

УДК 549.08

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ ЕГО ПЕРЕРАБОТКИ

С. П. НАГАЕВА¹, руководитель научно-исследовательской минералогической лаборатории, SPNag@yandex.ru

А. В. КУПЦОВА¹, минералог департамента технологических исследований

¹ СП ЗАО «ИВС», Санкт-Петербург, Россия

Введение

В настоящее время проблема переработки техногенного сырья является весьма актуальной и требует внимательного и тщательного изучения его вещественного состава [1–5]. Отходы горно-обогатительного производства в виде отвалов и хвостохранилищ занимают обширные территории и содержат существенную часть недоизвлеченного полезного компонента. Подобные объекты приобретают статус техногенных месторождений. В то же время их минеральный состав, в особенности «лежалых» отходов обогащения, достаточно сложен и разнообразен, в основном из-за присутствия новообразованных фаз и сильно изменившихся первичных минералов под влиянием фактора времени и прошедших физико-химических процессов. Переработка техногенного сырья может стать дополнительным источником прибыли предприятий и сократить экологическую нагрузку на биосферу.

Научно-исследовательская минералогическая лаборатория (НИМЛ) СП ЗАО «ИВС», занимающаяся изучением вещественного состава исходных руд и продуктов их обогащения, особое внимание уделяет исследованию техногенного сырья.

Методика и результаты исследования

В НИМЛ были предоставлены 12 проб, отобранных из техногенного месторождения, которое является многолетними «лежалыми» отходами аммиачно-карбонатной технологии обогащения окисленных никелевых руд латеритно-серпентинитового типа [6–13]. Для изучения проб применялся комплекс минералогических исследований, включающий в себя рентгенофазовый анализ, оптическую и электронную микроскопию.

По данным рентгенофазового анализа исходные пробы в целом имеют сходный минеральный состав. На **рис. 1** представлены наиболее характерные дифрактограммы исходных проб. Основную массу проб составляют Fe-шпинелиды: и Cr-шпинелиды, представленные, соответственно, магнетитом (реже — маггемитом) и хромитом (хром-пикотитом). Значимую часть занимают минералы группы оливина (форстерит, фаялит) и группы серпентина. На некоторых дифрактограммах идентифицированы пики, принадлежащие тальку и гипсу. Также в пробах присутствуют кварц и минералы группы кальцита в различных соотношениях.

Приведены результаты комплексного минералогического исследования проб «лежалых» отходов обогащения окисленных никелевых руд. Неблагоприятный гранулометрический состав отходов, неоднородность состава магнитных и немагнитных минералов, агрегативные состояния тонких зерен и взаимная их намагниченность будут представлять значительные трудности для магнитных и флотационных методов переработки данного техногенного сырья.

Ключевые слова: техногенные месторождения, окисленные никелевые руды, минералогия, оптическая микроскопия, электронная микроскопия, рентгенофазовый анализ.

DOI: dx.doi.org/10.17580/gzh.2016.11.02

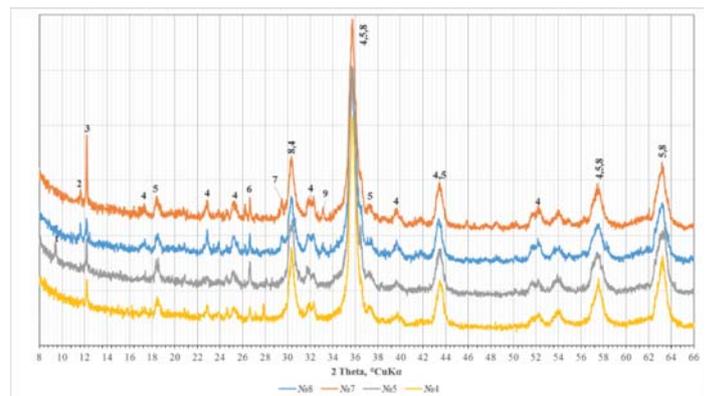


Рис. 1. Дифрактограммы исходных проб из скважин «лежалых» хвостов обогащения Fe-Ni-руды с обозначением основных минеральных фаз:

1 — тальк; 2 — сульфаты (гипс); 3 — минералы группы серпентина; 4 — оливин (форстерит, фаялит); 5 — Cr-шпинелиды (хромит, хром-пикотит); 6 — кварц; 7 — кальцит; 8 — магнетит, маггемит; 9 — пирит

Химический состав исходных проб представлен в графическом виде на **рис. 2**. Содержание Fe них изменяется от 34,5 до 42,4 % (масс.), Ni — 0,28–0,41 % (масс.), Co — 0,062–0,075 % (масс). Корреляции между двумя последними элементами и железом не выявлены. Выделяются скважины с повышенным содержанием серы, что связано с присутствием в пробах пирита и пирротина.

Ввиду того, что пробы имеют сходный минеральный и химический состав, для подробного минералогического анализа была выбрана наиболее представительная проба № 8 с содержанием, %: 34,5 Fe (FeO — 21,2 %; Fe₂O₃ — 25,9 %); 0,35 Ni; 0,069 Co; 0,006 Cu; 0,021 Zn; 0,35 S; 16,5 SiO₂; 3,92 Al₂O₃;

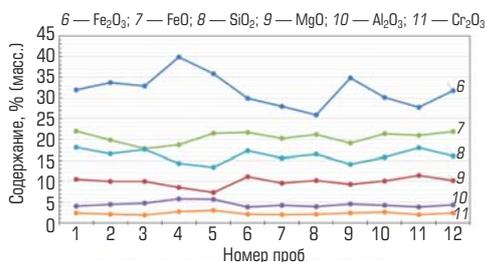
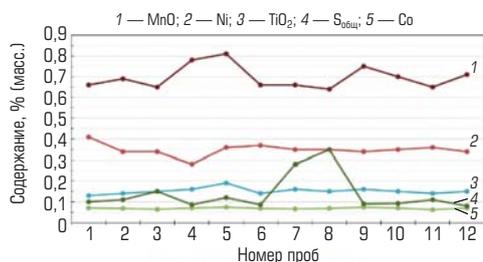


Рис. 2. Содержание элементов в исходных пробах из скважин «лежащих» хвостов обогащения Fe-Ni-руды

10,2 MgO; 1,71 CaO; 2,06 Cr₂O₃; 0,15 TiO₂; 0,64 MnO. Гранулометрический состав пробы методом мокрого ситового отсева показал, что проба в основном представлена шламистым материалом (табл. 1): выход фракции крупностью менее 0,045 мм составляет 85,56 %, при этом преобладающая часть (76,82 %) — это фракция крупностью менее 0,02 мм. Анализ распределения показал, что железо и никель концентрируются во фракции крупностью менее 0,02 мм. Отмечается увеличение со-

держания железа от крупного класса (2,42 %) к мелкому (41,6 %), для никеля же характерно увеличение содержания во фракциях менее 0,6 мм более 0,02 мм (0,38–0,39 %).

Таблица 1. Гранулометрический состав и распределение железа и никеля в исходной пробе

Класс крупности, мм	Выход, %	Содержание, %		Распределение, %	
		Ni	Fe	Ni	Fe
+0,8	1,18	0,04	2,42	0,13	0,07
-0,8+0,16	1,64	0,31	22,80	1,52	0,95
-0,16+0,1	3,45	0,39	27,90	4,01	2,45
-0,1+0,071	3,29	0,38	29,80	3,73	2,49
-0,071+0,045	4,84	0,38	33,50	5,49	4,13
-0,045+0,02	8,79	0,36	38,00	9,45	8,51
-0,02	76,82	0,33	41,60	75,68	81,40
Итого	100	0,33	39,26	100	100

Таблица 2. Минеральный состав исходной пробы № 8 с распределением Fe и Ni

Минералы	Содержание минералов, %	Среднее содержание элементов*, % (вес.)		Распределение элементов, % (отн.)	
		Fe	Ni	Fe	Ni
Cr-шпинели	4	14,8		1,7	
Fe-шпинели	50	59	0,16	85,4	21,8
Силикаты (оливин, серпентин, пироксены)	39	10,8	0,7	12,2	78,2
Сульфиды (пирит, пирротин)	0,5	46		0,7	
Ракушечник	5				
Органическое вещество	0,5				
Кварц	1				
Исходная проба № 8	100	34,5	0,37	100	100

* Среднее содержание элементов в группах минералов по данным микрозондового анализа (VEGA 3 LMU (TESCAN)).

Комплексный минералогический анализ (табл. 2), показал, что проба № 8 состоит в основном из минералов группы шпинели (54 %) и сильно измененных силикатов (39 %), представленных оливином, серпентином и пироксенами. Отметим, что силикаты в пробе подвержены в различной степени вторичным изменениям, которые произошли как в процессе геологического образования латеритных руд, так и в процессе складирования отходов после их аммиачно-карбонатного выщелачивания. Поэтому целесообразно рассматривать минеральный состав пробы и баланс полезных компонентов (Fe, Ni) по группам минералов, опираясь на их средний элементный состав. Установлено, что основная часть (87,1 % (отн.) железа сконцентрирована в минералах группы шпинелей: 12,2 % (отн.) приходится на силикатные минералы (серпентин, оливин, пироксен, хлорит) и лишь 0,7 % — на сульфиды железа, в то время как основная форма нахождения никеля приходится на силикаты (серпентины, оливин, пироксены) — 78,2 % (отн.) и 21,8 % (отн.) сконцентрировано в минералах группы шпинелей. Собственных минеральных форм никеля в данной пробе не обнаружено. Таким образом, одновременное концентрирование Fe и Ni механическими методами обогащения не представляется возможным.

Особое внимание было уделено минералам группы шпинелей — как основным концентраторам Fe. Минералы группы шпинелей являются сложными оксидами, которые по преобладанию основного катиона можно отнести к Cr- и Fe-шпинелям [13].

Fe-шпинели характеризуются переменным составом и обладают магнитными свойствами. По данным электронной микроскопии, общее содержание железа в шпинелях может изменяться от 52,93 до 68,79 % (табл. 3). Отмечается постоянное присутствие оксидов алюминия, кремния и марганца. Также присутствуют разновидности с примесью никеля, титана. Fe-шпинель с высоким содержанием железа по оптическим характеристикам диагностирована как маггемит, для которого характерно постоянное присутствие никеля (от 0,4 до 0,7 %), хрома, магния.

Cr-шпинели, представленные в основном хромитами, имеют также переменный состав. Колебания содержания Cr₂O₃ — от 42,35 до 63,22 %, Fe — от 12,37 до 14,23 %, Al₂O₃ — от 9,99 до 27,02 %.

Изучение минералов группы шпинелей с применением электронной микроскопии показало, что минералы этой группы отличаются широким диапазоном концентраций как основного катио-

Таблица 3. Химический состав минералов группы Fe-шпинелей (по данным микронзондового анализа)

Номер аншлифа	Содержание, %									
	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	MnO	Fe ₂ O ₃	NiO	Суммарно	Fe _{общ}
1		17,57	2,40	0,35	2,74	1,26	75,68		100,0	52,93
2	0,69	13,92	4,22		2,37	0,67	78,13		100,0	54,64
3		14,78	1,99	1,28	2,52	1,04	78,39		100,0	54,83
4	0,72	9,16	4,60		5,50	0,49	79,53		100,0	55,62
5	0,45	10,04	3,69		2,79	0,72	82,31		100,0	57,57
6		9,54	3,49		3,32	0,73	82,92		100,0	57,99
7	0,56	8,17	4,09		1,77	0,69	83,82	0,90	100,0	58,62
8	0,64	5,42	3,65	0,61	2,29	1,56	85,83		100,0	60,03
9	0,48	5,83	4,79		1,91	0,44	86,55		100,0	60,53
10		5,38	2,66	0,99	3,82		86,75	0,40	100,0	60,67
11		6,56	1,48	0,54	3,31	0,69	87,42		100,0	61,14
12	0,66	3,72	4,87		2,14		88,61		100,0	61,97
13	3,79		6,50		0,43	0,67	88,71		100,0	62,04
14		5,48	3,00		0,61	1,01	89,00	0,90	100,0	62,25
15		3,38	5,13		1,05	0,59	89,85		100,0	62,84
16	0,45	4,08	2,86		1,50	1,01	90,09		100,0	63,01
17		3,21	2,22		2,26	0,43	91,08	0,80	100,0	63,70
18	0,75				1,90		96,64	0,71	100,0	67,59
19	0,5				0,91		98,08	0,51	100,0	68,60
20	0,52				0,46		98,35	0,67	100,0	68,79

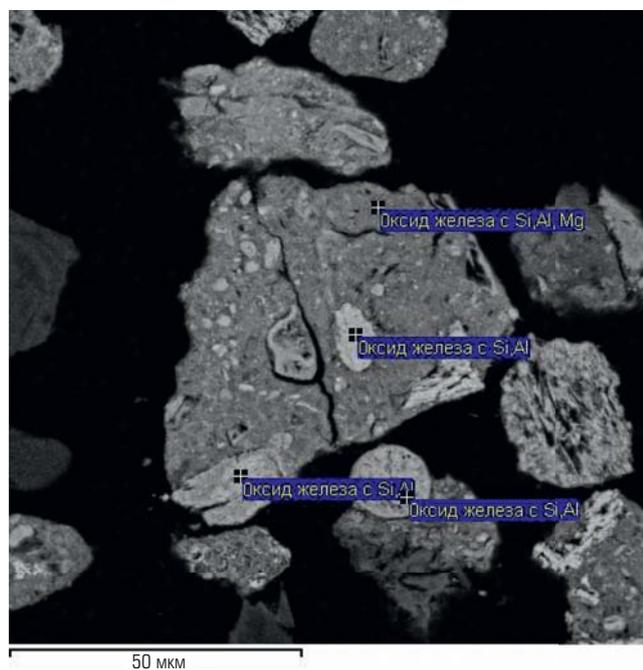


Рис. 3. Зерна Fe-шпинелидов в исходной пробе, фракция $-45+20$ мкм. Изображение в BSE

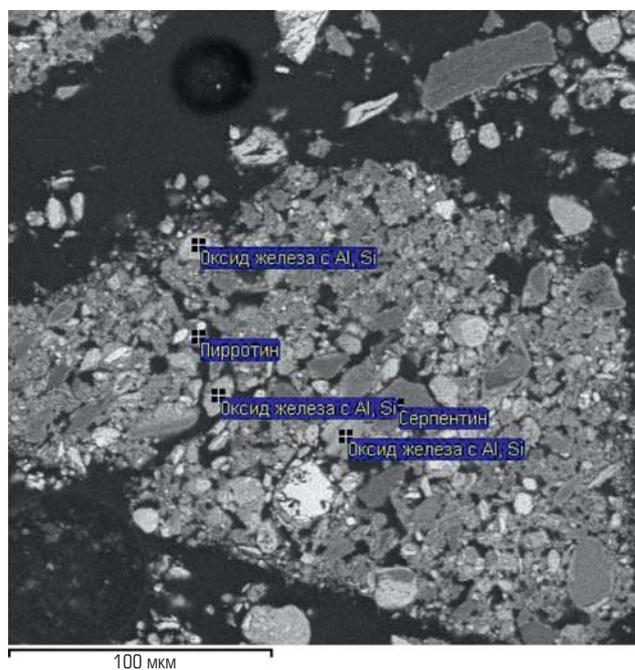


Рис. 4. Зерна Fe-шпинелидов в исходной пробе, фракция -20 мкм. Агрегат, состоящий из отдельных зерен оксидов железа и силикатов. Изображение в BSE

Таблица 4. Результаты рентгенофлуоресцентного анализа продуктов разделения классифицированного материала исходной пробы постоянным магнитом

Продукт	Выход, %		Содержание, %		Извлечение от операции, %	
	от операции	от руды	Fe	Ni	Fe	Ni
Магнитный	35,87	1,24	58,3	0,38	73,93	25,84
Немагнитный	64,13	2,21	11,5	0,61	26,07	74,16
Исходный класса -0,16+0,1 мм	100,0	3,45	28,29	0,53	100,0	100,0
Магнитный	43,69	1,44	58,9	0,34	76,04	25,39
Немагнитный	56,31	1,85	14,4	0,775	23,96	74,61
Исходный класса -0,1+0,071 мм	100,0	3,29	33,84	0,58	100,0	100,0
Магнитный	50,48	2,44	60,4	0,26	82,68	28,96
Немагнитный	49,52	2,39	12,9	0,65	17,32	71,04
Исходный класса -0,071+0,045 мм	100,0	4,84	36,88	0,45	100,0	100,0
Магнитный	63,34	5,57	59,6	0,32	88,18	47,96
Немагнитный	36,66	3,22	13,8	0,6	11,82	52,04
Исходный класса -0,045+0,02 мм	100,0	8,79	42,81	0,42	100,0	100,0
Магнитный	76,97	59,13	45,1	0,3	93,20	66,72
Немагнитный	23,03	17,69	11,0	0,5	6,80	33,28
Исходный класса -0,02 мм	100,0	76,82	37,25	0,35	100,0	100,0

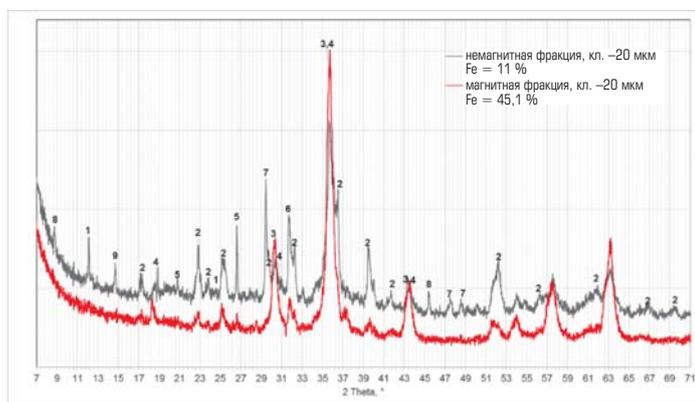


Рис. 5. Дифрактограммы продуктов разделения по магнитным свойствам исходной пробы класса -20 мкм D2 PHASER (CuKα) с обозначением основных минеральных фаз:

- 1 — минералы группы серпентина $Mg_6(Si_4O_{10})(OH)_2$;
- 2 — форстерит Mg_2SiO_4 ; 3 — магнетит $FeFe_2O_4$, маггемит;
- 4 — Cr-шпинелиды (хромит, хром-пикотит) $(Mg,Fe)(Cr,Al)_2O_4$;
- 5 — кварц; 6 — фаялит Fe_2SiO_4 ; 7 — кальцит $CaCO_3$;
- 8 — слюда; 9 — гипс

на (хрома или железа), так и элементов примесей. Как правило, зерна неоднородны по своему составу и зачастую представлены агрегатами, состоящими из отдельных зерен, сцементированных основной массой того же состава (рис. 3, 4). Отличительной чертой таких агрегатов является более низкое содержание железа (55–58 %) за счет увеличения в них содержания оксида алюминия (10–14 %). Содержание никеля в минералах группы шпинели не превышает 1 %, и его наличие характерно для железистых

разновидностей. В хромистых разновидностях никель не обнаружен.

Ввиду присутствия в исходной пробе магнитных железистых минералов (Fe-шпинели, магнетит, маггемит) и немагнитных минералов (оливины, серпентины) проведено разделение классифицированного материала пробы постоянным магнитом. Результаты приведены в табл. 4.

В целом для магнитных продуктов характерно повышенное содержание железа во всех классах крупности при достаточно высоком извлечении. Поскольку основную нагрузку несет тонкий класс (выход класса 20 мкм составляет 76,82 %), а его разделение недостаточно эффективно, суммарный магнитный продукт содержит всего 47,31 % железа при выходе 69,81 %. Рентгенофазовый анализ продуктов (рис. 5) показал, что в магнитной фракции содержатся в основном Fe и Cr-шпинелиды (магнетит, маггемит, хромит — фазы 3, 4) и частично оливины (форстерит, фаялит — фазы 6, 2). Для немагнитной фракции характерно явное присутствие минералов группы серпентина (фаза 1), слюды (фаза 8), кальцита (фаза 7), кварца (фаза 5), оливинов (фаза 6, 2). Также в немагнитной фракции присутствуют в значимых количествах Cr-шпинелиды (фаза 4) и Fe-шпинелиды (фаза 3).

Неэффективное разделение данной пробы по магнитным свойствам обуславливается, весьма тонким продуктом, взаимным намагничиванием слабомагнитных минералов магнитными, а также весьма неоднородным составом Fe-шпинелей. Как показывают данные электронно-микроскопического исследования, зерна железистой шпинели весьма неоднородны по составу, что влияет на магнитные свойства минерала, и в тонких классах образуют агрегаты, состоящие из отдельных зерен оксидов железа и силикатов.

Заключение

Проведенные исследования проб «лежалых» отходов аммиачно-карбонатного обогащения окисленной никелевой руды показали, что наряду с высоким содержанием Fe — 34,5–42,4 % (масс.) в пробах содержится также незначительное количество промышленно ценных металлов, таких, как Ni — 0,28–0,41 % (масс.) и Co — 0,062–0,075 % (масс.). По вещественному составу пробы состоят в основном из минералов группы шпинели, Fe-разновидностью которой является магнетит (маггемит) и Cr-разновидностью — хромит и хром-пикотит. Значимую часть занимают минералы группы оливина (форстерит, фаялит) и минералы группы серпентина. Fe-шпинели характеризуются переменным составом; по данным электронной микроскопии, общее содержание железа в шпинелях может изменяться от 52,9 до 68,8 %. Зерна оксидов железа неоднородны по составу и зачастую представляют собой агрегаты, состоящие из отдельных зерен, сцементированных основной массой того же состава.

Баланс металлов по минералам показывает, что основная часть Fe (87,1 % (отн.)) сконцентрирована в минералах группы шпинели, в то время как основная форма нахождения никеля приходится на силикаты (серпентины) — 78,2 % (отн.). Таким образом, одновременное концентрирование железа и никеля в один продукт механическими методами обогащения не представляется возможным. Неблагоприятный гранулометрический состав исходного сырья (выход класса –20 мкм составляет 76,82 %), неоднородность состава магнитных и немагнитных минералов (магнетит, маггемит), агрегативное состояние тонких зерен, а также взаимная их намагнитченность будут представлять значительные трудности при реализации магнитных и флотационных способов обогащения. По мнению авторов данной статьи, перспективным направлением переработки данного типа сырья являются гидрометаллургические процессы обогащения.

Библиографический список

- Аксенов Е. М., Садыков Р. К., Алискеров В. А., Киперман Ю. А., Комаров М. А. Техногенные месторождения — проблемы и перспективы вовлечения в хозяйственный оборот // Разведка и охрана недр. 2010. № 2. С. 17–20.
- Дорошенко М. В., Башлыкова Т. В. Технологические свойства минералов. Справочник для технологов. — М.: Теплоэнергетик, 2007. — 296 с.
- Изоитко В. М. Технологическая минералогия и оценка руд. — СПб.: Наука, 1997. — 82 с.
- Технологическая минералогия природных и техногенных месторождений : сб. статей 9-го Российского семинара по технологической минералогии, Магнитогорск, 22–24 апреля 2014 г. / под ред. В. В. Щипцова. — Петрозаводск : Карельский научный центр РАН, 2015. — 171 с.
- Прогрессивные методы обогащения и комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья (Плаксинские чтения-2014) : материалы междунар. совещ., 16–19 сентября 2014 г. / под общ. ред. В. А. Чантурия. — Алматы : АО «Центр наук о Земле, металлургии и обогащения», 2014. — 624 с.
- Резник И. Д., Ермаков Г. П., Шнейрсон Я. М. Никель : в 3 т. — М.: ОО «Наука и технологии». 2001. Т. 2: Окисленные никелевые руды. Характеристика руд. Пирометаллургия и гидрометаллургия окисленных никелевых руд. — 468 с.
- Санникова О. В., Медведев А. С. Утилизация отвалов никелевых предприятий, перерабатывающих окисленные руды аммиачно-карбонатной технологии // Металлург. 2010. № 7. С. 72–77.
- Баженова О. В., Медков М. А., Юдаков А. А., Чириков А. Ю., Медведев А. С. О способах переработки отходов окисленных никелевых руд // Устойчивое развитие. Рациональное природопользование : сб. тр. междунар. конф. — Тула, 2010. С. 32–34.
- Баженова О. В., Медведев А. С., Медков М. А., Чириков А. Ю. Варианты гидрометаллургической переработки техногенных отходов окисленных никелевых руд // IV Международный конгресс «Цветные металлы-2012» : сб. докл. — Красноярск, 2012. С. 80–82.
- Quast K., Connor J. N., Skinner W. et al. Preconcentration strategies in the processing of nickel laterite ores. Part 1: Literature review // Mineral Engineering. 2015. Vol. 79. P. 261–268.
- Aiglsperger T., Proenza J. A., Lewis J. F. et al. Critical (REE, Sc, PGE) in Ni laterites from Cuba and the Dominican Republic // Ore Geology Reviews. 2016. Vol. 73. Part 1. P. 127–147.
- Farrokhpay S., Filippov L. Challenges in processing nickel laterite ores by flotation // International Journal of Mineral Processing. 2016. Vol. 151. P. 59–67.
- Senanayake G., Childs J., Akerstrom B. D., Pugaev D. Reductive acid leaching of laterite and metal oxides — A review with new data for Fe(Ni,Co)OOH and alimonitic ore // Hydrometallurgy. 2011. Vol. 110. P. 13–23. **ГЖ**

«GORNYI ZHURNAL»/«MINING JOURNAL», 2016, № 11, pp. 9–14
DOI: dx.doi.org/10.17580/gzh.2016.11.02

Mining and processing waste quality appraisal in its processing forecast

Information about authors

S. P. Nagaeva¹, Head of Mineralogy Research Laboratory, SPNag@yandex.ru

A. V. Kuptsova¹, Mineralogist of Production Research Department

¹ IVS Joint Venture, Saint-Petersburg, Russia

Abstract

Currently the issues of mining waste processing are of high concern and require careful and comprehensive analysis of the waste material composition to be undertaken for predictive assessment of the waste processing approaches. Mineral mining and processing wastes (dirt dumps, tailings pond, etc.) cover vast areas and contain often substantial volume of unrecovered useful components. As regards the content of valuable components, mining and processing wastes acquire the status of man-made deposits as of today. Mineral composition of such deposits is complex and versatile mostly owing to newly generated phases and due to strongly altered primary minerals as affected by time and physicochemical processes.

This article reports the results of integrated mineralogical analysis of old waste sampled from tailings of ammonia-carbonate treatment of oxidized nickel ore. The studies involved X-ray phase analysis and optical and electron microscopy. The grain size composition determined by wet screen sizing shows that the samples are mostly composed of slime material.

Materially, the samples mostly contain spinel and olivine group minerals as well as serpentine group minerals. Fe-spinels exhibit variable composition and are often aggregates of individual grains cemented by the matrix of the same composition. The balance of metals per minerals shows that ferrum is mostly concentrated in spinel group minerals, while nickel occurs mostly in silicates (serpentes).

The magnetic separation of classified product samples shows that separation of material larger than 20 μm is effective, while separation of material of -20 μm size grade is less effective. On the whole, the magnetic separation has allowed the magnetic product with the iron content of 47.31% and the yield of 69.81%. Unfavorable grain size composition of the initial feedstock, nonuniform content of magnetic and nonmagnetic minerals, aggregates of fine grains and their mutual magnetization intensity will present difficulties on magnetic concentration and flotation of such material.

Keywords: man-made deposits, oxidized nickel ore, mineralogy, optical microscopy, electron microscopy, X-ray phase analysis.

References

- Aksenov E. M., Sadykov R. K., Aliskerov V. A., Kiperman Yu. A., Komarov M. A. Technogenic deposits — problems and involving prospects in economic circulation. *Razvedka i okhrana nedr.* 2010. No. 2. pp. 17–20.
- Doroshenko M. V., Bashlykova T. V. *Technological properties of minerals : reference book for industrial engineers.* Moscow : Teploenergetik, 2007. 296 p.
- Izoitko V. M. *Technological mineralogy and ore assessment.* Saint Petersburg : Nauka, 1997. 82 p.
- Technological mineralogy of natural and technogenic deposits : collection of articles of the 9-th Russian*

- technological mineralogy seminar, Magnitogorsk, 22–24 April 2014. Under the editorship of V. V. Shchiptsov. Petrozavodsk: Karelia Science Center RAS, 2015. 171 p.
5. *Progressive methods of concentration and complex processing of natural and technogenic mineral raw materials (Plaksin readings-2014): materials of international meeting, 16–19 September 2014.* Editor: V. A. Chanturiya. Almaty: JSC «Center of Earth Sciences, Metallurgy and Beneficiation», 2014. 624 p.
 6. Reznik I. D., Ermakov G. P., Shneerson Ya. M. Nickel: in three volumes. Volume 2: Oxidized nickel ores. Characteristics of ores. Pyrometallurgy and hydrometallurgy of oxidized nickel ores. Moscow: LLC «Nauka i tekhnologii», 2001. 468 p.
 7. Sannikova O. V., Medvedev A. S. Recycling tailings of nickel enterprises processing oxide-bearing ores by ammonia-carbonate technology. *Metallurg.* 2010. No. 7. pp. 72–77.
 8. Bazhenova O. V., Medkov M. A., Yudakov A. A., Chirikov A. Yu., Medvedev A. S. About the methods of waste recycling of oxidized nickel ores. Stable development. *Rational natural use: collection of proceedings of international conference.* Tula, 2010. pp. 32–34.
 9. Bazhenova O. V., Medvedev A. S., Medkov M. A., Chirikov A. Yu. Methods of hydrometallurgical processing of anthropogenic wastes of oxidized nickel ores. *IV International congress "Non-ferrous metals-2012": collection of reports.* Krasnoyarsk, 2012. pp. 80–82.
 10. Quast K., J. Connor N., Skinner W. et al. Preconcentration strategies in the processing of nickel laterite ores. Part 1: Literature review. *Mineral Engineering.* 2015. Vol. 79. pp. 261–268.
 11. Aiglsperger T., Proenza J. A., Lewis J. F. et al. Critical (RE, Sc, PGE) in Ni laterites from Cuba and the Dominican Republic. *Ore Geology Reviews.* 2016. Vol. 73, Part 1. pp. 127–147.
 12. Farokhpay S., Filippov L. Challenges in processing nickel laterite ores by flotation. *International Journal of Mineral Processing.* 2016. Vol. 151. pp. 59–67.
 13. Senanayake G., Childs J., Akerstrom B. D., Pugaev D. Reductive acid leaching of laterite and metal oxides — A review with new data for Fe(Ni,Co)OOH and alimonitic ore. *Hydrometallurgy.* 2011. Vol. 110. pp. 13–23.

УДК 549.27:549.28

БЛАГОРОДНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ ЕЛАНСКОГО МЕДНО-НИКЕЛЕВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

С. П. НАГАЕВА¹, руководитель научно-исследовательской минералогической лаборатории, SPNag@yandex.ru

А. С. СИЗЫХ¹, зам. руководителя научно-исследовательской минералогической лаборатории

С. В. ПЕТРОВ², доцент, канд. геол.-минерал. наук

¹ СП ЗАО «ИВС», Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Приведены результаты изучения вещественного состава проб руд Еланского месторождения. Дано описание выявленных минеральных форм благородных металлов (собственные минеральные формы металлов платиновой группы, золота, серебра). Приведен минеральный баланс благородных металлов.

Ключевые слова: медно-кобальт-никелевые руды, минеральный состав, минералы золота, серебра, металлы платиновой группы.

DOI: [dx.doi.org/10.17580/gzh.2016.11.03](https://doi.org/10.17580/gzh.2016.11.03)

Введение

Металлы платиновой группы (МПГ) являются ценнейшими полезными ископаемыми. Россия располагает крупной, но постепенно истощающейся минерально-сырьевой базой МПГ [1]. Одной из перспективных платиноносных провинций является Воронежская [1–13].

В 1960–1970-х годах в Воронежском регионе был выявлен ряд сульфидных платиноидно-медно-кобальтово-никелевых месторождений и проявлений, которые в тот период рассматривались в качестве резервной минерально-сырьевой базы цветных и благородных металлов. В настоящий момент для долгосрочного социально-экономического развития и расширения производственного комплекса Центрального федерального округа РФ важнейшее сульфидные медно-никелевые месторождения, сосредоточенные в пределах Воронежского кристаллического массива (ВКМ), приобретают важнейшее значение.

Выявленная рудоносная провинция медно-никелевых руд по своим характеристикам является конкурентоспособной в сравнении с разрабатываемыми месторождениями в Норильском районе, на Кольском полуострове, в Красноярском крае и Иркутской области, в том числе из-за явных преимуществ ресурсной минеральной базы, расположенной в центральной части страны [2]. В

пределах ВКМ выделяются два основных различных по содержанию и ресурсам металлов типа месторождений [1]:

Мамонский — преимущественно бедные вкрапленные руды, связанные с высокомагнезиальными ультрамафитами перидотит-габбро-норитовой формации (Нижнемамонское, Подколodновское, Юбилейное и др.);

Еланский — со сплошными и вкрапленными рудами, приуроченными к телам субвулканических мафитов ортопироксенит-норит-диоритовой формации (Еланское, Ёлкинское, Центральное и др.).

Методы исследований

Минераграфические исследования проб проведены с использованием поляризационного микроскопа Leica DM4500P, оснащенного видеокамерой Leica DFC490. Обработку результатов оптических исследований проводили с помощью специализированных программ «Минерал С7».

С применением гравитационных и магнитных методов из проб руд были получены продукты для детального минералогического изучения. Анализ полученных продуктов проводили в брикетированных однослойных аншлифах. Аншлифы и искусственные брикеты изготавливали на специальном шлифовально-полировальном оборудовании в шлифовальной мастерской СП ЗАО «ИВС».