

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ТИПОВ ИЛЬМЕНИТА НА ОБОГАТИМОСТЬ ТИТАНОМАГНЕТИТОВОЙ РУДЫ ГУСЕВОГОРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Р. С. Титов

Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук,
Екатеринбург, Россия

Аннотация: Приведены результаты минералого-технологических исследований по установлению влияния морфологических типов ильменита на магнитную сепарацию титаномагнетитовой руды Гусевогорского месторождения. Установлены формы нахождения ильменита в титаномагнетитовой руде, которые представлены продуктами распада твердого раствора магнетита и собирательной перекристаллизации в процессе метаморфизма, в виде ламелей ильменита в магнетит и компактных зерен ильменита в сростании с магнетитом. Представлены результаты электронно-зондового микроанализа состава морфологических типов ильменита в образцах титаномагнетитовой руды, подвергшихся магнитной сепарации. Для оценки влияния морфологических типов ильменита на обогащение титаномагнетитовой руды произведено разделение исследуемых образцов руды по магнитным свойствам на магнитную, I, II и III электромагнитные фракции. Выполнена количественная оценка крупности выделенных магнитных фракций и определено процентное соотношение выделяемых минеральных фаз. Представлены результаты рентгенофазового анализа магнитной фракции исследуемых образцов. На основе полученных результатов опытной сепарации произведен анализ влияния морфологических типов ильменита на концентрацию магнетита в соответствующей магнитной фракции. Полученные результаты послужат информационной основой для последующих исследований с целью оптимизации режимов магнитной сепарации при обогащении титаномагнетитовых руд Гусевогорского и, собственно, Качканарского месторождений.

Ключевые слова: титаномагнетитовая руда, минералогический анализ, минеральный состав руды, ильменит, магнетит, магнитная сепарация, ламели, Гусевогорское месторождение титаномагнетитов.

Благодарность: Статья подготовлена по материалам НИР, выполняемой по программе ФНИ государственных академий наук Тема 1 – Методы учета переходных процессов технологического развития при освоении глубокозалегающих сложно-структурных месторождений полезных ископаемых. (№ 0405–2019–0005).

Для цитирования: Титов Р. С. Исследование влияния морфологических типов ильменита на обогатимость титаномагнетитовой руды Гусевогорского месторождения // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 5–1. – С. 192–205. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_51_0_192.

Influence of morphological types of ilmenite on processability of titanomagnetite ore of Gusevogorskoe deposit

R. S. Titov

Institute of Mining Ural branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

Abstract: The article presents the results of mineralogical and technological studies into influence exerted by morphological types of ilmenite on magnetic separation of titanomagnetite ore of Gusevogorskoe deposit. The occurrence forms of ilmenite in titanomagnetite ore are represented by the decomposition products of solid solution of magnetite and by the products of collective recrystallization during metamorphism, in the form of lamellae of ilmenite into magnetite and compact grains of ilmenite in accretions with magnetite. The electron-probe microanalysis data on composition of morphological types of ilmenite in titanomagnetite ore samples subjected to magnetic separation are presented. To assess the influence of morphological types of ilmenite on beneficiation of titanomagnetite ore, the test ore samples were divided into magnetic fractions and into electromagnetic fractions I, II and III based on their magnetic properties. The quantitative assessment of the size of the magnetic fractions was performed, and the percentage ratio of the extracted mineral phases was determined. The X-ray phase analysis results on the magnetic fraction of the test samples are presented. Based on the experimental separation outcomes, the influence of morphological types of ilmenite on magnetite concentration in the magnetic fraction was analyzed. The results obtained will serve as an information basis for the further studies aimed at optimizing the magnetic separation modes during processing of titanomagnetite ore from Gusevogorskoe and Kachkanar deposits.

Key words: titanomagnetite ore, mineralogical analysis, mineral composition of ore, ilmenite, magnetite, magnetic separation, lamellae, Gusevogorskoe titanomagnetite deposit.

For citation: Titov R. S. Influence of morphological types of ilmenite on processability of titanomagnetite ore of Gusevogorskoe deposit. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(5–1):192–205. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_51_0_192.

Введение

Титаномагнетитовые руды являются наиболее распространенным промышленным типом железных руд, минеральный состав которых характеризуется широким развитием структуры многостадийного распада твердых растворов [1–6]. В недрах Российской Федерации сосредоточено ~ 30 % всех мировых запасов титаномагнетитовых руд [1–3]. На территории РФ разведано и в различной степени оценено более 40 месторождений титаномагнетитов [1–4]. Доля титаномагнетитовых руд в общем балансе разведанных запасов железных руд составляет ~ 13 % и ~ 18,5 % в производстве товарных руд [4]. Характерной особенностью титано-

магнетитовых руд является содержания в них значительного количества элементов примесей, наиболее важными из которых являются соединения ванадия и хрома [1–6].

Месторождения титаномагнетитовых руд широко распространены в зеленокаменной полосе Урала, к которой приурочены крупнейшие Гусевогорское и Собственно-Качканарское месторождения. В настоящее время с объемом добычи ~ 60 млн т/год сырой руды разрабатывается только Гусевогорское месторождение [5, 6]. Собственно-Качканарское месторождение, с запасами более 3,6 млрд т, готовится к разработке. Титаномагнетитовое оруденение месторождений представ-

лено вкрапленностью титаномагнетита и ильменита в пироксенитах [7–21]. Главными рудными минералами являются титаномагнетит и магнетит, с которыми связано около 70–75 % железа и 80 % ванадия, остальная часть железа содержится в породообразующих силикатных минералах. По химическому составу руды месторождения относятся к малотитанистым ванадий-содержащим железным рудам с очень низким содержанием серы и фосфора (0,03 % и 0,02 %) [5–12].

Относительно магнитных свойств главных рудных минералов, руды месторождений сильномагнитные, обогащаются методом магнитной сепарации в слабом магнитном поле. Присутствие в исходной руде значительного объема тонковкрапленного типа оруднения и тесного сростания ильменита с магнетитом обуславливает технологии ее тонкого измельчения (от 91,5–92 % кл. 0,071 мм) и специального режима магнитной сепарации для получения товарного концентрата. В связи с этим оценка степени влияния минералогического и химического составов руды на эффективность ее обогащения в магнитном поле разной напряженности является важной научно-производственной задачей.

Описание работы

Особенностью вещественного состава железных руд Гусевогорского месторождения является низкое содержание железа (15–17 %) и наличие примесных окислов титана (TiO_2 – 1,22 %) и ванадия (V_2O_5 – 0,12 %). При этом содержание железа в руде существенно зависит от количества этих окислов в титаномагнетите, изоморфных примесей (Ti, V, Mn, Mg, Al, Cr, Sc, Sr, Cu и др.) и нерудных минералов [5–12]. Основным носителем титана в рудах является ильменит. Титан нахо-

дится в виде отдельных зерен ильменита, сростков ильменита с магнетитом и породообразующими минералами и в виде изоморфной примеси. Ванадий самостоятельных минералов не образует, представлен изоморфной примесью в магнетите, ильмените и других минералах силикатной основы руд [5–12].

Несмотря на весьма малое содержание в руде металлов примесей, они представляются как допустимые микролегирующие элементы, позволяющие получать железо повышенного качества. Наличие в готовом продукте обогащения (агломерате и окатышах) ванадия позволяет при выплавке получать сталь с повышенными механическими и жаропрочными свойствами, наличие титана, который является одним из лучших раскислителей стали, способствует повышению ее прочности, улучшает обрабатываемость и сопротивление коррозии. В то же время, присутствие TiO_2 в исходной руде оказывает негативное влияние на эффективность магнитной сепарации при ее обогащении [22, 23]. Поэтому важной задачей переработки титаномагнетитов является снижение до минимального содержания титана в исходной руде и продуктах обогащения.

Для определения влияния ильменита на результаты магнитного обогащения титаномагнетитовых руд Гусевогорского месторождения ИГД УрО РАН был произведен комплекс минералого-геохимических и физико-химических исследований 34 образцов керновых проб титаномагнетитовой руды, отобранных в Северном карьере АО «ЕВРАЗ КГОК» [24–26].

Результаты исследований

Минералогическими исследованиями титаномагнетитовой руды установлено, что ильменит представлен двумя

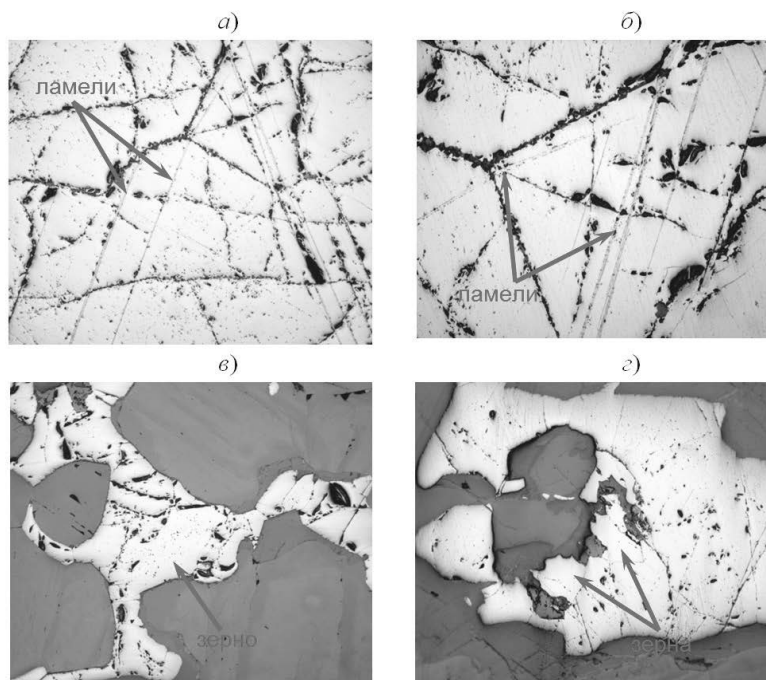


Рис. 1. Формы выделения ильменита различной морфологии: а, б — ламели ильменита в зернах магнетита; в, г — зерна ильменита неправильной формы в сростаниях с магнетитом (ильменит — светло-бежево-серый; магнетит — светло-серый)

Fig. 1. Different-morphology ilmenite: (a), (b) lamellae of ilmenite in magnetite grains; (c), (d) irregularly-shaped ilmenite grains in accretions with magnetite (ilmenite—lightly beige grey; magnetite—light-grey)

морфологическими типами: 1 — в виде ламелей в зернах магнетита; 2 — в виде компактных зерен различной формы, находящихся в сростании с магнетитом (рис. 1) [25, 26]. Содержание ильменита в исследуемых образцах составило 0,1–3 %.

Ламели (рис. 1) наблюдались как серии параллельных линий на поверхности зерен магнетита, занимающие от 0,1 до 15 % всей поверхности сечения зерна. Количество ламелей в отдельном зерне составляло от 0,2 % до 2–5 %. Компактные зерна ильменита во всех исследуемых образцах обнаружены в сростании с магнетитом. Количество таких зерен составило ~ 0,5–1,5 %. Также встречались сростки из 2 и более зерен минерала.

Для изучения и оценки влияния морфологических типов ильменита на магнитное разделение (сепарацию) сильномагнитных минералов (магнетита, титаномагнетита) руд Гусевогорского месторождения были подготовлены 8 образцов проб, образующих «ряд содержания» ильменита в следующей вариации: 0–0,1; 0,1–0,3; 0,3–0,5; 0,5–1; 1–1,5; 1–2; 1,5–2 и 2–3 % (табл. 1) [25, 26].

Элементный состав ильменита титаномагнетитовой руды оценен по двум характерным образцам № 1 и 2 (рис. 2, табл. 1). Анализ состава образцов произведен электронно-зондовым микроанализатором Cameca SX-100.

Микронзондовое исследование состава ильменита в образце № 1 было выпол-

Таблица 1

Образцы для изучения влияния ильменита на магнитную сепарацию титаномагнетитовой руды Гусевогорского месторождения

Samples for studies into influence of magnetite on magnetic separation of titanomagnetite ore from Gusevogorskoe deposit

№ обр.	Название	Mgt*, %	Ilm*, %	Форма выделения ильменита
1	Пироксенит рудный	5–10	2–3	зерна
2	Пироксенит рудный	5–10	1,5–2	ламели и зерна
3	Пироксенит рудный	7–10	1–2	ламели и зерна
4	Пироксенит рудный	5–10	1–1,5	зерна
5	Пироксенит рудный	5–10	0,5–1	зерна
6	Пироксенит рудный	7–10	0,3–0,5	ламели и зерна
7	Пироксенит рудный	5–10	0,1–0,3	ламели и зерна
8	Пироксенит рудный	10–15	0–0,1	ламели

* Mgt – мнетит, Ilm – ильменит

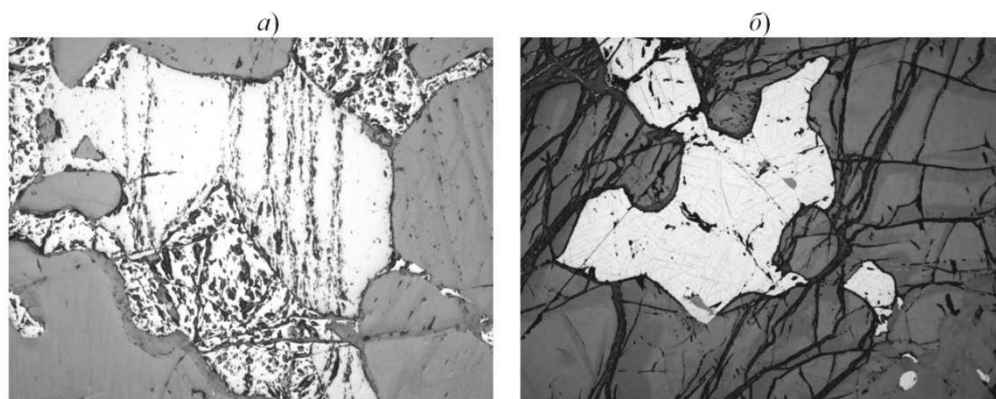


Рис. 2. Характерные формы выделения ильменита в подготовленной выборке образцов: а – зерно, образец № 1; б – ламели в магнетите, образец № 2

Fig. 2. Representative forms of ilmenite extraction in test samples: (a) grain, sample No. 1; (b) lamellae in magnetite, sample No. 2

нено для нескольких зерен размером 0,2–0,7 мм, находящихся в срастании с магнетитом, а также контактирующих с вмещающими силикатами (рис. 3).

Ильменит в обр. № 1 представлен в основном компактными зернами сечением 0,1–0,7 мм, контактирующими с зернами магнетита и заполняющими межзерновое пространство клинопироксена. Очень редко в зернах магнетита обнаруживаются отдельные ламели ильменита. Элементный состав ламелей близок к составу краевых

частей компактных зерен. Усредненный элементный состав ильменита обр. № 1 представлен в табл. 2.

Ильменит в составе образца № 2 представлен ламелями шириной 0,001–0,002 мм в зернах магнетита и компактными зернами размером 0,2–0,3 мм, которые находятся в срастании с магнетитом (рис. 4).

В ильмените обр. № 2 установлены примеси MgO (4,3–6,13 %), MnO (2,7–3,36 %), V₂O₅ (1,8–2,0 %) и Al₂O₃ (0,14–0,3 %). При этом содержание

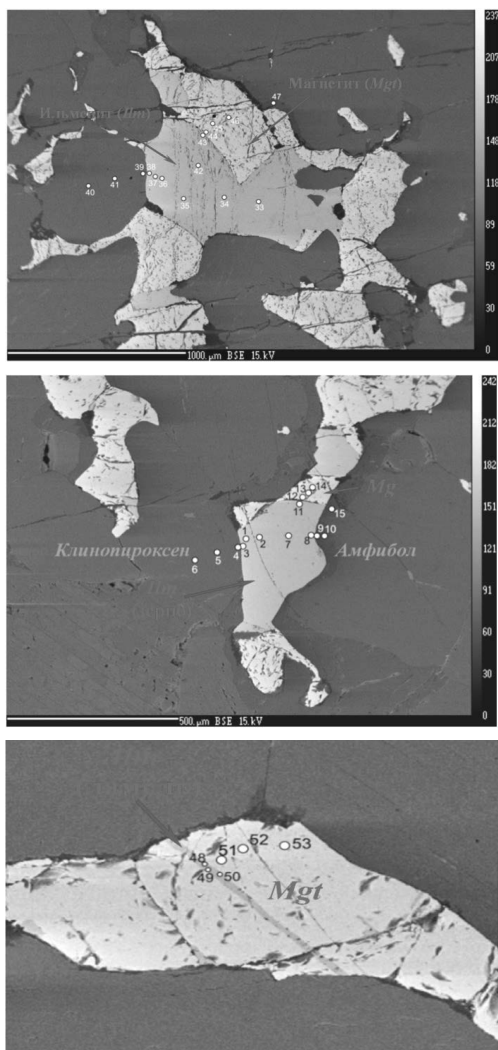


Рис. 3. Пример BSE изображений: зерна ильменита (серое), магнетита (светло-серое) и силикатов (темно-серое) образца № 1 (с точками анализов)

Fig. 3. BSE images of grains of ilmenite (grey), magnetite (light-grey) and silicates (dark-grey) in sample No. 1 (with points of analyses)

TiO₂ в пределах 51,7–52 %, а FeO – 35,8–38,5 %. Ильменит из ламелей в обр. № 2 отличается невысоким содержанием MgO – до 1,2 % и близок по составу к ильмениту обр. № 1. Усредненный элементный состав ильменита обр. № 2 представлен в табл. 3.

По результатам микронзондовых исследований обр. № 1 и 2 установлено следующее:

- для руды, в которой ильменит находится в виде компактных зерен, характерно относительно невысокое содержание TiO₂, от 0,01 до 0,94 %, и низкое содержание примесей MgO – 0,01–1,8 % и Al₂O₃ – 0,1–0,7 %;

- в руде с широким развитием ламелей ильменита содержание TiO₂ изменяется от 1,1 до 2,5 %;

- в зернах магнетита, свободных от ламелей ильменита, содержание TiO₂ изменяется от 2,5 до 5 %.

В зависимости от морфологического типа ильменита установлены средние содержания TiO₂ в руде:

- для магнетита, зерна которого имеют сростание с компактными зернами ильменита различной формы, – 0,13 %;

- для магнетита, в зернах которого наблюдается широкое развитие ламелей ильменита, – 0,39 %;

- для магнетита, зерна которого не имеют ильменита ни в одной из форм его выделения, – 3,69 %.

На основании результатов исследований химико-минералогического состава образцов руды были выполнены исследования по оценке влияния морфологических форм ильменита на результаты магнитного обогащения. Оценка влияния ильменита на магнитное разделение (сепарацию) сильномагнитных минералов производилась на разложенном по плотности, фракционному составу и магнитным свойствам рудном материале. Для этого измельченные до размерности менее 0,5 мм пробы были рассеяны на 5 исследуемых классов крупности (+0,5; –0,5 +0,25; –0,25 +0,16; –0,16 +0,05; –0,05 мм) и разделены по плотности. Далее из тяжелой фракции каждого класса были выделены магнитная и «немагнитная» минеральные части

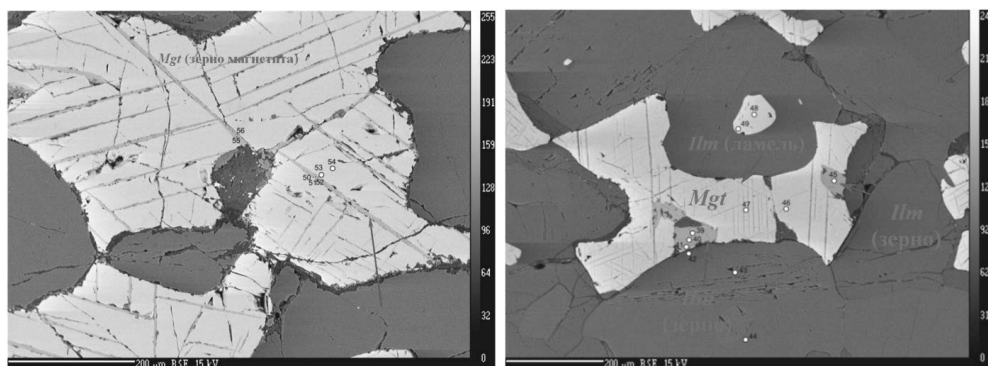


Рис. 4. Пример BSE изображений: зерна ильменита (серое), магнетита (светло-серое) и силикатов (темно-серое) образца № 2 (с точками анализов)

Fig. 4. BSE images of grains of ilmenite (grey), magnetite (light-grey) and silicates (dark-grey) in sample No. 2 (with points of analyses)

Таблица 2

Результаты микрозондового анализа ильменита титаномагнетитовой руды, образец № 1 (средние по образцу, масс. %)

Microprobe analysis data on ilmenite in titanomagnetite ore sample No. 1 (average over the sample, % by mass)

Содержание в ильмените, %											
SiO ₂	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	MnO	NiO	V ₂ O ₅	ZnO	CoO	Сумма
0,084	48,03	0,06	0,35	45,7	0,19	3,26	0,014	1,93	0,059	0,044	99,73

Таблица 3

Результаты микрозондового анализа ильменита титаномагнетитовой руды, образец № 2 (средние по образцу, масс. %)

Microprobe analysis data on ilmenite in titanomagnetite ore sample No. 2 (average over the sample, % by mass)

Содержание в ильмените, %											
SiO ₂	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	MnO	NiO	V ₂ O ₅	ZnO	Сумма	
0,18	50,26	0,116	2,39	37,02	4,7	3,76	0,019	1,89	0,096	100,4	

исследуемого материала. Разделение каждого размерного класса по магнитным свойствам производилось сухой магнитной сепарацией. Для каждого размерного класса в порядке увеличения индукции магнитного поля (от 20 до 200 мТл) были получены 4 магнитных фракции: магнитная, I, II и III электромагнитные (или ферро-, средне-, слабо- и немагнитная) [25, 26]. Отбор соответствующей магнитной фрак-

ции из разделяемой пробы размерного класса производился до ее полного извлечения.

Количественная оценка крупности выделенных магнитных фракций производилась при помощи электронного микроскопа. Для количественной оценки выбран обр. № 1 (см. табл. 1 и 2, рис. 2 и 3), в котором ильменит находится в виде относительно крупных (размером до 1 мм) отдельных

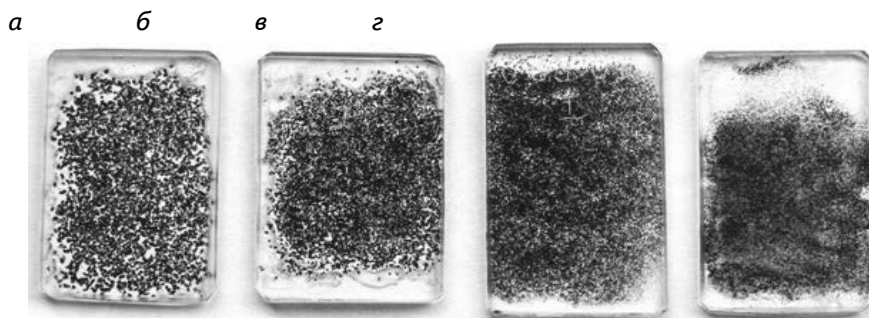


Рис. 5. Фотография искусственных шлифов для магнитной фракции исследуемого рудного материала (образец № 1): $-0,5 + 0,25$ мм (а), $-0,25 + 0,16$ мм (б), $-0,16 + 0,05$ мм (в), $-0,05$ мм (г)

Fig. 5. Picture of polished sections for magnetic fraction of test ore sample No. 1: (a) $-0.5 + 0.25$ mm; (b) $-0.25 + 0.16$ mm; (c) $-0.16 + 0.05$ mm; (d) -0.05 mm

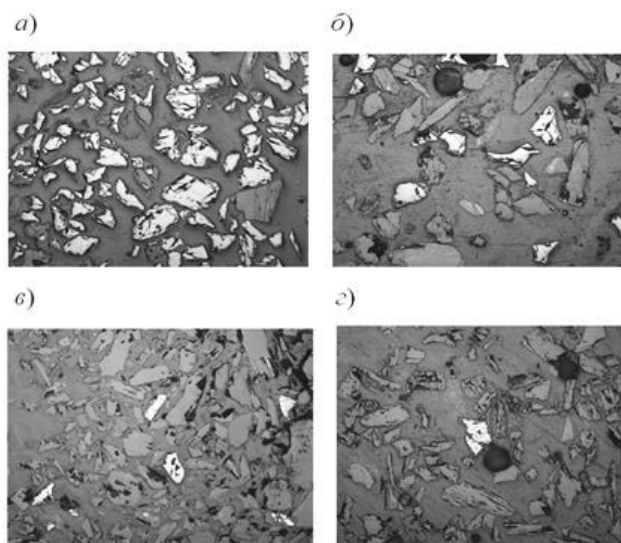


Рис. 6. Фотография искусственного полированного шлифа класса крупности $-0,16 + 0,05$ мм (магнетит — светло-серое, ильменит — светло-бежево-серое): а — магнитная фракция; б — I электромагнитная фракция; в — II электромагнитная фракция; г — III электромагнитная фракция

Fig. 6. Picture of polished section of $-0.16 + 0.05$ mm size (ilmenite—lightly beige grey; magnetite—light-grey): (a) magnetic fraction; (b) electromagnetic fraction I; (c) electromagnetic fraction II; (d) electromagnetic fraction III

зерен. Точная диагностика минеральных фаз и их процентное соотношение производилась на «искусственных шлифах». Искусственные шлифы образцов были изготовлены для каждой полученной по магнитным свой-

ствам фракции для классов крупности $0,5 + 0,25$, $-0,25 + 0,16$, $-0,16 + 0,05$ и $-0,05$ мм (рис. 5, 6).

Искусственные шлифы изучались при помощи рудного (в отраженном свете) и бинокулярного микроскопов.

В отраженном свете ильменит и магнетит диагностировались по цвету, дубо-тражению и анизотропии, выполнялось фотографирование образцов. Результаты оценки содержания ильменита в «искусственных шлифах» приведены в табл. 4.

Данные табл. 4 показывают, что при магнитной сепарации титаномагнетитовой руды ильменит концентрируется в основном в магнитной и I электромагнитной фракциях в виде зерен, сростшихся с магнетитом, и ламелей в зернах магнетита.

В электромагнитные фракции попадают преимущественно обломки компактных зерен ильменита в сростании с магнетитом. При уменьшении класса крупности рудного материала наблю-

дается увеличение концентрации ильменита в I электромагнитной фракции и уменьшение его в магнитной и II электромагнитной фракциях. Помимо этого, установлено уменьшение количества силикатов в магнитной и I электромагнитной фракции, что приводит к увеличению в них содержания рудных фаз (титаномагнетита, магнетита). В классах крупности — 0,5 +0,25 и -0,25 +0,16 мм небольшое количество зерен ильменита (0,3–0,5 %) попадает во II электромагнитную фракцию в виде сростков минерала с силикатами.

Для уточнения полученных результатов был выполнен рентгенофазовый анализ (XRD) восьми исследуемых образцов (по пять навесок для каждого

Таблица 4

Результаты количественной оценки ильменита в «искусственных шлифах» рудного материала образца № 1

Quantitative assessments of ilmenite in polished sections of ore sample No. 1

Наименование фракций	Класс крупности фракции, мм		
	-0,5 +0,25	-0,25 +0,16	-0,16 +0,05
Содержание ильменита во фракции, %			
Магнитная	3	2	2
I эл/м	0,5	3	15
II эл/м	0,5	0,5	0
III эл/м	0	0	0
Доля фракции в пробе, %			
Магнитная	47,5	45,2	43,8
I эл/м	21,8	10,8	2,9
II эл/м	10,3	14,0	4,8
III эл/м	20,4	30,1	48,6
Количество ильменита в пробе, приходящееся на каждую из фракций, %			
Магнитная	1,4	0,9	0,9
I эл/м	0,1	0,3	0,4
II эл/м	0,1	0,1	0,0
III эл/м	0,0	0,0	0,0
Ильменита всего в пробе, %	1,6	1,3	1,3

Примечание: м/ф — магнитная фракция; I, II и III эл/м — соответственно первая, вторая и третья электромагнитные фракции

Таблица 5

Содержание ильменита в исследуемых образцах и I электромагнитной фракции титаномагнетитовой руды (по данным рентгенофазового анализа)
Contents of ilmenite in test samples and electromagnetic fraction I in titanomagnetite ore (from X-ray phase analysis)

№ обр.	Содержание ильменита в образце, %	Форма выделения ильменита в исследуемом образце	Содержание ильменита в I эл/м фракции, %		
			Классы крупности фракции, мм		
			-0,5+0,25	-0,25+0,16	-0,16 +0,05
1	1,4	зерна	0,0	4,0	17,0
2	1,7	ламели и зерна	0,0	2,0	1,0
3	0,7	ламели и зерна	0,0	2,0	3,0
4	1,5	зерна	0,0	3,0	5,0
5	1,3	зерна	0,0	5,0	10,0
6	0,9	ламели и зерна	0,0	2,0	4,0
7	1,0	ламели и зерна	0,0	0,0	2,0
8	0,3	ламели	0,0	1,0	1,0

образца). По данным XRD анализа (табл. 5), ильменит в пробах класса крупности — 0,5 +0,25 мм установлен только в магнитной фракции, в классе — 0,25 +0,16 мм содержание ильменита в I электромагнитной фракции установлено больше, или, в некоторых случаях, равно его содержанию в магнитной фракции.

Данные табл. 5 показывают, что с уменьшением размерности зерна ильменита его количества увеличивается в I электромагнитной фракции, а ламели ильменита не раскрываются при измельчении рудного материала вплоть до крупности 0,05 мм. В классе крупности — 0,5 +0,25 мм, I электромагнитной фракции и среднем размере зерна 0,2–0,3 мм ильменит обнаружен не был, это объясняется неполным «раскрытием» его зерен и переходом его вместе с магнетитом в магнитную фракцию. Таким образом, установлено, что для отделения ильменита от магнитных минералов титаномагнетитовой руды класса крупности — 0,25 + 0,05 мм требуется ее более тонкое измельчение [25, 26].

Выводы

Выполненными исследованиями установлено следующее:

- при разделении сильномагнитных минералов титаномагнетитовой руды ильменит концентрируется в магнитной и I-й электромагнитной фракциях при классе крупности — 0,25 +0,05 мм;

- компактные зерна ильменита (< 0,2 мм) в сростании с магнетитом преимущественно попадают в I электромагнитную фракцию; ильменит в ламелях в основном переходит в магнитную фракцию;

- для снижения концентрации ильменита в магнитной фракции необходимо более тонкое измельчение руды до класса крупности — 0,071 +0,05 мм с его содержанием не менее 95–97 %;

- концентрация ильменита в магнитной фракции в большей степени зависит от его морфологического типа, чем от его содержания в руде;

- для максимального извлечения магнитных минералов и выделения бедных по массовой доле железа хвостов рекомендуется сепарацию производить

стадиальным понижением индукции магнитного поля от 0,25 до 0,1 Тл.

Полученные результаты изучения химико-минералогического состава, структурно-текстурных характеристик и физических свойств титаномагнети-

товых руд Гусевогорского месторождения позволят усовершенствовать действующую технологию их переработки, разработать оптимальные режимы обогащения и сократить потери полезных компонентов в хвосты обогащения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРА

1. *Быховский Л. З.* Пришел черед комплексных руд / Л. З. Быховский, Л. П. Тигунов, П. А. Масловский // *Металлы Евразии*. 2005. № 3. С. 12–18.
2. *Вышегородский Д. В.* Титаномагнетитовые руды – перспективная сырьевая база металлургии // *Уральский рынок металлов*. 2006. № 1. С. 49.
3. Титаномагнетиты Урала и технология их переработки // Все о металлургии URL: <http://metal-archiv.ru/titanomagnetit/907-titanomagnetit-urala-i-tehnologiya-ih-pererabotki.html> (дата обращения 17.01.2020).
4. *Пирогов Б. И.* Минералого-технологические особенности неоднородности титаномагнетитов РФ и методы их оценки / Б. И. Пирогов, И. Г. Быстров // *Сборник научных трудов IX Всероссийского семинара по технологической минералогии «Рациональное недропользование»*. Магнитогорск: МГТУ, 2014. С. 180–187.
5. *Быстров И. Г.* Оценка влияния неоднородности титаномагнетита на обогатимость железных руд магматического генезиса: Диссертация на соискания уч. степ. канд. г-м. наук / ФГУП Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н. М. Федоровского. Москва, 2014. 117 с.
6. *Быстров И. Г.* Титаномагнетит как объект технологической минералогии // *Проблемы освоения недр в XXI век глазами молодых: Материалы IX международной молодежной научной школы; ИПКОН РАН*. Москва, 2013. С. 251–254.
7. Особенности вещественного состава титаномагнетитовых руд магматического генезиса, определяющие их обогатимость / Б. И. Пирогов, Е. С. Броницкая, Ю. М. Астахова, Е. С. Волков // *Разведка и охрана недр*. 2013. № 2. С. 47–51.
8. *Пахомов Ф. П.* Титаномагнетитовые месторождения России: минерально-сырьевая база, перспективы освоения и комплексного использования / Ф. П. Пахомов, Л. П. Тигунов, Л. З. Быховский. М.: ВИМС, 2010. 138 с.
9. Современные тенденции переработки титансодержащих руд / Г. И. Газалева, Н. В. Шихтов, Н. А. Сопина, А. А. Мушкетов // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2015. № 12. С. 30–36.
10. *Dmitriev A. N., Vitkina G. Yu., Petukhov R. V., Kornilkov S. V., Pelevin A. E., Fishman A. Y., Sapozhnikova T. V., Shunyaev K. Y.* The Characteristic of Ores and Concentrates of the Open Society «EVRAZ KGOK». *Advanced Materials Research*. 2014. (Vol. 834 – 836). p. 364–369.
11. *John L. Nold, Paul Davidson, Mark A. Dudley* The pilot knob magnetite deposit in the Proterozoic St. Francois Mountains Terrane, southeast Missouri, USA: A magmatic and hydrothermal replacement iron deposit. *Ore Geology Reviews*. 2013. Vol. 53. p 446–469. DOI:10.1016/j.oregeorev.2013.02.007
12. *Фоминых В. Г.* Петрология и рудогенезис Качканарского массива / В. Г. Фоминых, Ю. П. Краева, Н. В. Ларина // УНЦ АН СССР. Свердловск, 1987. 184 с.
13. *Резниченко В. А.* Титанаты. Научные основы, технология, производство / В. А. Резниченко, Т. В. Олюнина, В. В. Аверин. М.: Наука, 2013. 267 с.
14. *Ибрагимов Ш. З.* Титаномагнетиты со структурами распада магнетит–ульвошпинель, коэрцитивные свойства: моделирование и эксперимент // *Физика Земли*. 2015. № 6. С. 91.

15. *Dubihski J.* Sustainable development of mining mineral resources, *J. Sustain. Min.*, 2013, Vol. 12, No. 1. p. 1 – 6.
16. Wen Yu, Xiaojin Wen, Jiangan Chen, Jingzhong Kuang, Qiongyao Tang, Yuechao Tian, Jiali Fu, Weiqin Huang, Tingsheng Qiu. Preparation of Direct Reduced Iron and Titanium Nitride from Panzhihua Titanomagnetite Concentrate through Carbothermic Reduction-Magnetic Separation. *Minerals*. 2017. Vol. 7, № 11. p. 1 – 10. DOI: 10.3390/min7110220
17. *Hosseinzadeh M., Alizadeh M., Raouf Hosseini S. M.* Mineralogical and physical beneficiation studies for iron extraction from Bardaskan titanomagnetite placer deposit. *Journal of Mining & Environment*. 2017. Vol. 8. № 2. p. 191 – 201. DOI: 10.22044/jme.2016.661
18. *Petrochilos L. T.* The graduate work for the degree of master of science in geology and geophysics // Experimental and analytical studies of titanomagnetite in synthetic and natural samples. UNIVERSITY OF HAWAII. 2010. p.147.
19. *Longsheng Zhao, Lina Wang, Tao Qi, Desheng Chen, Hongxin Zhao, Yahui Liu* A novel method to extract iron, titanium, vanadium, and chromium from high-chromium vanadium-bearing titanomagnetite concentrates. *Hydrometallurgy*. 2014. Vol. 149. p 106 – 109. DOI: 10.1016/j.hydromet.2014.07.014
20. *Sisir K. Mondal, William L. Griffin* Processes and Ore Deposits of Ultramafic-Mafic Magmas through Space and Time. Elsevier, 2018. p. 382. DOI: 10.1016/C2016 – 0-00577 – 6
21. *Wolfgang D. Maier, Raimo Lahtinen, Hugh O'Brien* Mineral Deposits of Finland. Elsevier, 2015. p. 802. DOI: 10.1016/C2012 – 0-02750 – 0
22. Низкотемпературные магнитные свойства базальтов, содержащих титаномагнетит состава ~ TM30 / П. В. Харитонский, Е. С. Сергиенко, С. Ю. Янсон, А. А. Костеров // *Физика Земли*. 2018. № 1. С. 140 – 157.
23. *Базуев Г. В.* Разбавленный ферримагнетизм ильменитов $Mn_3FeTiSbO_9$ и $Mn_4FeTi_2SbO_{12}$ / Г. В. Базуев, А. В. Королев, Б. Г. Головкин // *Физика твердого тела*. 2016. № 7. Т. 58. С. 1289 – 1295.
24. *Кантемиров В. Д.* Изучение объемного веса титаномагнетитовой руды Гусевогорского месторождения / В. Д. Кантемиров, Р. С. Титов, А. М. Яковлев // *Маркшейдерия и недропользование*. 2017. № 2(88). С. 18 – 21.
25. *Кантемиров В. Д.* Оценка влияния минерального состава титаномагнетитовой руды на результаты магнитного обогащения / В. Д. Кантемиров, Р. С. Титов, А. М. Яковлев // *Обогащение руд*. 2017. № 4. С. 36 – 40.
26. *Кантемиров В. Д.* Оценка влияния минерального состава титаномагнетитовой руды Гусевогорского месторождения на результаты магнитного обогащения / В. Д. Кантемиров, Р. С. Титов // *Маркшейдерия и недропользование*. 2017. № 3(89). С. 49 – 52.
27. *Ревнивцев В. Н.* Технологическая минералогия железных руд / В. Н. Ревнивцев. Л.: Наука, 1988. 301 с. **ПИАБ**

REFERENCE

1. Bykhovsky L. Z., Tiginov L. P., Maslovsky P. A. The turn of complex ores has come. *Metals Of Eurasia*. 2005. no. 3. pp. 12 – 18. [In Russ]
2. Vyshegorodsky D. V. Titanomagnetite ores-a promising raw material base of metallurgy. *The Ural market of metals*. 2006. no. 1. p. 49. [In Russ]
3. Titanomagnetites of the Urals and their processing technology (2020, January 17). Retrieved from. <http://metal-archive.ru/titanomagnetity/907-titanomagnetity-urala-i-tehnologiya-ih-pererabotki.html>. [In Russ]
4. Pirogov B. I., Bystrov I. G. *Mineralogo-tehnologicheskie osobennosti neodnorodnosti titanomagnetitov RF i metody ih ochenki* [Mineralogical and technological features of

heterogeneity of titanomagnetites of the Russian Federation and methods of their estimation]. Sbornik nauchnyh trudov IX Vserossijskogo seminara po tehnologicheskoj mineralogii «Racional'noe nedropol'zovanie». Magnitogorsk: MGTU, 2014. pp. 180–187. [In Russ]

5. Bystrov I. G. *Ocenka vlijanija neodnorodnosti titanomagnetita na obogatimost' zheleznyh rud magmaticeskogo genezisa* [Evaluation of the influence of heterogeneity of titanomagnetite on the enrichment of iron ores of magmatic genesis]. Dissertacija na soiskaniya uch. step. kand. g-m. nauk. FGUP Vserossijskij nauchno-issledovatel'skij institut mineral'nogo syr'ja im. N. M. Fedorovskogo. Moscow, 2014. p. 117. [In Russ]

6. Bystrov I. G. *Titanomagnetit kak ob'ekt tehnologicheskoj mineralogii* [Titanomagnetite as an object of technological Mineralogy]. Problems of subsoil development in the XXI century through the eyes of the young: Materials of the IX international youth scientific school; ipcon RAS. Moscow, 2013. p. 251–254. [In Russ]

7. Pirogov B. I., Bronickaja E. S., Astahova Ju. M., Volkov E. S. Features of the material composition of titanomagnetite ores of igneous Genesis that determine their enrichment. *Razvedka i ohrana nedr.* 2013. no. 2. pp. 47–51. [In Russ]

8. Pahomov F. P., Tigonov L. P., Byhovskij L. Z. *Titanomagnetitovye mestorozhdenija Rossii: mineral'no-syr'evaja baza, perspektivy osvoenija i kompleksnogo ispol'zovanija* [Titanomagnetite deposits in Russia: mineral resource base, prospects for development and integrated use]. Moscow: VIMS, 2010. p. 138. [In Russ]

9. Gazaleeva G. I., Shihtov N. V., Sopina N. A., Mushketov A. A. Current trends in processing of titanium-containing ores. *Chernaja metallurgija. Bjulleten' nauchno-tehnicheskoj i jekonomicheskoj informacii.* 2015. no. 12. p. 30–36. [In Russ]

10. Dmitriev A. N., Vitkina G. Yu., Petukhov R. V., Kornilkov S. V., Pelevin A. E., Fishman A. Y., Sapozhnikova T. V., Shunyaev K. Y. The Characteristic of Ores and Concentrates of the Open Society «EVRAZ KGOK». *Advanced Materials Research.* 2014. (Vol. 834 836). pp. 364–369.

11. John L. Nold, Paul Davidson, Mark A. Dudley The pilot knob magnetite deposit in the Proterozoic St. Francois Mountains Terrane, southeast Missouri, USA: A magmatic and hydrothermal replacement iron deposit. *Ore Geology Reviews.* 2013. Vol. 53. p 446–469. DOI:10.1016/j.oregeorev.2013.02.007.

12. Fominyh V. G., Kraeva Yu. P., Larina N. V. *Petrologiya i rudogenezis Kachkanarskogo massiva* [Petrology and ore genesis of the Kachkanar massif]. UNC AN SSSR. Sverdlovsk, 1987. 184 p. [In Russ]

13. Reznichenko V. A., Oljunina T. V., Averin V. V. *Titanaty. Nauchnye osnovy, tehnologija, proizvodstvo* (Titanates. Scientific basis, technology, production). Moscow: Nauka, 2013. p. 267. [In Russ]

14. Ibragimov Sh. Z. Magnetites with the structures of the disintegration of the magnetite-ulvospinel, coercive properties: modeling and experimen). *Fizika Zemli.* 2015. no. 6. p. 91. [In Russ]

15. Dubijski J. Sustainable development of mining mineral resources, *J. Sustain. Min.,* 2013, Vol. 12, no. 1. pp. 1–6.

16. Wen Yu, Xiaojin Wen, Jiangan Chen, Jingzhong Kuang, Qiongyao Tang, Yuechao Tian, Jiali Fu, Weiqin Huang, Tingsheng Qiu. Preparation of Direct Reduced Iron and Titanium Nitride from Panzhihua Titanomagnetite Concentrate through Carbothermic Reduction-Magnetic Separation. *Minerals.* 2017. Vol. 7, issue 11. p. 1–10. DOI: 10.3390/min7110220.

17. Hosseinzadeh M., Alizadeh M., Raouf Hosseini S. M. Mineralogical and physical beneficiation studies for iron extraction from Bardaskan titanomagnetite placer deposit. *Journal of Mining & Environment.* 2017. Vol. 8. no. 2. p. 191–201. DOI: 10.22044/jme.2016.661.

18. Petrochilos L. T. The graduate work for the degree of master of science in geology and geophysics. Experimental and analytical studies of titanomagnetite in synthetic and natural samples. UNIVERSITY OF HAWAII. 2010. p. 147.

19. Longsheng Zhao, Lina Wang, Tao Qi, Desheng Chen, Hongxin Zhao, Yahui Liu A novel method to extract iron, titanium, vanadium, and chromium from high-chromium vanadium-bearing titanomagnetite concentrates. Hydrometallurgy. 2014. Vol. 149. pp 106–109. DOI: 10.1016/j.hydromet.2014.07.014.

20. Sisir K. Mondal, William L. Griffin Processes and Ore Deposits of Ultramafic-Mafic Magmas through Space and Time. Elsevier, 2018. p. 382. DOI: 10.1016/C2016-0-00577-6.

21. Wolfgang D. Maier, Raimo Lahtinen, Hugh O'Brien Mineral Deposits of Finland. Elsevier, 2015. p. 802. DOI: 10.1016/C2012–0-02750–0.

22. Haritonskij P. V., Sergienko E. S., Janson S. Ju., Kosterov A. A. Low temperature magnetic properties of basalts containing near ~TM30 titanomagnetite. *Fizika Zemli*. 2018. no. 1. pp. 140–157. [In Russ]

23. Bazuev G. V., Korolev A. V., Golovkin B. G. Dilute ferrimagnetism of ilmenites $Mn_3FeTiSbO_9$ and $Mn_4FeTi_2SbO_{12}$. *Fizika tverdogo tela*. 2016. no. 7. T. 58. pp. 1289–1295. [In Russ]

24. Kantemirov V. D., Titov R. S., Jakovlev A. M. Study of the volume weight of the titanomagnetite ore of the Gusevo-gorsky Deposit. *Surveying and subsurface use*. 2017. no. 2(88). pp. 18–21. [In Russ]

25. Kantemirov V. D., Titov R. S., Jakovlev A. M. Evaluation of the influence of the mineral composition of titanomagnetite ore on the results of magnetic enrichment. *Ore dressing*, 2017, no. 4. pp. 36–40. [In Russ]

26. Kan V. D.-temirov, Titov R. S. Ocenka vliyaniya mineral'nogo sostava titanomagnetitovoj rudy Gusevogorskogo mestorozhdeniya na rezul'taty magnitnogo obogashcheniya. *Markshejderiya i nedropol'zovanie*. 2017. no. 3(89). C. 49–52. [In Russ]

27. Revnivcev V. N. *Tekhnologicheskaya mineralogiya zheleznyh rud* [Technological mineralogy of iron ores]. Leningrad: Nauka, 1988. 301 p. [In Russ]

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Титов Роман Сергеевич — старший научный сотрудник, сектор Управления качеством минерального сырья, Институт горного дела УрО РАН, Екатеринбург, Россия, ukr07@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Titov R. S., senior researcher, Quality management sector, Institute of Mining of Ural branch of RAS, Ekaterinburg, Russia, ukr07@mail.ru.

Получена редакцией 15.12.2020; получена после рецензии 02.03.2021; принята к печати 10.04.2021.

Received by the editors 15.12.2020; received after the review 02.03.2021; accepted for printing 10.04.2021.

