

МЕТОДЫ КИСЛОТНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ НИКЕЛЬСОДЕРЖАЩИХ РУД

Авфукова Л.С., Белова Т.П.

*ФГБУН Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения
Российской академии наук, Петропавловск-Камчатский, e-mail: ludmila-avfukova93@mail.ru*

В статье рассматриваются процессы обогащения никельсодержащих руд гидрометаллургическими методами. Основное внимание уделено латеритным и сульфидным рудам, так как основные ресурсы никеля сосредоточены на 60% в латеритных и на 40% в сульфидных рудах. Приводится обобщение данных, опубликованных в отечественной и зарубежной литературе по химическому выщелачиванию никельсодержащих руд за последние десять лет. Сопоставление основных параметров на процесс показало, что на процесс выщелачивания влияют: время выщелачивания, температура, расход реагента и его концентрация, использование добавок восстановителей и окислителей в зависимости от типа руды, соотношение Т:Ж, а также скорость перемешивания при чановом выщелачивании. Наибольшее количество работ посвящено применению серной кислоты в различных концентрациях, имеются данные по использованию соляной кислоты. В качестве добавок в литературе рекомендуется применять лимонную кислоту как комплексообразователь, растворы сульфата железа (II) в качестве восстановителя, растворы сульфата железа (III) как окислителя, фторид-ионы в виде солей или фтористоводородной кислоты для выщелачивания силикатных никельсодержащих руд. Показано, что чановое химическое выщелачивание широко применимо для извлечения никеля и сопутствующих металлов из латеритных и сульфидных, массивных, вкрапленных и прожилково-вкрапленных никельсодержащих руд. Для достижения извлечения никеля более 90% процесс выщелачивания следует проводить при повышенной температуре, оптимальным диапазоном температур является 75–80 °С. Введение в выщелачивающий реагент солей, таких как хлориды натрия и калия, фторид кальция, сульфат натрия и других, позволяет сократить время выщелачивания в 2 раза.

Ключевые слова: выщелачивание, латеритная руда, сульфидная руда, выщелачивающий агент, цветные металлы

METHODS OF ACID LEACHING OF NICKEL-CONTAINING ORES

Avfukova L.S., Belova T.P.

*Scientific Research Geotechnological Center, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences,
Petropavlovsk-Kamchatsky, e-mail: ludmila-avfukova93@mail.ru*

The article considers the enrichment of nickel-containing ores using hydrometallurgical methods. The focus is on lateritic and sulphide ores, since the main nickel resources are 60% concentrated in lateritic ores and 40% in sulphide ores. A summary of data published in the domestic and foreign literature on the chemical leaching of nickel-containing ores over the last ten years is given. Comparison of the main process parameters shows that leaching process is influenced by: leaching time, temperature, reagent consumption and its concentration, use of reducing and oxidising agent additives depending on ore type, solid to liquid ratio and stirring speed during vat leaching. The greatest number of works is devoted to the use of sulphuric acid in various concentrations and there are data on the use of hydrochloric acid. According to the literature it is recommended to use citric acid as a complexing agent, iron (II) sulphate solutions as a reducing agent, iron (III) sulphate solutions as an oxidizing agent, fluoride ions as salts or hydrofluoric acid for leaching of silicate nickel-containing ores. Vat chemical leaching is shown to be widely applicable to the extraction of nickel and related metals from lateritic and sulphidic, massive, disseminated and vein-disseminated nickel-containing ores. To achieve a nickel extraction greater than 90%, the leaching process should be conducted at elevated temperatures, with an optimum temperature range of 75-80 °C. The introduction of salts such as sodium and potassium chlorides, calcium fluoride, sodium sulphate and others into the leaching agent can reduce the leaching time by half.

Keywords: leaching, lateritic ore, sulphide ore, leaching agent, non-ferrous metals

Процессы обогащения полезных ископаемых, целью которых является повышение содержания ценных компонентов в перерабатываемом природном сырье, играют все возрастающую роль в развитии современного горно-перерабатывающего комплекса. Основными видами переработки минерального сырья являются пиро-, гидро-, электрометаллургия. Для извлечения никеля применяют все вышеперечисленные методы, однако высокая энергоёмкость

пирометаллургии заставляет нас обратить внимание на повышение эффективности гидрометаллургических процессов.

Ресурсы никеля сосредоточены в основном в сульфидных и латеритных рудах. В латеритных месторождениях содержится 60% никеля, в сульфидных месторождениях – 40%. Сейчас наибольший интерес проявляют к латеритным рудам, хотя сульфидные руды являются более важным объектом для интенсивной и комплексной переработки

минерального сырья, так как помимо никеля содержат кобальт, медь, золото, металлы платиновой группы.

Поиск оптимальной технологии переработки никельсодержащей руды, которая позволила бы получить никель и его соединения высокой чистоты, вовлечь в переработку руды с высоким содержанием железа, максимально извлечь никель в товарную продукцию, является на сегодняшний день весьма актуальной задачей. Наиболее рациональным является создание комбинированной гидрометаллургической технологии переработки руды, обеспечивающей получение очищенных товарных продуктов цветных металлов.

Целью настоящей работы является обобщение данных, опубликованных в отечественной и зарубежной литературе по химическому выщелачиванию никельсодержащих руд.

Кислотные методы выщелачивания – это в первую очередь серноокислотное чановое и кучное выщелачивание с концентрацией кислоты от 0,2 до 3 М. Применяют также солянокислотное выщелачивание. Для повышения эффективности выщелачивания применяют различные добавки – окислители, восстановители, комплексообразователи. Сопоставление основных параметров выщелачивания никельсодержащих руд приведено в таблице.

Экспериментально изучено серноокислотное выщелачивание никеля из латеритной руды Сербии [1] при концентрации H_2SO_4 от 0,2 до 0,4 моль/л и соотношении Т:Ж = 1:10. Определено влияние температуры, времени, концентрации серной кислоты и скорости перемешивания на кинетику извлечения металлов. Эксперименты проводились при температуре 318, 333, 348 и 363 К со временем до двух часов. Скорость перемешивания составляла от 700 до 900 об/мин. Извлечение никеля увеличивается с увеличением температуры, времени выщелачивания и скорости перемешивания. По полученным данным максимальное полученное значение извлечения никеля составляет 78% при температуре 363 К и времени выщелачивания 120 мин с концентрацией серной кислоты 0,2 моль/л.

Использование серной кислоты в концентрациях от 0,5 до 3,0 М [2] для выщелачивания никельсодержащей латеритной руды из Ржаново (Республика Македония) показало, что с увеличением концентрации кислоты максимальный выход выщелоченной фракции увеличивался, % мас.: с 16,37 (% мас.) при 0,5 М;

до 22% при 1,0 М; до 28% при 3 М. Процесс выщелачивания интенсифицировали магнитным перемешиванием со скоростью 600 об/мин, при различных температурах (298, 323, 348 и 363 К) во временном интервале 120 мин. Соотношение твердой и жидкой фаз составляло Т:Ж = 1:50. Установлено, что температура значительно интенсифицирует процесс выщелачивания. После 120 мин выщелачивания в 3 М H_2SO_4 выход выщелоченной фракции увеличился с 28% при 298 К до 84% при 363 К. Процесс выщелачивания в 3 М H_2SO_4 в целом по изучаемому диапазону температур лучше всего описывается моделью Яндера и Гинстлинга – Браунштейна, которая указывает на то, что процесс выщелачивания контролируется диффузией.

Влияние параметров выщелачивания: расхода серной кислоты, плотности пульпы (соотношение Т:Ж), температуры, времени процесса и тонкости помола, на извлечение металлов из никель-магниевого руд Аганозерского месторождения республики Карелия (Россия) изучено с целью разработки комбинированной технологии извлечения никеля и магния [3].

Разработан способ извлечения никеля из растворов или пульп выщелачивания руд [4] на примере выщелачивания латеритной руды Кунгурского месторождения, Урал (Россия). Для чанового выщелачивания была взята руда фракцией 0,2 мм. Руду массой 3 кг подвергли чановому выщелачиванию в стаканах серноокислым раствором 100–120 г/л при 90–95 °С, Т:Ж = 1:5 в пяти последовательно работающих стаканах в течение 3 ч в каждом. По окончании контакта твердое и жидкое перемещали противотоком, в итоге на выходе 1 стакана получали иловую фракцию пульпы с максимальной концентрацией никеля, на выходе 5 стакана – выщелоченную руду, которую после промывки складировали как кек выщелачивания.

Сравнение эффективности выщелачивания никельсодержащих руд растворами серной и соляной кислот [5] показало преимущество серной кислоты для выщелачивания польских латеритов и сапролитового латерита Греции, а соляной кислоты – для лимонитового латерита Греции. Сравнение проводили на примере выщелачивания никельсодержащих латеритных руд Польши и Греции компанией IMN. Польский латерит содержит никель и кобальт с преобладающим количеством кремния, магния и железа.

Сопоставление основных параметров выщелачивания никельсодержащих руд

№	Месторождение	Тип реагента	Время, мин	Температура, °С	Т:Ж	Эффективность выщелачивания, %	Источник
1	Сербия	0,2 М H_2SO_4	120	≈ 90	1:10	Ni – 78	[1]
2	Ржано-Республика Македония	3 М H_2SO_4	120	≈ 90	1:50	Ni – 84	[2]
3	Кунгурское месторождение, Урал (Россия)	100–120 г/л H_2SO_4	180	≈ 90–95	1:5	—	[4]
4	Польша	H_2SO_4 ; HCl	120–180	50–75	2 – 4:10	в присутствии H_2SO_4 – Ni = 90	[5]
5	Греция: а) сапролитовая руда; б) лимонитовая руда	H_2SO_4 ; HCl	120–180	50–75	—	а) в присутствии H_2SO_4 ; HCl – Ni, Co > 90; б) в присутствии HCl – Ni > 90, Co > 80	[5]
6	Серовское месторождение, Северный Урал (Россия)	HCl	180	90	—	Ni – 83; Co – 74; Fe – 49	[6]
7	Провинция Юньнань (Китай)	8 М HCl	120	≈ 80	1:4	Ni – 92,3; Co – 61,5; Mn – 93,5; Mg – 95,5; Fe – 56,3	[7]
8	Юго-запад Ирана	3–5 Н H_2SO_4 ; 3–5 Н $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$	240	95	≈ 1:7	в присутствии 5 Н H_2SO_4 – Ni = 83	[8]
9	Южная Африка	0,1–1 М H_2SO_4 ; 0,5–1 М $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$; 0,5 М $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$	—	30	1:20	а) 0,5 М H_2SO_4 + 0,5 М $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ – 79,6; б) 1 М H_2SO_4 – 74,4	[9]
10	Буркитальское месторождение, Южный Урал (Россия)	16 г/л H_2SO_4 ; 40 г/л FeSO_4 а) лабораторный эксперимент; б) укрупненный лабораторный эксперимент	а) 60–4320; б) 60	а) ≈ 20–25; б) 5	а) 1:1,5; б) 1:2,1	а) Ni = 7,4 – 20,4; Co = 36,9 – 56,3; Mn = 47,0 – 64,7; б) Ni = 7,5; Co = 53,8; Mn = 63,4	[10]
11	Регион Калдаг в Манисе, Турция	200 г/л H_2SO_4 ; NaCl, $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$, Na_2SO_4 , KCl	240–480	80	1:10	Ni = 98,2; Fe = 98,6; Co = 98,9	[11]
12	Урал, Россия	200 г/л H_2SO_4 ; CaF_2 , от 1 до 10 кг/т руды	240	80	1:2	Ni ≈ 94	[12]
13	Месторождение Шануч, Камчатка (Россия)	12 г/л $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$	60–180	80	1:5	Ni до 70	[13]

Эксперименты проводили в реакторе объемом 1–3 л с переменными параметрами pH (0,0–2,1), температуры (20–80 °С), продолжительности процесса (15–240 мин), соотношении Т:Ж (10–40%), реагенты для выщелачивания – H₂SO₄ и HCl кислоты. Установлено, что для выщелачивания польского латерита оптимальным реагентом является H₂SO₄. В результате был достигнут целевой выход никеля 90%, а также повышена селективность выщелачивания никеля по сравнению с нежелательными металлами.

Сапролитовый и лимонитовый латериты Греции содержат Ni и Co, а также Fe, Ca, Al и Mg. Реакторные выщелачивающие испытания проводились с использованием H₂SO₄ или HCl в стеклянных реакторах с механическим перемешиванием на 500 мл и 1000 мл. Авторами были рассмотрены три параметра: температура, концентрация кислоты и соотношение Т:Ж. Особое внимание уделялось соизвлечению Co, а также растворению Fe, Al, Mg и Ca. Для сапролитовой руды результаты атмосферного кислотного выщелачивания и серной и соляной кислотами приводят к извлечению никеля и кобальта более 90%. Повышение концентрации кислоты и температуры, снижение соотношения Т:Ж улучшили извлечение никеля. Для лимонитовой руды извлечение Ni и Co HCl превышало 90 и 80% соответственно, а использование H₂SO₄ было менее эффективным. Повышение температуры улучшает общее извлечение металлов, а увеличение Т:Ж – уменьшает растворение железа обеими кислотами [5].

Комбинированная технология переработки окисленных никелевых руд соляной кислотой проведена на примере Серовского месторождения [6]. Выщелачивание руды проводили в стеклянном реакторе объемом 0,9 дм³, при механическом перемешивании при температуре до 90 °С. По окончании опыта пульпу фильтровали, кек промывали. Авторы измеряли объем полученного фильтрата и промывных вод и контролировали содержание в растворе Ni, Co, Fe_{общ}, в кеке –Ni, Co, Fe_{общ} и SiO₂. Промытый кек сушили в течение 24 ч при температуре 100–105 °С. В результате авторы пришли к выводу, что для максимального извлечения никеля в раствор необходим расход соляной кислоты 1,5 г/г, температура 90 °С, продолжительность выщелачивания 4 ч. Это позволило достичь извлечения никеля в раствор на уровне 83%, 74% кобальта, извлечение железа при этом составило не более 49%.

Выщелачивание латеритной руды Китая [7] проводили соляной кислотой в концентрации 8 моль/л, при скорости перемешивания (300 об/мин), температуре (353 К), соотношении Т:Ж = 1:4 и размерах частиц 0,15 мм. Извлечение компонентов за два часа составило, мас. %: никеля – 92,3, кобальта – 61,5, марганца – 93,5, магния – 95,5 и железа – около 56,3.

Выщелачивание никеля из низкосортной никелевой латеритной руды одного из месторождений, расположенного на юго-западе Ирана, с содержанием никеля 0,88%, проведено серной и лимонной кислотами. При этом достигается 83%-ное извлечение никеля. Лимонная кислота в этих условиях практически бесперспективна [8]. После проведенных исследований авторы пришли к выводу, что руду целесообразно выщелачивать 5 Н серной кислотой при атмосферном давлении, скорости мешалки 1000 об/мин, температуре 95 °С, в течение 4 ч.

Выщелачивание никелевой латеритной руды из месторождения Южной Африки с использованием кислых сред и ионов железа (III) рассмотрено в работе [9]. В качестве выщелачивающих агентов авторы использовали серную кислоту, лимонную кислоту и сульфат железа (III). Для процесса выщелачивания были выбраны следующие параметры: температура – 30 °С; pH растворов 1,0 и 1,5; скорость перемешивания ≈ 200 об/мин. После проведения экспериментов с заданными параметрами сделаны следующие выводы: 1 М серная кислота имеет более высокую степень извлечения никеля, чем лимонная кислота и сульфат железа (III) той же концентрации, и составляет 74,4%. При использовании смеси серной и лимонной кислот концентрацией 0,5 М наблюдается максимальное извлечение никеля – 79,6%.

В присутствии восстановителя происходит избирательное извлечение кобальта серной кислотой из окисленной никель-кобальтовой латеритной руды Буруктальского месторождения [10]. Проведенные лабораторный и укрупненный лабораторный эксперименты показали, что коэффициент селективности извлечения кобальта по отношению к никелю составляет 4,9. Выщелачивание вели раствором, содержащим 16 г/л серной кислоты и 40 г/л сульфата железа (II) при комнатной температуре (от 20 до 24 °С) в течение 1; 3; 5; 24 и 72 ч. Оптимальным оказалось время 1 час. В этих же условиях проводили укрупненный лабораторный эксперимент [10] в реакторе объемом

500 л, но использовали руду фракцией менее 0,8 мм. Выщелачивание вели при температуре окружающей среды плюс 5 °С. Коэффициент селективности в проведенных опытах составил 6,8.

Механизм чанового выщелачивания турецкой латеритной руды из региона Калдаг в Манисе в присутствии добавок рассмотрен в работе [11]. Проба руды содержала 1,2% Ni, 24,8% Fe, 0,062% Co. Испытания проводили в нагреваемом реакционном чане с тефлоновым покрытием и лопастной вращающейся мешалкой при скорости 500 об/мин, температуре 80 °С, размер частиц – 74 мкм, концентрация H₂SO₄ – 200 г/дм³. Извлечение никеля составило 98,2%, кобальта – 98,9%, железа – 98,6%. Кроме того, было исследовано влияние дополнительных веществ, таких как NaCl, Na₂S₂O₅, Na₂SO₄ и KCl, для уменьшения продолжительности выщелачивания. Результаты показали, что добавки ускоряли кинетику выщелачивания и обеспечивали почти такое же извлечение никеля и кобальта через 4 ч по сравнению с результатами, полученными через 8 ч без добавок.

Сернокислотное чановое выщелачивание окисленных руд Урала с использованием добавок фторидов рассмотрено в работе А.М. Ключникова и А.Б. Уманского [12]. Эксперименты проводились при отношении Т:Ж (т:м³), равным 1:2 во всех опытах, в термостатированных реакционных сосудах с перемешиванием, концентрация серной кислоты составляла 200 г/л и время контакта фаз 3–4 ч. Извлечение никеля монотонно возрастает с 70,9 до 82,9% с ростом температуры от 60 до 80 °С.

Фториды оказывают интенсифицирующее воздействие на процесс растворения никелевых силикатных минералов. Интенсификация процесса растворения железистых минералов в присутствии фторидов обусловлена процессами комплексообразования с появлением фторидных комплексных ионов вида [FeF₆]³⁻. Введение добавок фторидов повышает извлечение никеля на 8–12%, а также приводит к резкому повышению выхода в раствор железа, практически пропорциональному повышению степени извлечения никеля. Однако введение фторида кальция приводит к повышению расхода кислоты с 345 до 373–385 кг/т. При этом оптимальный расход добавки составляет около 5–7 кг/т. Дальнейшее повышение расхода нецелесообразно, так как приводит к нецелевому перерасходу реагента. Оптимальные

условия проведения процесса обеспечивают извлечение в раствор до 94% никеля [12].

Ранее нами было показано [14], что в условиях Камчатского края можно рассматривать использование в качестве реагента конденсатов высокотемпературных геотермальных теплоносителей для выщелачивания тонко- и прожилково-вкрапленных сульфидных кобальт-медно-никелевых руд. Были использованы природные растворы и модельные композиции различного состава, имеющие кислую реакцию. Так установлено, что оптимальным реагентом является с концентрацией кислот, моль/л: HCl – 0,5, H₂SO₄ – 0,2, HF – 0,1. В этих условиях содержание никеля в продуктивном растворе составило 4,3 г/л. Дальнейшее концентрирование продуктивного раствора предлагается проводить сорбционным методом [15, 16].

В НИГТЦ ДВО РАН получены результаты по высокотемпературному выщелачиванию сульфидной кобальт-медно-никелевой руды растворами «биогеогенного» и «химического» железа (III). «Биогеогенное» железо получали с помощью иммобилизованной биомассы железобактерий, «химическое» железо – путем растворения сульфата железа (III) в подкисленной воде. Выщелачивание проводили в реакторе с механическим перемешиванием пульпы (≈ 80–100 об/мин), при температуре пульпы ~ 80 °С, плотность пульпы составляла Т:Ж = 1:5 (300 г руды к 1500 мл раствора Fe³⁺), размер фракции – < 100 мкм, время выщелачивания – 3 ч. Содержание металлов в исходной руде: Ni – 6,80%, Cu – 1,42%, Co – 0,16%. Установлено, что раствор «химического» железа более эффективен при извлечении металлов, по сравнению с «биогеогенным» железом на 9,4% по никелю, на 33,3% по меди, на 6,3% по кобальту [13].

Заключение

Переработку минерального сырья осуществляют с помощью пиро-, гидро- и электрометаллургии. Первые два способа исторически являются основными способами. С древних времен до конца XIX в. производство металлов осуществлялось исключительно пирометаллургическими процессами. На рубеже XIX–XX вв. промышленную значимость приобрела другая крупная ветвь металлургии – гидрометаллургия.

Анализ зарубежной и отечественной литературы показывает, что в настоящее время проводится большое количество ис-

следований по разработке технологических схем чанового химического выщелачивания никельсодержащих руд. Н. Basturkcü и др. выявили, что наибольший эффект выщелачивания при извлечении никеля (более 98,2%) из латеритной руды района Калдаг (Турция) происходит в присутствии серной кислоты с добавками. Добавки используются для уменьшения времени выщелачивания. А.М. Клышников и другими при переработке латеритной руды Урала (Россия) в присутствии серной кислоты и фторида кальция было достигнуто 94%-ное извлечение никеля. J. Li и др. получили 92,3%-ное извлечение никеля, применяя соляную кислоту для выщелачивания (провинция Юньнань, Китай). Польский и греческий латерит J. Mäkinen и др. подвергали сернокислому выщелачиванию, в результате этого было достигнуто 90%-ное извлечение никеля.

Список литературы

1. Srećko Stopić, Bernd Friedrich, Reinhard Fuchs. Sulphuric acid leaching of the Serbian nickel lateritic ore. *ERMETALL*. 2003. Vol. 56. No. 4. P. 198–203.
2. Petrovski A., Načevski G., Dimitrov A.T., Paunović P. Kinetic models of nickel laterite ore leaching process. *Machines. Technologies. Materials. Year XIII*. 2019. No. 11. P. 487–490.
3. Smirnov K.M., Molchanova T.V., Anan'ev A.V., Krylova O.K. Technology of hydrometallurgical processing of the nickel – magnesium ores from the Aganozero deposit. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2018. No. 7. P. 614–618.
4. Агалаков И.П., Ященко И.Э., Калошин А.А., Орлов С.Л., Басков Д.Б. Способ извлечения никеля из растворов или пульпы выщелачивания руд // Патент РФ 2368677С2. Патентообладатель Басков Д.Б. 2009. Бюл. № 27.
5. Mäkinen J., et al. Metal Recovery from Low Grade Ores and Wastes Plus. D3.6 Report on metal extraction of low-grade ores and wastes. METGROW + H2020 project, grant agreement №690088. 2018. 20 p.
6. Колмачихина О.Б. Комбинированная технология переработки окисленных никелевых руд (на примере Серовского месторождения): дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2018. 132 с.
7. Li J., Xu Z., Wang R., Yang Gao Y., Yang Y. Study on leaching kinetics of laterite ore using hydrochloric acid. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. 2019. No. 55 (3). P. 711–720.
8. Fatahi M., Noaparast M., Shafaei S.Z. Nickel extraction from low grade laterite by agitation leaching at atmospheric pressure. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2014. Vol. 24. No. 4. P. 543–548.
9. Ndlovu S., Simate G. The leaching of nickel laterite ore using acidic media and ferric ions. *XXII ENTMMME / VII MSHMT – Ouro Preto-MG*. 2007. P. 197–202.
10. Сосновский М.Г., Гуляев С.В., Зарков А.В. Способ переработки окисленной никель-кобальтовой руды // Патент РФ 2694188. Патентообладатель ПАО «Мечел». 2018.
11. Basturkcü H., Acarkan N. Leaching behaviour of a turkish lateritic ore in the presence of additives. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. 2016. no. 52 (1). P. 112–123.
12. Клюшников А.М., Уманский А.Б. Использование добавок фторидов при выщелачивании окисленных никелевых руд Урала // *Вестник ВСГУТУ*. 2013. № 3. С. 5–9.
13. Левенец О.О., Хайнасова Т.С., Балыков А.А., Трухин Ю.П. Высокотемпературное выщелачивание сульфидной руды месторождения Шануч растворами трехвалентного железа // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2016. № S31. С. 254–259.
14. Latkin A.S., Belova T.P. Use of technogenic and natural solutions in hydrometallurgical operations. *Journal of Mining Science*. 1998. Vol. 34. No. 2. P. 185–189.
15. Белова Т.П., Гавриленко Ю.С., Ершова Л.С. Адсорбция меди, никеля, кобальта и железа натуральным цеолитом из водных растворов в динамическом режиме // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2014. № S2. С. 300–307.
16. Белова Т.П., Ершова Л.С. Сорбция цветных металлов из продуктивных растворов БХВ катионитом КУ-2-8 // *Естественные и технические науки*. 2018. № 4 (118). С. 98–102.