МИНЕРАЛОГИЯ ТЕХНОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

УДК 549.01

МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ ОТХОДОВ ОБОГАЩЕНИЯ ТИТАНОМАГНЕТИТОВЫХ РУД КУСИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ЮЖНЫЙ УРАЛ)

В.И. Попова, В.А. Попов, В.А. Муфтахов, В.А. Котляров Институт минералогии УрО РАН, г. Muacc; popov@mineralogy.ru

MINERAL COMPOSITION OF PROCESSING WASTES OF TITANOMAGNETITE ORES FROM THE KUSA DEPOSIT (SOUTH URALS)

V.I. Popova, V.A. Popov, V.A. Muftakhov, V.A. Kotlyarov

Institute of Mineralogy UB RAS; Miass; popov@mineralogy.ru

Отвалы отходов обогащения («хвосты») титаномагнетитовых руд Кусинского месторождения на ЮЗ окраине пос. Магнитка Челябинской области на Южном Урале стали формироваться со времени пуска дробильно-обогатительной фабрики в 1948 г. Современная площадь отвалов ~ 3 км²; сведения о минеральном составе их ранее были неизвестны. В составе локально отобранной пробы массой 1706.2 г преобладают (% объёма): амфиболы ~ 46, хлориты ~ 30, гранаты ~ 7.2, магнетит ~ 4.3, ильменит (с гематитом) ~ 1.8 и ряд других минералов. Фракция -0.316+0.125 мм составляет 64.6 % пробы, а «крупная» фракция (+0.63 мм) – наименьшую долю (3.5 %). Приведены новые микрозондовые анализы ильменита, гематита, паргасита и ферропаргасита, энстатита и пижонита, эпидота, ставролита, клинохлора, альмандина, пирита, бравоита, пирротина и халькопирита. Кратко обобщены основные результаты других исследователей минералов первичных пород и руд месторождения. В настоящее время практически интересны мелкие фракции техногенных отвалов в пос. Магнитка для извлечения оставшихся магнетита и ильменита. Возможно и получение концентратов силикатов (граната и амфибола) для абразивов или наполнителей облицовочных плиток. Более крупная фракция отвалов может быть пригодна для отсыпки пешеходных троп в скверах и парках.

Илл. 7. Табл. 7. Библ. 16.

Ключевые слова: отвалы обогащения, титаномагнетит, ильменит, силикаты, сульфиды, Кусинское месторождение, Южный Урал.

The dumps of processing wastes (tales) of titanomagnetite ores from the Kusa deposit located in the southwestern margin of the settlement of Magnitka, Chelyabinst district (South Urals) began to form in 1948. The modern area of the dumps is ~ 3 km²; no data are known on mineral composition of the dumps. A new sample 1706.2 g in weight contains (vol. %) amphibole ~ 46, chlorite ~ 30, garnet ~7.2, magnetite ~ 4.3, ilmenite (with hematite) ~ 1.8 and other minerals. Fractions of -0.316 + 0.125and +63 mm comprise 64.6 and 3.5 % of the volume, respectively. New microprobe analyzes of ilmenite, hematite, pargasite, ferropargasite, enstatite, pigeonite, epidote, staurolite, clinochlore, almandine, pyrite, bravoite, pyrrhotite and chalcopyrite are given. The results of studies of other researchers are briefly summarized. Small fractions of technogenic dumps in the settlement of Magnitka may be of practical interest for extraction of remained magnetite and ilmenite or production of silicate (garnet and amphibole) silicates for abrasives or ceramic fillers. The larger fractions could be a suitable material for pedestrian pathways in squares and parks.

Figures 7. Tables 7. References 16.

Key words: enrichment dump, titanomagnetite, ilmenite, silikate, sulfide, Kusinskoe deposit, South Urals.

Введение

Магнетитовые руды на западном склоне Назямских (Назминских) гор известны с 1802 г. (по донесению владельца Златоустовского завода А.А. Кнауфа). Массивные руды отвозили на Златоустовский завод, но из-за тугоплавкости руд добыча их была остановлена в 1837 г. (Мушкетов, 1877). Только в 1928 г. начались планомерные разведочные работы, и в 1931 г. построен пос. Магнитка. В период 1933-1973 гг. из недр Кусинского титаномагнетитового месторождения было добыто около 30 млн т руды шахтным способом (http://biofile.ru/ geo/23332.html). Дробильно-обогатительная фабрика в пос. Магнитка пущена в 1948 г.; вероятно, с этого времени и стали формироваться отвалы обогатительной фабрики на юго-западной окраине посёлка (рис. 1).

Отрабатывались пластообразные рудные залежи (жилы) Кусинского месторождения (рис. 2), локализованные в метаморфизованных габбро (нередко с рекристаллизованным плагиоклазом) и в гранатсодержащих амфиболитах (рис. 3), реже среди пироксенитов и жильных диабазов (Малышев, 1937; Овчинников, 1998; и др.). При обогащении получали железованадиевый концентрат (43 %), содержащий Fe 65.2 мас. %, TiO₂ 4.2, V₂O₅ 0.8 и ильменитовый концентрат (15 %) с содержанием ТіО, 43.4 мас. %; из хвостов магнитной сепарации получали кобальтсодержащий пиритный концентрат (0.12 %) с содержанием кобальта 0.6 мас. % (Фоминых, 1984). Между рудными телами около ствола шахты Центральной (над фабрикой) находится Зеленцовская копь, известная прежде всего крупными кристаллами эпидота (до 2 м) и другими минералами.

Главные рудные минералы месторождения – титаномагнетит Fe_3O_4 (с содержанием TiO_2 до 14 мас. %) и ильменит $FeTiO_3$. В незначительном количестве встречались сульфиды – пирит FeS_2 , халькопирит $CuFeS_2$, пирротин FeS; прочие «рудные» минералы редки. Нерудные минералы – амфиболы, пироксены, плагиоклазы, эпидот, цоизит, клиноцоизит, хлорит, оливин, биотит, титанит, апатит, гидроксилклиногумит, манассеит, кальциртит и ряд более редких (Фоминых, 1984; Спиридонов и др., 1995; Бочарникова и др, 20056; Гекимянц и др., 1999; и др.).

По химическому составу руды Кусинского месторождения природно-легированные – высокотитанистые и ванадийсодержащие. Средний состав ильменит-магнетитового концентрата приведён Л.Н. Овчинниковым (1998): TiO_2 8.24; Fe_2O_3 53.37; FeO 32.98; MnO 0.16; Cr_2O_3 0.97; V_2O_5 0.82 мас. %; доля ильменита в концентрате составляет около 19 %. Содержания титана и, в меньшей мере, ванадия в сплошных рудах выше, чем во вкрапленных, и коррелируются с содержанием в рудах железа. Из руд Кусинского месторождения получали ильменитовый и магнетитовый концентраты, при переработке которых извлекали не только железо, но и ванадий. Руды месторождения относятся к труднообогатимым из-за большого количества вростков ильменита в титаномагнетите.

В апреле 2016 г. из отвалов – отходов обогатительной фабрики Кусинского титаномагнетитового месторождения – в Институт минералогии УрО РАН (г. Миасс Челябинской области) от ООО «Трио Плюс» поступила шламовая проба массой 1 кг 706.2 г для исследования её вещественного состава.

Методы исследования пробы

Исходный материал массой 1 кг 706.2 г – шлам зеленовато-чёрного цвета – был расситован на 4 фракции: +0.63; -0.63+0.315; -0.315+0.125; -0.125 мм, с определением их массы и доли в исходной пробе. По количеству преобладает фракция -0.315+0.125 мм, а наименьшую долю составляет относительно «крупная» фракция +0.63 мм (табл. 1). Из каждой фракции были получены тяжёлые концентраты (шлихи), подвергнутые магнитной сепарации с применением лабораторного магнита Сочнева МС-4. Преобладающий минеральный состав каждой фракции первоначально определён экспресс-методом количественного минералогического анализа – подсчёта числа зёрен каждого минерала по внешним признакам в % объёма в выборке из 200 зёрен под бинокулярным микроскопом МБС-1.

Атомно-абсорбционный анализ исходных фракций на 8 элементов (по методике 155-ХС ВИМС, из раствора) выполнен М.Н. Малярёнок в химлаборатории ИМин УрО РАН, рентгенофлюоресцентный анализ (РФА) тех же фракций – на анализаторе Innov-X Systems (аналитик Е.Д. Зенович). Дифрактограммы материала магнитных фракций менее 0.316 мм сняты на дифрактометре Shimadzu XRD 6000, Cu-Кα с монохроматором, диапазон съёмки 4–70°, скорость 0.02 °/мин., аналитик П.В. Хворов; соотношения магнетита и ильменита рассчитаны в программе SIROQUANT V.4 (по ме-



Рис. 1. Отвалы обогатительной фабрики в пос. Магнитка.

а – район отбора пробы (*красный контур*) и ориентировочные границы отвалов (*штриховой* контур); б, в – вид техногенных горок: б – СВ берег водоёма, в – ЮЗ берег (Google, 2007. *Фото*: В.А. Попов, 2016).

Fig. 1. Dumps of the processing plant in the settlement of Magnitka.

a – sampling area (*red contour*) and rough boundaries of dumps (*dash contour*); 6, B – overview of technogenic dumps: 6 - NE coast of the reservoir, B - SW coast of the reservoir. (Map: Google, 2007. *Photo*: V.A. Popov, 2016).



Рис. 2. Геологическая карта Кусинского месторождения по (Малышев, 1937) с изменениями.

1 – наносы; 2 – известняки; 3 – гранито-гнейсы; 4 – габбро; 5 – амфиболиты; 6 – рудные тела.

Fig. 2. Geological map of the Kusa deposit modified after Malyshev (1937).

1 – Quaternary sediments; 2 – limestones; 3 – granite gneisses; 4 – gabbro; 5 – amphibolites; 6 – ore body.

Таблица 1

Масса фракций исходной пробы

Table 1

Weight of fractions of the sample

№ п/п	Фракция, мм	Масса, г	% объёма
1	+0.63	60.4	3.5
2	-0.63+0.316	237	13.9
3	-0.316+0.125	1102.4	64.6
4	-0.125	306.4	18.0
Итого	Исходная проба	1706.2	100.0



Puc. 3. Типичный вид метаморфизованного габбро (a, б) и гранатовых амфиболитов (в, г). Φ omo: B.A. Попов. *Fig. 3.* Typical samples of metamorphosed gabbro (a, б) and garnet amphibolites (в, г). *Photo*: V.A. Popov.

тоду Ритвельда). Химический состав ряда минералов исследован на рентгеновском микроскопе-микроанализаторе РЭММА–202М с энергодисперсионной приставкой LZ-5 (аналитик В.А. Котляров).

Общая характеристика шламовой пробы

Во всех фракциях зёрна минералов и их сростков угловатые (рис. 4), реже — пластинчатые и субизометрично-округлые. Преобладающий минеральный состав фракций приведён в таблице 2. Естественно, что микрозёрна других возможных минералов могли быть незамеченными.

По результатам шлихового анализа, более мелкие исходные фракции исследованной пробы (в нашем случае – менее 0.315 мм) содержат практически равные доли магнитного и немагнитного шлиха; в магнитной фракции преобладает магнетит (50–86 % объёма), в немагнитной – амфибол (~ 65–70 %) и гранат (~ 25–30 %). В магнитных фракциях № 3*м* и № 4*м* из шлихов по дифрактограм-

мам (рис. 5) рассчитаны соотношения магнетита и ильменита. В магнитной фракции № 3*м* (-0.315+ 0.125 мм) определены содержания магнетита ~67% объёма и ильменита ~26%, а во фракции № 4*м* (-0.125 мм)~86% объёма магнетита и~9% ильменита. Суммарно в исходной пробе определено содержание магнетита около 4.3% объёма, а ильменита около 2.0%. Такое количество «рудных» минералов в песке примерно соответствует количеству акцессорных минералов в обычных габбро или амфиболитах.

Результаты атомно-абсорбционного анализа исходных фракций на 8 элементов приведены в таблице 3. Характерно, что в шламовой фракции –0.125 мм определены повышенные содержания «рудных» элементов – Fe, Mn, Cu, Zn (из анализированных), при меньших – Mg, K, Na.

По сравнению с данными атомно-абсорбционного анализа, рентгенофлюоресцентным методом на анализаторе Innov-X Systems в порошках этих же фракций (табл. 4) определены более высокие содержания Fe и чуть меньшие – Mn (при близких данных для



Рис. 4. Вид зёрен минералов разных фракций, мм: +0.63 (а); -0.63+0.316 (б); -0.316+0.125 (в); -0.125 (г); немагнитная фракция -0.125 (д); магнитная фракция -0.125 (е).

Минералы: *тёмно-зелёные* – хлорит, амфибол; *чёрные* – магнетит, ильменит, амфибол; *розово-красные* – альмандин; *белые и бесцветные* – лабрадор, апатит. Фото: В.А. Попов.

Fig. 4. Minerals from different fractions (mm): +0.63 (a); -0.63+0.316 (b); -0.316+0.125 (b); -0.125 (c); non-magnetic fraction -0.125 (c); magnetic fraction -0.125 (e).

Minerals: *dark green* – chlorite, amphibole; *black* – magnetite, ilmenite, amphibole; *pink* and *red* – almandine; *white* and *colorless* – labrador, apatite. *Photo*: V.A. Popov.

Си и Zn), что, вероятно, обусловлено как частичной неоднородностью фракций, так и разными возможностями применённых аналитических методов. Дополнительно рентгенофлюоресцентным методом определены содержания Ti, Cr, Ni, Sr, Zr; не обнаружены – Nb, Ta и W. Из таблицы 4 следует, что более мелкие фракции пробы (-0.315 мм) тоже содержат больше Fe, Ti, Mn, Cr, Cu и Zn. В магнитной фракции шлиха № 3*м* содержания Fe и Ti почти в три раза выше, чем в исходной фракции. Во фракции № 4*м* (в отличие от № 3*м*) содержание Fe также почти втрое выше, но Ti меньше. Ванадий не анализирован, т. к. его аналитическая линия в спектре перекрывается с титаном, но ожидаемое содержание ванадия не будет превышать доли процента.

Краткие данные о химическом составе минералов исследованной пробы из отходов обогатительной фабрики Кусинского месторождения

Химический состав ряда минералов фракций № 2 (-0.63+0.315 мм) и № 3 (-0.315+0.125 мм) в препарате на основе эпоксидной смолы (рис. 6, 7) исследован на рентгеновском микроскопе-микроанализаторе РЭММА-202М, а также приведены и некоторые данные о минералах первичных руд и пород из опубликованных ранее работ.

Магнетит $FeFe_2O_4$ (титаномагнетит) в рудах Кусинского месторождения содержит TiO_2 до 12.4– 13.7 мас. % и 0.6–1.20 мас. % V_2O_5 (Карпова, 1974;

Минеральный состав фракций

Таблица 2

Table 2

Mineral composition of fractions								
Минералы	Содержание, % об.	Примечание						
	1. Исхо	одная фракция +0.63 мм						
Амфибол чёрный	55							
Полевые шпаты	10							
Хлорит	30							
Ильменит	2							
Магнетит	1							
Гранат	1.5							
Халькопирит	0.3							
пирит, пирротин, терцинит,	Ед.							
	Шлих +0.	63 мм (3 % отн. от фракции)						
Магнитная фракция	35	Сростки амфибола с магнетитом, ильменитом и хлоритом						
Немагнитная фракция	65	Амфибол с вростками хлорита, граната, плагиоклаза; ед. – пирит						
	2. Исходн	ая фракция –0.63+0.316 мм						
Амфибол	41							
Хлорит	37							
Ильменит								
Магнетит	2							
Гранат	4							
Полевые шпаты								
Эпидот	2							
Ставролит	2							
БИОТИТ	4 III	0.216 yrg (4.0/ args)						
Manual Automa	<u>ШЛИХ –0.05</u> т	О.510 мм (4 % отн. от фракции)						
Иагнитная фракция	23	Сростки магнетита и ильменита с амфиоолом и хлоритом						
пемагнитная фракция	/ J 3 Истолис	Амфиоол с вростками хлорита; гранат 0.316 ± 0.125 мм						
Δνάμδου	3. ИСХОДН а //5	и фракция –0.510+0.125 мм						
Хцорит	35							
Магнетит	2							
Ильменит	1							
Гранат	6							
Полевые шпаты	6							
Эпидот	2							
Пирит	2							
Ставролит, биотит, пирротин	Ед.							
	Шлих -0.316+	0.125 мм (1.4 % отн. от фракции)						
Mariumuag departure	30	Магнетит – 60, ильменит – 25, сростки ильменита с амфиболом						
магнитная фракция	50	— 10, пирротин — 2						
Немагнитная фракция	70	Амфибол – 65, гранат – 32, пирит – 3						
	4. Исхо	дная фракция –0.125 мм						
Амфибол	53							
Хлорит	5							
Полевой шпат	5							
Магнетит	15							
Ильменит	5							
І ранат	15							
Пирит								
Пирротин								
лалькопирит, ставролит	ЕД. Ш 0.1/	25 var $(2.8\%$ or μ or μ						
Manunuag hassessa	<u>шлих –0.1.</u> 20	25 мм (2.0 % отн. от фракции) Морчотит 86 или монит 0 пистотич 2 онфибот 2						
магнитная фракция	50	IVIAL HEIMI $-$ 60, ИЛЬМЕНИТ $-$ 9, ПИРРОТИН $-$ 2, АМФИООЛ $-$ 3						
Немагнитная фракция	70	Амфиоол – /0, гранат – 20; ед. – пирит, халькопирит, полевои						
шпат, хлорит								



Рис. 5. Участки дифрактограмм магнетита с ильменитом из магнитных фракций шлихов 3*м* (-0.316+0.125 мм) и 4*м* (-0.125 мм).

Синее – отражения ильменита. Аналитик П.В. Хворов.

Fig. 5. Fragments of XRD patterns of magnetite with ilmenite from magnetic fractions 3_M (-0.316+0.125 MM) и 4_M (-0.125 MM).

Blue - reflection of ilmenite. Analyst P.V. Khvorov.

Таблица 3

Содержание некоторых элементов в разных фракциях исходной пробы (мас. %)

Table 3

№ п/п	Фракция, мм	Fe	Mg	Са	Mn	Cu	Zn	K	Na
1	+0.63	11.85	7.75	4.44	0.17	0.04	0.02	0.28	1.22
2	-0.63+0.316	12.22	7.85	4.12	0.16	0.03	0.02	0.23	1.26
3	-0.316+0.125	14.38	6.70	4.45	0.22	0.05	0.03	0.18	1.08
4	-0.125	21.15	5.35	4.15	0.28	0.09	0.05	0.13	0.88

Content of some elements in different fractions of the sample (wt. %)

Примечание. Атомно-абсорбционный анализ, аналитик М.Н. Маляренок. *Note.* Atomic absorption analysis, analyst M.N. Malyarenok.

Таблица 4

Содержание ряда элементов в разных фракциях пробы (мас. %)

Table 4

Content of some elements in different fractions of the sample (wt. %)

№ п/п	Фракция, мм	Fe	Ti	Cr	Ni	Mn	Cu	Zn	Sr	Zr
1	+0.63	15.18	2.56	0.08	0.06	0.11	0.03	0.01	0.05	0.002
2	-0.63+0.316	16.41	2.57	0.07	0.04	0.12	0.02	0.02	0.03	0.003
3	-0.316+0.125	19.205	4.297	0.108	0.058	0.163	0.022	0.03	0.02	0.003
Зм	-0.316+0.125	~77	~15							
4	-0.125	31.95	21.45	0.22	0.03	0.21	0.05	0.03	0.01	0.002
4м	-0.125	~81	~12							

Примечание. 3*м*, 4*м* – магнитные фракции шлихов. Рентгенофлюоресцентный анализ, аналитик Е.Д. Зенович.

Note. 3*M*, 4*M* – magnetic fraction of heavy concentrates. X-ray fluorescence analysis, analyst E.D. Zenovich.



Рис. 6. Зёрна минералов фракции № 3.

a-g – участки анализа (см. табл. 5–7). Ilm – ильменит. BSE-фото: B.A. Котляров. *Fig.6*. Minerals from fraction no 3.

a-g – points of analysis (see Tables 5–7). Ilm – ilmenite. BSE-*photo*: V.A. Kotlyarov.

Ферштатер и др., 2001; и др.). В более «крупных» фракциях исследованной нами пробы из отходов обогатительной фабрики часты сростки титаномагнетита с ильменитом, силикатами и апатитом. Ранее отмечалось, что в рудах с запада на восток (от лежачего бока массива к висячему) в составе титаномагнетита возрастает содержание ТiO_2 от 6–8 до 10 мас. %, снижается магнезиальность клинопироксена при увеличении его железистости, а также снижается основность плагиоклаза (лабрадора) от № 65 до № 50 (Бочарникова и др., 2005б). В титаномагнетите выявлены продукты его распада в виде тончайших вростков ульвошпинели TiFe_2O_4 (Карпова, 1974; Фоминых, 1984).

Ильменит FeTiO₃ исследованной фракции № 3 содержит пластинчатые вростки гематита (рис. 6) и примеси Mg и Mn (табл. 5, ан. 3a-c, g), а также образует вростки в амфиболе, пироксене и гранате (рис. 7). Ранее по данным химического анализа в ильмените из меланократового амфиболового габбро (шахта Центральная, горизонт 166 м) определены вариации состава, мас. %: FeO 39.51–40.40; Fe₂O₃ 11.58–7.94; TiO₂ 46.0–48.11; MnO 1.20–0.93; MgO 0.30–0.45; V₂O₅ 0.27–0.20; а также примесь SiO₂ 1.30–1.41 (Карпова, 1974).

Гематит Fe₂O₃, анализированный из фракций № 2 и 3, содержит небольшие примеси Cr, Ti и V (см. табл. 5, ан. 3f, 2h).

В составе магнезиоферрита $MgFe_2O_4$ определены вариации содержаний оксидов, мас. %: MgO 13.09–9.83; FeO 9.83–15.17; Fe₂O₃ 75.05–73.60, где примеси оксидов Mn, Ni, Ti и Al составляют в сум-

Таблица 5 Химический состав оксидов из фракций № 2 и № 3 отходов обогащения руд Кусинского месторождения (мас. %)

Table 5

Chemical composition of oxides from fractions 2 and 3 of processing wastes of the Kusa deposit (wt. %)

№ ан.	3 <i>a</i>	3 <i>b</i>	3 <i>c</i>	3g	3 <i>f</i>	2 <i>h</i>				
TiO ₂	53.34	51.78	51.57	49.19	0.56	0.45				
Cr_2O_3	_	_	2.87							
Fe ₂ O ₃	_	_	95.32							
FeO	42.90) 46.84 46.08 49.40 -								
MgO	2.53	0.56	1.95	0.47	_	_				
MnO	0.67 0.63 0.45 0.26									
ZnO	_	0.								
V ₂ O ₅	_	1.21 0								
Сумма	мма 99.44 99.81 100.05 99.32 99.96 99.29									
	Эмпи	рически	1е форм	улы (О	= 3)					
За (ильм	енит) –	$(Fe_{0.89}M)$	$g_{0.09}Mn_{0}$	$_{0.01})_{0.99}$ Ti ₁	_{.00} O ₃ ;					
3 <i>b</i> (ильм	енит) –	$(Fe_{0.99}M)$	$g_{0.02}Mn_0$	$(1,0)_{1,02}$ Ti ₀	_{.98} O ₃ ;					
3c (ильменит) – Fe _{0.96} Ti _{0.08} O ₃ ;										
3g (ильменит) – (Fe _{1.06} Mg _{0.02}) _{1.08} Ti _{0.96} O ₃ ;										
3f (гематит) – (Fe _{1 0} , Cr _{0.05} Ti _{0.02} V _{0.01}) _{2.00} O ₃ ;										
2 <i>h</i> (гемат	гит) — (F	$Fe_{1.93}Cr_{0.0}$	$Ti_{0.01}$	₉₈ O ₃						

Примечание. Здесь и далее: в номере анализа *цифры* – номер фракции, *буквы* – точки анализа на рис. 6 и 7. СЭМ РЭММА–202М, аналитик В.А. Котляров.

Note. Here and hereafter: numerals and letters in analysis numbers correspond to the fraction number and analysis point in Figs. 6 and 7, respectively. SEM REMMA-202M, analyst V.A. Kotlyarov.



Рис. 7. Зёрна минералов фракции № 2.

Ilm – ильменит, Qz – кварц, Ttn – титанит, Hem – гематит (см. табл. 5–7). BSE-фото: В.А. Котляров.

Fig. 7. Minerals from fraction no 2.

Ilm - ilmenite, Qz - quartz, Ttn - titanite, Hem - hematite. See Tables 5-7. BSE-photo: V.F. Kotlyarov.

ме около 2 мас. %. В магнезиоферрите отмечены тонкие ламели гейкилита $MgTiO_3$ состава, мас. %: MgO 28.27; TiO₂ 63.90; FeO 4.50; MnO 2.54; Fe₂O₃ 0.88 (Гекимянц, Спиридонов, 1995).

Составы феррохёгбомита (Fe₃ZnMgAl)(Al₁₄ FeTi)O₃₀(OH)₂ и магнезиохёгбомита Mg₆(Al₁₄Ti₂) O₃₀(OH)₂, а также ассоциирующей с ними железомагнезиальной шпинели (Mg,Fe)Al₂O₄ из ильменит-магнетитовых руд приведены в ряде работ и частично обобщены Т.Д. Бочарниковой с соавторами (2005а); в анализах характерна примесь Cr и Zn.

Перовскит CaTiO₃ чёрно-коричневого цвета отмечался среди агрегатов клинохлора шпинель-форстеритовых пород с титанклиногумитом в Зеленцовской копи (Гекимянц, 1995). Состав перовскита близок теоретическому, мас. %: CaO 40.84; TiO₂ 58.83; FeO 0.35; MnO 0.05 (среднее из 10 анализов), с незначительными примесями ряда элементов.

Кальциртит $Ca_2Zr_5Ti_2O_{16}$ в виде зеленовато-буровато-серого тройника величиной 2 мм (внешне похожего на гранат) отмечен Э.М. Спиридоновым с соавторами (1995) в перовскит-клинохлоровом агрегате на контакте габбро с «мрамором». Состав кальциртита, мас. %: CaO 12.51; SrO 0.59; ZrO₂ 67.55; HfO₂ 1.59; TiO₂ 16.61 и малые примеси Fe, V, Mg, Mn, Th, Ce, K.

Корунд Al₂O₃ изредка встречается в амфиболитах как акцессорный минерал (Бочарникова и др., 2005б).

Из сульфидов в материале исследованных фракций нами встречен пирит $\text{FeS}_{2^{2}}$, как беспримесный, так и содержащий примеси Со до 1.60 мас. % и Ni (см. табл. 6, ан. 2*g*-*k*; 3*m*, *o*, *p*). В «бравоите»

с содержанием Ni 12.42 мас. % заметен избыток катионов относительно серы (см. табл. 6, ан. 2n).

Пирротин (Fe_{0.85}Ni_{0.02})_{0.87}S также содержит примесь Ni 1.59 мас. % и Co 0.07 мас. %, а в халькопирите CuFeS₂ примеси не обнаружены (см. табл. 6, ан. 2m и 2l).

Среди силикатов в исследованной нами пробе преобладают моноклинные кальциевые амфиболы – паргаситы и, реже, ферропаргаситы (см. табл. 7, ан. 2*b*, *d*, *e*, *i*) серии паргасита–гастингсита промежуточного состава. Близкие ферропаргаситу анализы приведены В.Г. Фоминых (1981) как «роговая обманка». Указывались также магнезиогастингсит NaCa₂(Mg₄Fe) (Al₂Si₆O₂₂)(OH)₂, тремолит Ca₂Mg₅(Si₈O₂₂)(OH)₂ и эденит NaCa₂Mg₅(AlSi₇O₂₂)(OH)₂.

Гидроксилклиногумит $Mg_9(SiO_4)_4(OH)_2$ титансодержащий (Ті-клиногумит) отмечен в карбонатсодержащих родингитах (Гекимянц и др., 1999).

Титанит CaTi(SiO₄)О как акцессорный минерал встречается в габбро, амфиболитах и других породах месторождения, нередко в агрегатах с пироксенами, амфиболами, клинохлором, иногда – и с кварцем (см. рис. 7а).

Эпидот Ca₂(Al₂Fe)(SiO₄)(Si₂O₇)O(OH) из фракции № 3 содержит в составе небольшие примеси Ті и Mg (см. табл. 7, ан. 3*r*). Этот минерал известен в Кусинском массиве со времён первых находок титаномагнетитовых руд (Мушкетов, 1877; и др.).

Из пироксенов нами встречены энстатит и пижонит (см. табл. 7, ан. 2c, f); в ранних работах отмечался диопсид (фассаит) CaMgSi₂O₆ (Ферштатер и др., 2001).

Таблица 6

Химический состав сульфидов из отходов обогащения руд Кусинского месторождения (мас. %)

Chemical composition of sulfides from processing wastes of the Kusa deposit (wt. %)

			Пирит			Бравоит	Пирротин	Халькопирит		
№ ан.	2g	2 <i>k</i>	3 <i>m</i>	30	3 <i>p</i>	2 <i>n</i>	2 <i>m</i>	21		
S	52.89	52.93	53.17	53.02	53.15	49.38	39.25	34.82		
Fe	45.24	45.74	46.60	45.18	45.26	37.32	58.23	31.21		
Co	1.60	0.13	_	1.36	1.40	0.72	0.07	_		
Ni	_	1.12	_	_	_	12.42	1.59	_		
Cu	_	_	_	_	_	_	_	33.79		
Сумма	99.74	99.92	99.77	99.56	99.80	99.84	99.14	99.82		
		Э	мпириче	еские фо	рмулы (S = 2; ан. 2 <i>m</i>	S = 1)			
2g - (Fe	$Co_{0.98}Co_{0.03}$	$S_{1.01}S_2;$			3 <i>p</i> -	$-(Fe_{0.98}Co_{0.03})$	1.01S ₂ ;			
2k - (Fe)	_{0.99} Ni _{0.02})	$_{1.01}S_{2};$			2 <i>n</i> -	$2n - (Fe_{0.86}Ni_{0.27}Co_{0.02})_{1.15}S_2;$				
3m - Fest	S ₂ ;				2 <i>m</i>	$2m - (Fe_{0.85}Ni_{0.02})_{0.87}S;$				
3o - (Fe)	$_{0.98}Co_{0.03}$	$_{1.01}S_2;$			2l -	$2l - Cu_{0.98} Fe_{1.03}S_2$				

Таблица 7

Table 7

Химический состав силикатов из фракций № 2 и 3 (мас. %)

Chemical composition of silicates from fractions 2 and 3 (wt. %)

Chemical composition of sincates from fractions 2 and 5 (wt. 76)											
		Амфи	болы		Пиро	ксены	Ставролит	Клинохлор	Гран	наты	Эпидот
№ ан.	2 <i>b</i>	2 <i>d</i>	2 <i>e</i>	2 <i>i</i>	2 <i>c</i>	2f	3 <i>q</i>	3 <i>d</i>	3 <i>i</i>	2 <i>j</i>	3r
SiO ₂	39.43	39.74	44.00	40.76	50.27	51.02	27.42	27.10	37.90	36.95	39.06
Al ₂ O ₃	17.28	14.79	13.73	17.37	9.38	4.80	53.15	24.12	21.25	21.11	26.75
TiO ₂	0.46	0.33	0.60	0.52	0.11	0.12	0.81	_	_	_	0.24
Cr ₂ O ₃	-	-	_	_	_	_	0.19	0.09	_	_	_
FeO	19.42	16.73	12.30	15.97	15.39	13.05	14.37	6.69	27.77	30.30	8.12
CaO	11.30	10.65	11.01	10.39	0.71	9.66	_	_	4.09	4.80	24.44
MgO	7.42	10.79	13.78	9.78	21.62	17.64	2.19	29.66	6.87	4.77	0.34
MnO	0.04	0.12	0.01	_	0.22	0.16	_	_	1.88	1.69	_
ZnO	-	-	_	_	_	_	0.51	_	_	_	_
Na ₂ O	1.92	3.00	2.35	2.73	1.37	1.01	_	_	_	_	_
K ₂ O	0.46	0.41	0.27	0.17	_	0.15	_	_	_	_	_
Čl	0.27	1.41	_	0.42	_	_	_	_	_	_	_
Сумма	98.01	97.98	98.07	98.10	99.06	97.59	98.64	87.66	99.76	99.64	98.95
			-		Эм	пириче	ские формуль	I			
2 <i>b</i> (ф	ерропар	гасит) –	(NaK)(C	aNa)(Fe	Mg. Mn. A	Al)(OH).:	
2 <i>d</i> (па	аргасит)	$-(Na_{a})$	K 0.29	$Ca_{1,2}Na$	1.75 0.1 (Mg	Fe.	Mn_{a} Al_{a} Ti_{a}	$(Si_{1}, Si_{2}, Si_{3}, Si_$	$O_{0}^{2.3078}$	22 72	
2е (па	аргасит)	$-(Na_{0.22}^{0.46})$	$(K_{0.05})_{0.27}$	Ca _{1.63} Na	(Mg) = (Mg)	$Fe_{0.45}^{2.30}$	Fe^{3+} 1 1 $Al_{0.70}$ $Ti_{0.01}$	$(Si_{25}Al_{1.75})$) O ₂₂ (OH));	
2і (па	ргасит)	$-(Na_{0.32}^{0.32})$	$(K_{0.03})_{0.35}$	Ca ₁₅₇ Na	(Mg_{13})	$Fe_{1,80}Fe_{1,80}A$	$Al_{0.65}Ti_{0.06})_{4.97}(S$	$Si_{5,76}Al_{2,74} = 0.25$),;	2-	
2с (эн	статит)	$-(Mg_{11})^{0.32}$	$Fe_{0.47}Al$	Na 10	$a_{0.03}Mn$	$(Si_{0.01})_{2}(Si_{1})_{3}$	$^{0.05}_{3}Al_{0.17})_{2}O_{6};$	5.70 2.24 8 22 \$	· 2		
2f (пи	жонит)	$-(Mg_{0.99}^{11})$	Fe ₀₄₁ Ca	$Al_{0,13}$	$(Si_{192}A)$	$l_{0.08}$), O_{6} ;					
3q (c1	3q (ставролит) – (Fe _{0.80} Mg _{0.22} Zn _{0.03}) 105 Al ₄ (Si _{1.83} Al _{0.17})O ₁₀ (OH),;										
3d (кл	инохло	p) – (Mg	4.19 Fe _{0.53}	$)_{4.72}(Al_{1.0})$	$_{0}Cr_{0.01})_{1.0}$	$_{01}(Si_{2.57}A)$	$(1_{1.70})_{4.27}O_{10}(OF)$	H) ₈ ;			
3і (ал	ьмандин	$(Fe_{1.1}) - (Fe_{1.1})$	$Mg_{0.80}$	$Ca_{0.34}Mn_0$	$(12)_{3.08}$ Al	1.96 Si2.97	D ₁₂ ;				
2ј (ал	ьмандин	$(Fe_{2.9}) - (Fe_{2.9})$	$Mg_{0.57}$	$Ca_{0.41}Mn_0$	$(11)_{3.11}$ Al	1.98 Si _{2.94} C	D ₁₂ ;				
3r (эп	3r (эпидот) – Ca _{1.99} (Al _{2.39} Fe _{0.52} Mg _{0.04}) _{2.95} (Si _{2.96} Ti _{0.01})O ₁₂ (OH)										

Примечание. Расчёт формул: амфиболы – на 13 катионов, пироксены – на 4 катиона, ставролит – на 3 катиона, клинохлор – на 10 катионов, гранаты и эпидот – на 8 катионов. ОН – расчёт. Note. Formulas were recalculated to 13 (amphiboles), 4 (pyroxenes), 3 (staurolite), 10 (clinochlore) and 8 (garnet and

epidote) cations. OH - is calculated.

Table 6

80

Форстерит Mg₂(SiO₄) указывался в карбонатных породах – родингитах и скарнах (Гекимянц, 1995), слагающих небольшие отдельные тела среди амфиболитов.

Плагиоклазы в габброидах и рудах по составу преимущественно являются лабрадором № 50–70, реже – более кислые андезины № 35–50 (Мушкетов, 1877; Алексеев и др., 2000; и др.).

Апатит $Ca_5(PO_4)_3(Cl,F,OH)$ в габброидах и в рудах месторождения обычно хлорсодержащий. В карбонатных породах и скарнах встречаются людвигит $Mg_2Fe(BO_3)_2$ и скаполит ряда мариалит-мейонит.

Из карбонатов преобладает кальцит Ca(CO₃), реже встречаются доломит CaMg(CO₃)₂ и сидерит Fe(CO₃), а также гидрокарбонаты магния и алюминия – манассеит и гидроталькит Mg₆Al₂(CO₃) (OH)₁₆ · 4H₂O (Иванов, Айзикович, 1980).

Основные выводы

1. Отвалы отходов обогащения титаномагнетитовых руд Кусинского месторождения сложены полиминеральным песком преобладающих по форме угловатых частиц до 1–2 мм, редко до 5 мм и более, полученных при дроблении коренных пород и руд; таблитчатых и округлых зёрен меньше.

2. В исследованной пробе по размеру частиц преобладает фракция –0.315+0.125 мм (64.6 %), которая по минеральному составу близка более крупным фракциям. Во всех фракциях № 1–3 (крупнее 0.125 мм) не выявлено обогащения рудными минералами – они при их малом количестве (2–3 % объёма этих трёх фракций) находятся преимущественно в виде вростков в силикатах.

3. Мелкая фракция (№ 4; -0.125 мм) исследованной пробы обогащена рудными минералами (магнетитом, ильменитом и гематитом) – суммарно около 20 % объёма, а также и гранатом (около 15 %), но эта фракция составляет всего 18 % от исходной пробы. Минеральные зёрна в этой фракции раскрыты, сростков мало.

4. По объёму в исходной пробе преобладают амфиболы (около 46 %) и хлорит (около 30 %), граната ~ 7.2 %, магнетита ~ 4.3 %, ильменита ~ 1.8 %; прочих минералов мало, в том числе сульфидов менее 1 %.

5. В исследованной нами пробе, дополнительно к ранее известным минералам месторождения, из силикатов встречены преобладающие моноклинные кальциевые амфиболы – паргаситы и ферро-

паргаситы, а из сульфидов – единичная находка высоконикелистого пирита (бравоита) с содержанием Ni 12.42 мас. %.

6. Мелкие фракции техногенных отвалов в пос. Магнитка могут быть использованы для извлечения оставшихся магнетита и ильменита. Возможно и получение концентратов силикатов (граната и амфибола) для абразивов или наполнителей облицовочных плиток. Крупная фракция отвалов может быть пригодна для отсыпки пешеходных троп в скверах и парках.

Избранная литература

Алексеев А.А., Алексеева Г.В., Ковалёв С.Г. Расслоенные интрузии западного склона Урала. Уфа: «Гилем», 2000. 185 с.

Бочарникова Т.Д., Прибавкин С.В., Холоднов В.В., Воронина Л.К. Хёгбомит из ильменитмагнетитовых руд Кусинского месторождения (Южный Урал) // Зап. РМО. 2005а. № 2. С. 84–90.

Бочарникова Т.Д., Холоднов В.В., Воронина Л.К. Закономерное изменение состава ильменита и магнетита из рудных залежей в разрезе Кусинского габбрового массива // Ежегодник–2004 Института геологии и геохимии им. акад. А.Н. Заварицкого. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 20056. С. 313–317.

Гекимянц В.М. Перовскит родингитовой минеральной ассоциации Зеленцовской копи, Южный Урал // Матер. Уральской летней минералогической школы–95. Екатеринбург: УГГГА, 1995. С. 40–41.

Гекимянц В.М., Соколова Е.В., Спиридонов Э.М., Феррарис Дж., Чуканов Н.В., Пренчипе М., Авдонин В.Н., Поленов Ю.А. Гидроксилклиногумит $Mg_9(SiO_4)_4(OH,F)_2$ – новый минерал из группы гуммита // Зап. ВМО. 1999. № 5. С. 64–70.

Гекимянц В.М., Спиридонов Э.М. Эпигенетическая минерализация родингитового типа в скарнах Кусинского Fe-Ti месторождения Южного Урала // Матер. Уральской летней минералогической школы–95. Екатеринбург: УГГГА, 1995. С. 48–51.

Железные руды Урала / http://biofile.ru/ geo/23332.html.

Иванов О.К., Айзикович А.Н. Манассеит из Кусинского месторождения // Зап. ВМО. 1980. № 1. С. 479–483.

Карпова О.В. Титаномагнетитовые руды Южного Урала. М.: Наука, 1974. 152 с.

Малышев И.И. Кусинское месторождение титано-магнетитов // Уральская экскурсия. Южный маршрут. Международный геологический конгресс, 17 сессия. Л.: НКТП-ОНТИ, 1937. С. 18–22.

Мушкетов И.В. Материалы для изучения геогностического строения рудных богатств Златоустовского горного округа в Южном Урале. СПб., 1877. 231 с.

Овчинников Л.Н. Полезные ископаемые и металлогения Урала. М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1998. 412 с.

Спиридонов Э.М., Гекимянц В.М., Куликова И.М. Упорядоченный кальциртит Ca₂Ti₂Zr₅O₁₆ родингитовой ассоциации Зеленцовской копи, Южный Урал // Матер. Уральской летней минералогической школы–95. Екатеринбург: УГГГА, 1995. С. 41–42. Ферштатер Г.Б., Холоднов В.В., Бородина Н.С. Условия формирования и генезис рифейских ильменит-титаномагнетитовых месторождений Урала // Геология руд. месторождений. 2001. Том 43. № 2. С. 112–128.

Фоминых В.Г. Кусинское месторождение // Формации титаномагнетитовых руд и железистых кварцитов. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1984. С. 30–33.

Фоминых В.Г. Особенности состава клиноамфиболов титаномагнетитовых руд Урала // Амфиболы метаморфических комплексов Урала. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1981. С. 41–54.

Поступила в редакцию 20 июня 2016 г.