

УДК 622-17 : 622.7

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ДООБОГАЩЕНИЯ ХРОМИТОВЫХ ХВОСТОВ ДОНСКОГО ГОКА

Г. И. ГАЗАЛЕЕВА, Н. В. ШИХОВ, И. А. ВЛАСОВ, В. Н. ШИГАЕВА
(ОАО «Уралмеханобр», г. Екатеринбург, РФ)*

В статье приведены результаты исследований по разработке технологии дообогащения хвостов обогатительной фабрики Донского ГОКа — филиала АО «ТНК «Казхром» — с массовой долей Cr_2O_3 25,28 %. Технология должна обеспечить получение высококачественного хромитового концентрата с массовой долей оксида хрома не менее 49 % при массовой доле полезного компонента в хвостах не более 10 %. Для исследования исходных хвостов использовались современные методы анализа, в т. ч. оптическая и электронная микроскопия на микроскопах Axiomager и EVA-MA 15 компании Karl Zeiss. Изучение степени раскрытия полезных минералов и зависимости извлечения оксида хрома от крупности исходного сырья позволило спрогнозировать возможность выделения в головке процесса класса крупности более 0,2 мм и разработать начальную схему обогащения, состоящую из операций тонкого грохочения, гидроциклонирования и винтовой сепарации. На основе сепарационных характеристик данных операций дан прогноз результатов обогащения, а их анализ показал эффективность включения в технологию только одной операции винтовой сепарации. В результате первой винтовой сепарации получен концентрат с массовой долей оксида хрома 48,3 %; тонкое грохочение по классу 0,2 мм позволило выделить 19,5 % хвостов с массовой долей Cr_2O_3 8,7 %. На полученных промпродуктах проверена возможность выделения конечного концентрата методами гравитации, магнитной сепарации и флотации. На укрупненной лабораторной установке подтверждена возможность получения кондиционного хромитового концентрата с массовой долей Cr_2O_3 49,08 % при выходе 37,50 % и извлечении Cr_2O_3 72,80 %. Технология принята к проектированию.

Ключевые слова: хвосты обогащения хромитовых руд, электронная микроскопия, хромитовый концентрат, степень раскрытия минералов, сепарационные характеристики, тонкое грохочение.

DOI: 10.17580/or.2017.02.03

Цель работы — снижение потерь оксида хрома с отходами обогащения (хвостами) с получением концентрата и хвостов с массовой долей оксида хрома не менее 49 % и не более 10 % соответственно. Объектом исследований служила исходная проба гравитационных хвостов, отобранная на Донской обогатительной фабрике № 1 (ДОФ-1), с массовой долей Cr_2O_3 25,28 %.

Методология

Для исследования исходных хвостов использовались методы анализа материала пробы [1] на рентгенофлуоресцентном спектрометре Performix, рентгеноструктурного анализа на рентгеновском дифрактометре XPD 7000 S, Shimadzu, оптическая микроскопия на микроскопе Axiomager (Karl Zeiss) с применением программного обеспечения «Минерал С7» и исследования материала на электронном сканирующем микроскопе EVA-MA 15 (Karl Zeiss). Результа-

ты минералогических исследований [2] представлены в виде распределения минералов хрома по классам крупности как в исходном сырье, так и в продуктах обогащения. На основании этих данных произведен выбор последующих операций обогащения и схемы в целом. Выполнен анализ сепарационных характеристик начальных операций предлагаемой схемы [3, 4].

Результаты исследования вещественного состава исходных хвостов

Изучение распределения Cr_2O_3 по классам крупности в исходной пробе хвостов ДОФ-1 показало, что Cr_2O_3 концентрируется в классах менее 0,16 мм и более 0,01 мм. Суммарное извлечение оксида хрома в эти классы составляет 84,88 %. В табл. 1 приведен минеральный состав исходных хвостов по классам крупности.

Данные табл. 1 показывают, что полезный минерал — хромшпинелид — сосредоточен в широком классе крупности — менее 0,16 мм, однако основная его масса — 61–91 % — концентрируется в узком классе $-0,044+0,020$ мм, который и следует «не потерять» при разработке схемы обогащения [5, 6]. Очень важным показателем для создания технологий переработки техногенного сырья на современном уровне является степень раскрытия минералов в различных классах крупности [7, 8]. В табл. 2 приведены результаты такого анализа, проведенного на оптическом микро-

* Газалеева Галина Ивановна — зам. генерального директора по аналитической работе, д-р техн. наук, gazaleeva_gi@umbr.ru; Шихов Николай Владимирович — зав. лабораторией, канд. техн. наук, umbr@umbr.ru; Власов Игорь Александрович — научный сотрудник, umbr@umbr.ru; Шигаева Варвара Николаевна — младший научный сотрудник, umbr@umbr.ru.

© Газалеева Г. И., Шихов Н. В., Власов И. А., Шигаева В. Н., 2017

Таблица 1

Минеральный состав хвостов ДОФ-1 по классам крупности

Класс крупности, мм	Выход, %	Массовая доля минералов, %			
		Рудные		Нерудные	
		Хромшпинель	Магнетит и ферриты	Серпентин (лигзардит)	Карбонаты
+2,5	2,47	11	1	87	1
-2,5+1,6	1,09	15	2	82	1
-1,6+1,0	2,51	14	2	83	1
-1,0+0,63	4,88	13	2	84	1
-0,63+0,5	2,62	13	2	84	1
-0,5+0,315	4,13	12	2	85	1
-0,315+0,2	11,04	17	2	79	2
-0,2+0,16	3,92	25	3	71	1
-0,16+0,1	9,21	36	4	59	1
-0,1+0,071	9,19	54	7	38	1
-0,071+0,044	11,92	67	8	24	1
-0,044+0,04	4,57	91	7	1	1
-0,04+0,02	21,61	61	7	31	1
-0,02+0,01	6,9	40	5	54	1
-0,01+0,005	2,18	37	4	58	1
-0,005+0,0	1,76	28	3	68	1
Итого	100	42,78	4,95	51,16	1,11

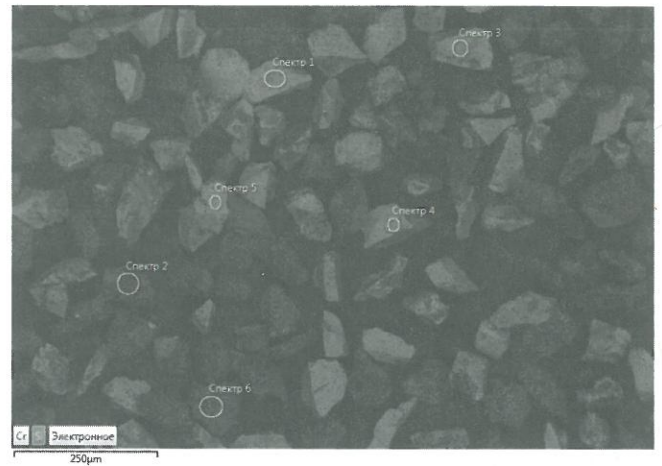


Рис. 1. Вид зерен пробы с наложенными на них картами распределения химических элементов. Электронный сканирующий микроскоп EVA-MA 15; отраженные электроны

$\text{Fe}_{0,20}\text{Cr}_{1,00}\text{Al}_{0,32}\text{Fe}_{0,14}\text{O}_{4,02}$. На основании данной формулы можно получить представление о недостающих элементах кристаллической решетки хромшпинели и максимально возможном качестве получаемого концентрата по содержанию хрома.

скопе AxioImager с применением программного обеспечения «Минерал С7» с дополнительным анализом качества строк.

Из данных табл. 2 следует, что рудные минералы раскрыты на 95 % и более в классе крупности менее 0,2 мм. В более крупных классах материал находится в виде строк рудных и нерудных минералов. Исследование качества строк показывает, что в основном в крупном материале -2,5+0,315 мм строк представлены серпентинитом, доля полезного минерала хромшпинелида в них находится на уровне 10–40 %. Электронная микроскопия использовалась для анализа отдельных минеральных зерен полезных компонентов и пустой породы с определением элементного состава того или иного зерна в микронной точке с использованием микрозондовой приставки (рис. 1–3).

Анализ спектров пробы в различных точках показывает, что в исходном продукте массовая доля оксида хрома находится на уровне 23,3 % (рис. 2), а в некоторых частицах (рис. 3) она достигает 48,2 %, что соответствует качеству конечного хромитового концентрата и указывает на возможность его выделения в голове процесса.

По результатам минералогического и спектрального анализов на электронном микроскопе по спектрам областей 1, 3, 4, 5 (рис. 1) были рассчитаны средний состав шламовых хвостов Донского ГОКа и формула хромшпинели, находящейся в них. Расчетная кристаллохимическая формула хромшпинели имеет вид $(\text{Mg}_{0,80}$

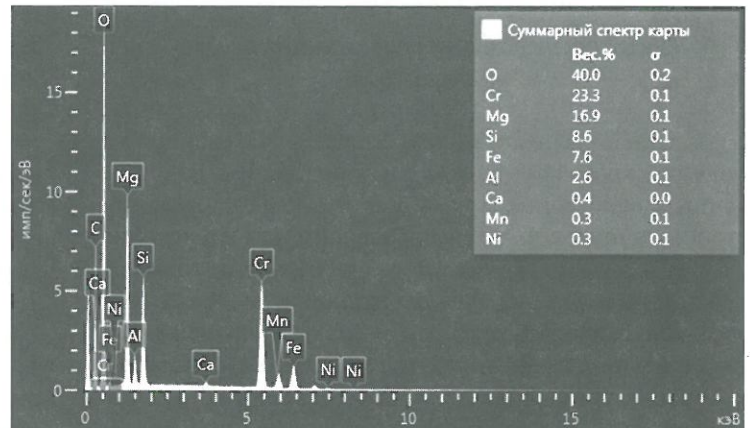


Рис. 2. Спектральный анализ. Полуколичественный химический состав всей изучаемой области рис. 1. EDX-приставка X-Max

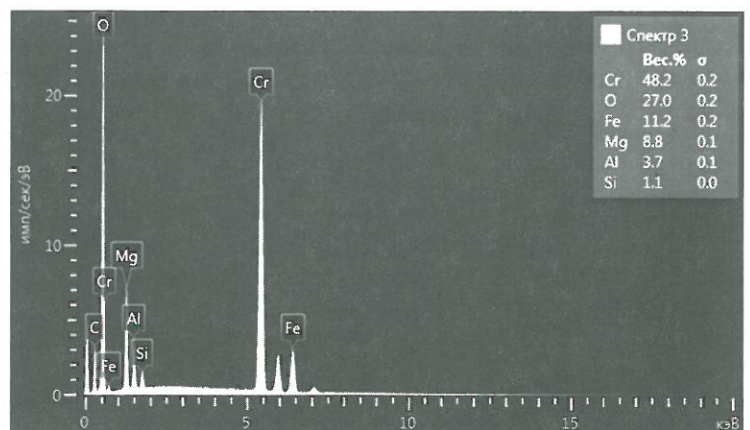


Рис. 3. Полуколичественный химический состав области 3, представленной на рис. 1. EDX-приставка X-Max

Массовая доля свободных зерен минералов и зерен минералов, находящихся в сростках*

Класс крупности, мм	Рудные минералы							Нерудные минералы						
	Свободные зерна, %	Зерна в сростках, %	Распределение сростков, %					Свободные зерна, %	Зерна в сростках, %	Распределение сростков, %				
			до 10*	от 10 до 40 вкл.	от 40 до 60 вкл.	от 60 до 90 вкл.	от 90			до 10	от 10 до 40 вкл.	от 40 до 60 вкл.	от 60 до 90 вкл.	от 90
+2,5	<1	100	15	85	—	—	—	18	82	—	—	—	24	76
–2,5+1,6	<1	100	5	95	<1	—	—	24	76	—	—	4	38	58
–1,6+1,0	32	68	5	95	<1	—	—	48	52	—	—	5	35	60
–1,0+0,63	45	55	11	61	10	18	—	61	39	—	1	1	23	75
–0,63+0,5	46	54	3	11	—	17	69	74	26	<1	2	—	24	74
–0,5+0,315	46	54	3	12	—	18	67	77	23	<1	2	—	24	74
–0,315+0,2	81	19	10	26	2	23	39	78	22	<1	2	3	22	73
–0,2+0,16	95	5	12	27	—	44	17	89	11	<1	3	—	19	78
–0,16+0,1	95	5	5	17	3	25	50	92	8	1	4	2	19	74
–0,1+0,071	98	2	8	10	2	20	60	93	7	1	2	4	14	79
–0,071+0,044	99	1	7	14	—	71	8	94	6	<1	5	—	28	67
–0,044+0,04	99	1	<1	—	—	93	7	64	36	<1	10	—	—	90
–0,04+0,02	100	<1	<1	—	—	100	<1	98	2	<1	5	—	—	95
–0,02+0,01	100	—	—	—	—	—	—	100	—	—	—	—	—	—
–0,010+0,005	100	—	—	—	—	—	—	100	—	—	—	—	—	—
–0,005+0,0	100	—	—	—	—	—	—	100	—	—	—	—	—	—

* Массовая доля основного минерала, %.

** Знак «—» означает, что соответствующего вида зерен при минералогическом анализе обнаружено не было.

Обсуждение результатов технологических исследований

С целью разработки технологической схемы обогащения хромсодержащих хвостов ДОФ-1 на основании информации, приведенной в [9–11], была построена и проанализирована зависимость извлечения оксида хрома от крупности в исходных шламовых хвостах (рис. 4, исх.). Анализ данной зависимости позволяет в дальнейшем прогнозировать начальные операции технологической схемы и строить сепарационные характеристики отдельных операций. В данном случае в голове процесса физическим признаком разделения является крупность. Показатель качества — это содержание оксида хрома Cr_2O_3 . Анализ зависимости показывает, что начиная с класса крупности +1 мм кривая переходит в прямую, что определяет

возможность выделения из данного исходного продукта хвостов в голове процесса. Ориентировочная крупность разделения — 0,2–1 мм. На продукте класса менее 0,2 мм возможно применение методов разделения по крупности и по плотности, в том числе на винтовых сепараторах [12].

На рис. 5 представлена разработанная схема предварительного обогащения хромсодержащих хвостов ДОФ-1 с результатами ее реализации в укрупненно-лабораторных условиях ОАО «Уралмеханобр».

По виду сепарационных характеристик и корреляционных отношений рассчитанных зависимостей можно предположить, что наиболее эффективно процесс обогащения будет осуществляться на первом винтовом сепараторе, так как его сепарационная характеристика близка к идеальной и имеет показатель R^2 на уровне 0,95. Анализ сепарационной характеристики тонкого грохочения и ее

линейный вид, а также сопоставление с исходной характеристикой позволяют сделать вывод о возможности выделения части хвостов в голове процесса.

Проверка указанных предположений показала, что в результате первой винтовой сепарации получается концентрат с массовой долей оксида хрома 48,3 %; тонкое грохочение по классу 0,2 мм позволило выделить в голове процесса 19,5 % хвостов с массовой



Рис. 4. Сепарационные характеристики продуктов обогащения по крупности (а) и винтового сепаратора 1 по плотности (б)

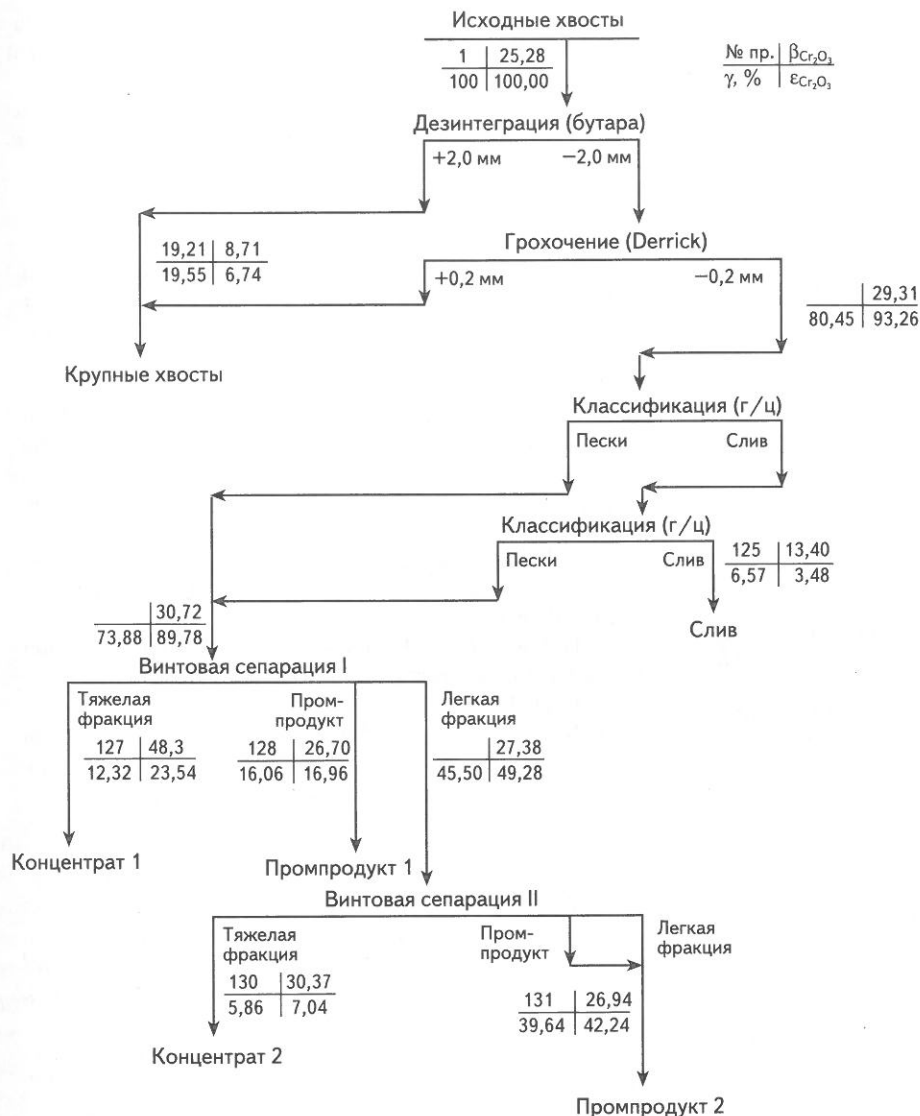


Рис. 5. Схема предварительного обогащения хромосодержащих хвостов ДОФ-1

долей оксида хрома 8,7 %. Далее были проведены исследования по изучению возможности использования различных методов обогащения: гравитации, флотации, мокрой магнитной сепарации — для доведения промпродуктов начальной схемы до требуемого качества с получением высокого извлечения оксида хрома в концентрат. На укрупненно-лабораторной установке был получен кондиционный хромитовый концентрат с массовой долей Cr_2O_3 49,08 % при выходе 37,50 % и извлечении Cr_2O_3 72,80 %. Технология принята к проектированию.

Заключение

Цель работы состояла в снижении потерь оксида хрома с отходами обогащения — хвостами — и получении концентрата и хвостов с массовой долей оксида хрома не менее 49 % и не более 10 % соответственно. Исследования проводились на представительной пробе хвостов обогатительной фабрики Донского ГОКа с массовой долей Cr_2O_3 25,28 %.

Для исследования исходных хвостов использовались современные методы анализа, в т. ч. оптическая и электронная микроскопия на микроскопах AxioImager и EVA-MA 15 компании Karl Zeiss. Результаты минералогических исследований приведены в виде распределения оксида хрома по классам крупности как в исходном сырье, так и в продуктах обогащения, на основании этих данных произведен выбор последующих операций обогащения и схемы в целом.

По результатам исследований разработана схема, которая позволила получить кондиционный хромитовый концентрат с массовой долей Cr_2O_3 49,08 % при выходе 37,50 % и извлечении Cr_2O_3 72,80 %.

В работе принимали участие специалисты отдела обогащения ОАО «Уралмеханобр» с. н. с. Л. Н. Назаренко, с. н. с. Т. А. Бузунова, инж. И. С. Бойков.

Список литературы

1. Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Хромовые руды. М., 2007. 36 с.
2. Хромовые руды Кольского полуострова: минералого-технологическая оценка, перспективы освоения / А. И. Ракаев, Н. Н. Мельников, А. Н. Кулаков, Н. А. Чепкаленко, Г. П. Мироевский, А. С. Галкин, А. Н. Дедюхин, О. Н. Тихонов, Н. И. Бичук // Обогащение руд. 1999. № 6. С. 19–24.
3. Тихонов О. Н. Теоретические основы сепарационных процессов обогащения полезных ископаемых. Л.: ЛГИ, 1978. 98 с.
4. Тихонов О. Н. Закономерности эффективного разделения минералов в процессах обогащения полезных ископаемых. М.: Недра, 1984. 207 с.
5. Николаев В. И., Руднев А. В. Типы хромоворудных концентраций и закономерности размещения в альпинотипных массивах Урала // Руды и металлы. 2016. № 1. С. 15–24.
6. Козин В. З. Исследование руд на обогатимость. Екатеринбург: Изд-во УГТУ, 2009. 380 с.
7. A study of the changes in the milling and flotation processes on the recovery of chromite in a platinum group mineral (pgm) concentrator / С. Т. O'Connor, J. G. Wiese, M. Alvarez-Silva, T. Khonthu // XV Balkan Mineral Processing Congress, Sozopol, Bulgaria, June 12–16, 2013. P. 33–38.
8. Цыпин Е. Ф., Овчинникова Т. Ю., Ентальцев Е. В. Раскрытие минералов и обогатимость хромовой руды при рудоподготовке // Известия вузов. Горный журнал. 2016. № 7. С. 63–68.

9. Перспективная технология обогащения бедных хромовых руд Карелии / А. И. Ракаев, С. А. Алексеева, Е. В. Черноусенко, С. Н. Рудаков, Ю. Н. Нерадовский // Горный журнал. 2014. № 1. С. 64–68.

10. Papp J. F. Хром // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. 2016. № 5. С. 102–139.

OBOGASHCHENIE RUD, 2017, No. 2, pp. 16–20.
DOI: 10.17580/or.2017.02.03

The Donskoy Ore Mining and Processing Industrial Complex chromite tailings retreatment technology development

Information about authors

Gazaleeva G. I.¹, Deputy General Director for Analytical Work, Doctor of Engineering Sciences, gazaleeva_gi@umbr.ru;

Shikhov N. V.¹, Head of Laboratory, Candidate of Engineering Sciences, umbr@umbr.ru;

Vlasov I. A.¹, Researcher, umbr@umbr.ru;

Shigaeva V. N.¹, Junior Researcher, umbr@umbr.ru.

¹JSC «Uralmekhanobr» (Ekaterinburg, Russia)

Abstract

The paper presents the results of the Donskoy Ore Mining and Processing Complex concentrating plant – the TNC Kazchrome JSC branch plant – chromite tailings with Cr₂O₃ mass fraction of 25.28 % retreatment technology development studies. The technology shall provide for production of high-grade chromite concentrate with chrome oxide mass fraction of at least 49 % and tailings with Cr₂O₃ mass fraction within 10 %. The up-to-date methods of analysis were used for starting tailings material studies, including optical and electronic microscopy with microscopes Axiolmager and EVA-MA 15 from Karl Zeiss. The studies of valuable minerals liberation degree and chrome oxide recovery dependence on feed material size permitted to predict possible separation of +0.2 mm size fraction at the head of the process and develop initial processing flow sheet consisting of fine screening, hydrocycloning and screw separation operations. On the basis of separation characteristics of these operations, processing results are predicted, and their analysis showed the advisability of including only one screw separation operation into the process. As a result of the first screw separation, concentrate was produced with chrome oxide mass fraction of 48.3 %; fine screening of 0.2 mm size fraction permitted to separate 19.5 % of tailings with Cr₂O₃ mass fraction of 8.7 %. The obtained middling products were subjected to testing with a view to verify possible separation of final concentrate by means of gravity concentration, magnetic separation and flotation methods. A scaled-up laboratory setup was used to verify a possibility of producing saleable chromite concentrate with Cr₂O₃ mass fraction of 49.08 %, with yield of 37.50 % and Cr₂O₃ recovery being 72.80 %. The technology was accepted for design and engineering development.

Key words: chromite ores processing tailings, electronic microscopy, chromite concentrate, minerals liberation degree, separation characteristics, fine screening.

11. Чернышов А. И., Юричев А. Н. Структурная эволюция дунитов и хромитов Харчерузского массива (Полярный Урал) // Геотектоника. 2016. № 2. С. 62–77.

12. Папушин Ю. Л. Обогащение на винтовых сепараторах // Сборник трудов кафедры ДонНТУ. Донецк, 2002. 

References

1. Methodical recommendations on the application of the Classification of the deposits reserves and the forecast resources of solid minerals. Chrome ores. Moscow, 2007. 36 p.
2. Rakaev A. I., Melnikov N. N., Kulakov A. N., Chepkalenko N. A., Miroevskiy G. P., Galkin A. S., Dedyukhin A. N., Tikhonov O. N., Bichuk N. I. Chrome ores of the Kola Peninsula: mineralogical and technological assessment, prospects for development. *Obogashchenie Rud*. 1999. No. 6. pp. 19–24.
3. Tikhonov O. N. Theoretical basis of separation processes of mineral beneficiation. Leningrad: Leningradskiy Gornyy Institut, 1978. 98 p.
4. Tikhonov O. N. Regularity of the effective separation of minerals in the process of mineral beneficiation. Moscow: Nedra, 1984. 207 p.
5. Nikolaev V. I., Rudnev A. V. Types of chromium concentrations and patterns of their distribution in alpine-type massifs of the Urals. *Rudy i Metally*. 2016. No. 1. pp. 15–24.
6. Kozin V. Z. Study of ores dressability. Ekaterinburg: Publ. UGGU, 2009. 380 p.
7. O'Connor C. T., Wiese J. G., Alvarez-Silva M., Khonthu T. A study of the changes in the milling and flotation processes on the recovery of chromite in a platinum group mineral (pgm) concentrator. *XV Balkan Mineral Processing Congress*, Sozopol, Bulgaria, June 12–16, 2013. pp. 33–38.
8. Tsypin E. F., Ovchinnikova T. Iu., Ental'tsev E. V. Minerals opening and chromite ore washability at ore dressing. *Izvestiya Vuzov. Gornyy Zhurnal*. 2016. No. 7. pp. 63–68.
9. Rakaev A. I., Alekseeva S. A., Chernousenko E. V., Rudakov S. N., Neraodovskiy Yu. N. Prospective technology of concentration of poor chromium ores of Karelia. *Gornyy Zhurnal*. 2014. No. 1. pp. 64–68.
10. Papp J. F. Chromium. *Problemy Okruzhayushchey Sredy i Prirodnykh Resursov*. 2016. No. 5. pp. 102–139.
11. Chernyshov A. I., Yurichev A. N. The structural evolution of dunite and chromite ore from the Kharcheruz Massif, the Polar Urals. *Geotektonika*. 2016. No. 2. pp. 62–77.
12. Papushin Yu. L. Beneficiation on screw separators. Collection of works of DonNTU. Donetsk, 2002.