предотвратить переход железа в раствор не удастся, поэтому более рационально выводить его из полученного раствора в виде дополнительного товарного продукта [21].

В настоящей работе в качестве варианта переработки уральских руд предложена двухстадийная гидрометаллургическая технология с использованием соляной кислоты. На первой стадии при атмосферном выщелачивании в раствор переводили никель из легковскрываемых минералов, на второй — при автоклавном выщелачивании полученной пульпы растворяли никель из трудновскрываемых соединений. Такая технология, по нашему мнению, позволит сократить расходы на фильтрацию, снизить потери никеля и в целом удешевить автоклавный передел.

Материалы и методы исследований

Окисленные никелевые руды Серовского месторождения отличаются непостоянством состава по содержанию как ценных компонентов, так и пустой породы [22]. По этой причине в работе использовали усредненную пробу руды, полученную в результате сокращения исходных проб руды, отобранных на участке № 7 (Еловском) указанного месторождения.

Для проведения исследований пробу руды подвергали сушке и последующему дроблению. Сначала сухую руду 2 раза пропускали через шектовую дробилку. Крупность полученной фракции составляла $-6+2$ мм. После перемешивания полученного материала методом квартования отобрали пробу для дальнейших исследований, из которой, в свою очередь, выделили образец для химического анализа. Оставшуюся руду фракции $-6+2$ мм подвергали тонкому измельчению до 100 % фракции -44 мкм.

Состав усредненной пробы был следующим, мас. %: 1,01 Ni, 0,031 Co, 15,32 Fe_{общ}, 8,51 Al₂O₃, 21,76 MgO и 43,97 SiO₂. Фазовый состав пробы определяли с помощью метода порошковой дифракции на рентгеновском дифрактометре XRD-7000 («Shimadzu», Япония). Основными никельсодержащими минералами, по данным анализа, идентифицированы серпентин $Mg_6[Ni, Si_4O_{10}](OH)_8$ и

нимит $(\text{Ni}, \text{Mg}, \text{Al})_6(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$, что совпадает с данными работы [23].

На первой стадии руду обрабатывали 4 М раствором HCl в открытом реакторе, затем пульпу помещали в титановый автоклав и довыщелачивали. Для оценки эффективности солянокислого выщелачивания ОНР при атмосферном давлении были проведены опыты с различным расходом кислоты (от 50 до 100 % от массы руды) при температуре автоклавной обработки 120–180 °С и рецикле раствора автоклавного выщелачивания.

Расход кислоты на первой стадии выщелачивания варьировали в интервале 50–100 % (32 % HCl) от массы руды, температуру — от 20 до 100 °С, продолжительность выщелачивания — от 15 до 75 мин.

Полученную после первой стадии выщелачивания пульпу (50 % твердого, 34 г/дм³ HCl) помещали в титановый автоклав. Варьировали продолжительность и температуру процесса. Опыты проводили с выводом части полученного раствора в оборот — на первую стадию выщелачивания. В ходе процесса отбирали пробы пульпы, их анализировали на никель, железо и кислоту, а также определяли фильтруемость конечной пульпы, поскольку при автоклавном выщелачивании возможно образование геля кремниевой кислоты, затрудняющего фильтрацию. При обработке в автоклаве пульпы с высокой остаточной кислотностью (50–150 г/дм³) получали очень труднофильтруемый продукт. При охлаждении фильтрат через несколько часов приобретал желеобразную консистенцию, что осложняло его дальнейшую переработку.

Результаты и их обсуждение

После изучения результатов атмосферного солянокислого выщелачивания были определены оптимальные параметры для первой стадии: продолжительность выщелачивания $\tau = 40$ мин, температура — 60 °С, расход кислоты — 50 % от массы загруженной руды. С повышением температуры свыше 80 °С растворение алюминия, магния и железа возрастало, при этом в диапазоне $t = 60\text{--}80$ °С заметного роста извлечения никеля в раствор не наблюдалось (рис. 1).

Увеличение расхода HCl свыше 50 % от массы руды привело к резкому повышению остаточной концентрации кислоты (до ~160 г/дм³) и переходу в раствор значительного количества железа. Извлечение в раствор никеля при этом повысилось всего лишь на 5–8 %. После 1-й стадии выщелачивания

при оптимальных условиях получен раствор следующего состава: г/дм³: 3,1 Ni, 0,17 Co, 48 Fe, 22 Mg и 10 Al.

Для стадии автоклавного выщелачивания были определены следующие оптимальные параметры: продолжительность процесса — 1 ч, $t = 160$ °С, соотношение Ж : Т = 1 : 1. Проведение процесса в таких условиях дало возможность извлечь в раствор дополнительно 15 % никеля и 8 % кобальта.

Суммарное (по двум стадиям) извлечение в раствор составило, мас. %: 82 Ni, 73,6 Co, 22 Fe, 22 Mg и 50,4 Al. Соляная кислота в данных условиях расходуется практически полностью — остаточная ее концентрация составила около 3 г/дм³. Автоклавная пульпа обладает хорошей фильтруемостью. Состав кека после автоклавного выщелачивания

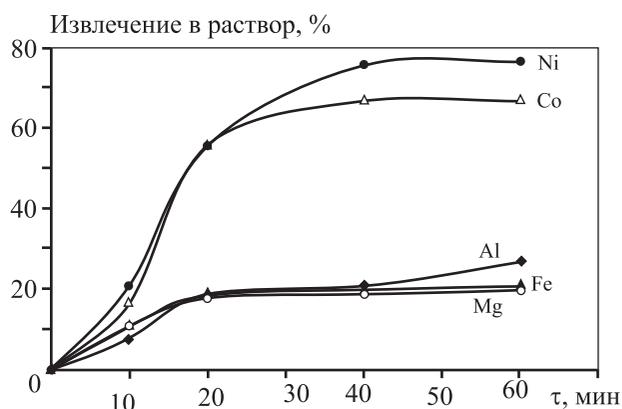


Рис. 1. Зависимость извлечения металлов в раствор из исходной руды от продолжительности выщелачивания на первой стадии

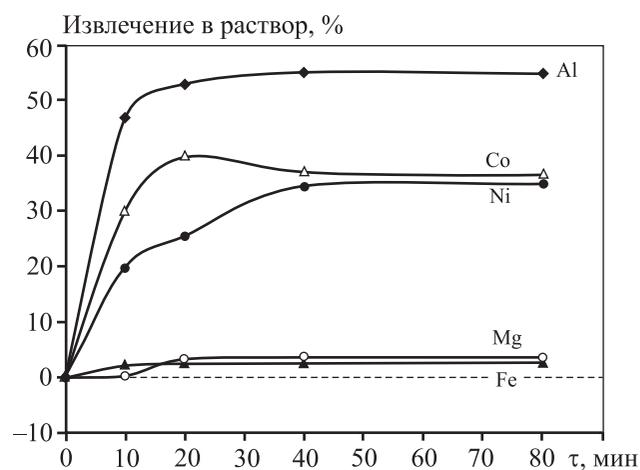


Рис. 2. Зависимость извлечения металлов в раствор из пульпы первой стадии выщелачивания от продолжительности выщелачивания на второй стадии

был следующим, мас. %: 0,35 Ni, 0,01 Co, 12 Fe_{общ}, 10,63 Mg, 1,2 Al и 55 SiO₂. Один из вариантов его использования — производство строительных материалов.

Выводы

1. При двухстадийном выщелачивании (расход HCl — 50 % от массы руды, продолжительность 1-й стадии процесса — 40 мин при $t = 60$ °C, время автоклавного выщелачивания пульпы, полученной на первой стадии, — 60 мин при 160 °C) в раствор было извлечено, мас. %: 82 Ni, 73,6 Co, 22 Fe, 22 Mg и 50,4 Al.

2. Раствор после 1-й стадии выщелачивания при оптимальных условиях содержит, г/дм³: 3,1 Ni, 0,17 Co, 48 Fe, 22 Mg и 10 Al. Автоклавная обработка, наряду с доизвлечением в раствор 15 % Ni и 8 % Co, позволяет снизить содержание в растворе железа. Состав конечного раствора следующий, г/дм³: 3,7 Ni, 0,18 Co, 11 Fe, 32 Mg и 5,4 Al.

3. Выход кека после двухстадийного выщелачивания достигал 67 %. Состав кека, мас. %: 0,15 Ni, 0,01 Co, 12 Fe, 22 MgO, 1,2 Al₂O₃ и 55 SiO₂.

4. Показано, что применение автоклавного выщелачивания позволяет перерабатывать никелевую руду с выходом кека от выщелачивания ~70 % при потерях с кеком ~1,0±0,8 кг Ni на 1 т переработанной руды.

Литература/References

1. Mudd G.M. Global trends and environmental issues in nickel mining: Sulfides versus laterites. *Ore Geol. Rev.* 2010. Vol. 38, P. 9—6. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2010.05.003.
2. Леонтьев Л.И., Жучков В.И., Жданов А.В., Дашевский В.Я. Современное состояние ферросплавного производства в России. *Сталь.* 2015. No. 10. С. 21—25. Leont'ev L.I., Zhuchkov V.I., Zhdanov A.V., Dashevskii V.Y. Ferroalloy production in Russia. *Steel in Translation.* 2015. Vol. 45. No. 10. P. 773—777.
3. Вершинин А.С. Месторождения никеля на Урале. *Горный журн.* 1996. No. 8-9. С. 23—57. Vershinin A.S. Nickel deposits in the Urals. *Gorniy Zhurnal.* 1996. No. 8-9. P. 23-57 (In Russ.).
4. Мищенко В.Н., Книсс В.А., Кобелев В.А., Авдеев А.С., Полянский Л.И. Подготовка окисленных никелевых руд к плавке. Екатеринбург: УрО РАН, 2005. Mishchenko V.N., Kniss V.A., Kobelev V.A., Avdeev A.S., Poljanski L.I. Preparation of oxidized nickel ores for smelting. Ekaterinburg: Ural'skoe otделение RAN, 2005.
5. Caron M.H. Fundamental and practical factors in ammonia leaching of nickel and cobalt ores. *J. Metals.* 1950. Vol. 188. P. 67—90.
6. Rhamdhani M. A., Chen J., Hidayat T., Jak E., Hayes P. Advances in research on nickel production through the Caron process. *Proc. EMC.* 2009. P. 899—913.
7. Panda L., Rao D.S., Mishra B.K., Das B. Characterization and dissolution of low-grade ferruginous nickel lateritic ore by sulfuric acid. *Mining, Metallurgy & Exploration.* 2014. Vol. 31. P. 57—65. DOI: 10.1007/BF03402349.
8. Ucyildiz A., Girgin I. High pressure sulphuric acid leaching of lateritic nickel ore. *Physicochemical Problems of Mineral Processing.* 2017. Vol. 53. Iss. 1. P. 475—488. DOI: 10.5277/ppmp170137.
9. Dry M., Harris B. Nickel laterite and three mineral acids. *Proc. of ALTA Nickel and Cobalt Conf.* Perth, Australia, 2012. P. 20—35.
10. Kaya S., Topkaya Y. High pressure acid leaching of a refractory lateritic nickel ore. *Miner. Eng.* 2011. Vol. 24. Iss. 11. P. 1188—1197. DOI: 10.1016/j.mineng.2011.05.004.
11. Нафтали М.Н., Дьяченко В.Т., Серова Н.В., Брюквин В.А., Лысых М.П. Окисленные никелевые руды — перспективный источник минерального сырья для повышения объемов производства никеля и кобальта в ОАО «ГМК «Норильский никель». *Цвет. металлы.* 2012. No. 6. С. 25—28. Naftal M.N., Dyachenko V.T., Serova N.V., Bryukvin V.A., Lysykh M.P. The oxidized nickel ores are the prospective source of mineral raw material for the increasing of nickel and cobalt production on OJSC «MMC «Norilsk Nickel». *Tsvetnye Metally.* 2012. No. 6. P. 25—28 (In Russ.).
12. Stopic S.R., Friedrich B.G. Hydrometallurgical processing of nickel lateritic ores. *Vojnotehnički glasnik.* 2016. Vol. 64. No. 4. P. 1033—1047. DOI: 10.5937/vojtehg64-10592.
13. Mccarthy F., Brock G. Direct nickel process — breakthrough technology. *Proc. of Conf. «Processing of Nickel Ores & Concentrates '15».* Karawara, 2015. P. 1—10.
14. Ma B., Wang C., Yang W., Yang B., Zhang Y. Selective pressure leaching of Fe (II)-rich limonitic laterite ores from Indonesia using nitric acid. *Miner. Eng.* 2013. Vol. 45. P. 151—158. DOI: 10.1016/j.mineng.2013.02.009.
15. Ma B., Yang W., Yang B., Wang C., Chen Y., Zhang Y. Pilot-scale plant study of the innovative nitric acid pressure leaching technology for laterite ores. *Hydrometallurgy.* 2015. Vol. 155. P. 88—94. DOI: 10.1016/j.hydromet.2015.04.016.
16. Kyle J. Nickel laterite processing technologies — where to next? *Proc. of ALTA Nickel/Cobalt/Copper Conf.* Perth, Australia, 2010. <http://researchrepository.murdoch.edu.au/4340>.

17. Калашникова М.И., Цымбулов Л.Б., Набойченко С.С., Колмачихина О.Б. Перспективные направления переработки окисленных никелевых руд применительно к рудам уральских месторождений. *Цвет. металлы*. 2019. No. 8. С. 4—12. DOI: 10.17580/tsm.2019.08.01.
Kalashnikova M.I., Tsybulov L.B., Naboychenko S.S., Kolmachikhina O.B. Innovative processing applicable to the oxidized nickel ores found in the Urals region. *Tsvetnye Metally*. 2019. No. 8. P. 4—12 (In Russ.).
18. Rice N.M. A hydrochloric acid process for nickeliferrous laterites. *Miner. Eng.* 2016. Vol. 88. Iss. 15. P. 28—52. DOI: 10.1016/j.mineng.2015.09.017.
19. Дюивестейн В., Ластра М.Р., Лиу Х. Способ извлечения никеля из Ni—Fe—Mg-латеритной руды с высоким содержанием магния: Пат. 2149910C1 (РФ). 1996.
Djuivesteyn V., Lastra M., Liu Kh. Method of nickel recovery from Ni—Fe—Mg laterite ore with high content of magnesium: Pat. 2149910C1 (RF). 1996 (In Russ.).
20. Колмачихина О.Б., Колмачихин В.Н., Набойченко С.С. Исследование солянокислого выщелачивания окисленной никелевой руды Серовского месторождения. *Металлург*. 2015. No. 1. С. 91—93.
Kolmachikhina O.B., Kolmachikhin V.N., Naboychenko S.S. Study of hydrochloric leaching of oxidized nickel ore of the Serovskoye deposit. *Metallurgist*. 2015. Vol. 59. No. 1-2. P. 87—89.
21. Whittington B.I., Muir D. Pressure acid leaching of nickel laterites: A review. *Miner. Process. Extr. Metall. Rev.* 2000. Vol. 21. P. 527—599. DOI: 10.1080/08827500008914177.
22. Селиванов Е.Н., Сергеева С.В., Удоева Л.Ю., Панкратов А.А. Распределение никеля по фазовым составляющим окисленной никелевой руды Серовского месторождения. *Обогащение руд*. 2012. No. 5. С. 46—50.
Selivanov E.N., Sergeeva S.V., Udoyeva L.Yu., Pankratov A.A. Nickel distribution in the Serovskoye deposit oxide nickel ore phase constituents. *Obogashcheniye rud*. 2012. No. 5. P. 46—50 (In Russ.).
23. Молодых А.С., Вайтнер В.В., Никоненко Е.А., Габдуллин А.Н., Катышев С.Ф. Способ получения никелевого концентрата из никелевой руды Серовского месторождения. *Бутлеровские сообщения*. 2016. Т. 47. No. 9. С. 67—72.
Molodykh A.S., Vaytner V.V., Nikonenko E.A., Gabdullin A.N., Katyshev S.F. A method of producing nickel concentrate from Serov's nickel ore deposit. *Butlerovskie soobshcheniya*. 2016. Vol. 47. No. 9. P. 67—72 (In Russ.).