

# Определение возможности разделения титаномагнетита и ильменита при селективной сепарации титаномагнетитовых руд

Елена Александровна ГОРБАТОВА<sup>1\*</sup>,  
Борис Иванович ПИРОГОВ<sup>1\*\*</sup>,  
Мария Сергеевна КОЛКОВА<sup>2\*\*\*</sup>,  
Оксана Сергеевна КОЛЕСАТОВА<sup>3,4\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н. М. Федоровского, Россия, Москва

<sup>2</sup>Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, Россия, Магнитогорск

<sup>3</sup>Уральский государственный горный университет, Россия, Екатеринбург

<sup>4</sup>Технический университет УГМК, Россия, Свердловская область, Верхняя Пышма

## Аннотация

**Актуальность работы.** Опыт освоения железо-титановых руд показал, что их переработка возможна только с применением сложных комбинированных схем обогащения. На примере измененных вкрапленных титаномагнетитовых руд Медведевского месторождения рассмотрена возможность селективного выделения титаномагнетитового и ильменитового продуктов на стадии магнитной (электромагнитной) сепарации.

**Цель исследований** – определение возможности разделения микроагрегатов титаномагнетита и ильменита при селективной магнитной (электромагнитной) сепарации вкрапленных титаномагнетитовых руд.

**Методы проведения исследований титаномагнетитовых руд:** классификация дробленого материала с последующим его фракционированием по магнитным (электромагнитным) свойствам; анализ распределения железа магнетитового и диоксида титана и выявление характера раскрытия рудных и нерудных минералов с позиций технологической минералогии.

**Результат исследований.** Продукты магнитной (электромагнитной) сепарации классифицированной руды характеризуются неравномерным распределением. Большая часть материала (45,01 %) сконцентрирована во фракциях, выделенных при напряженности магнитного поля более 250 мТл. Магнитная фракция составила 2,89 %. Высокое содержание Fe<sub>магн</sub> характерно для продуктов магнитной сепарации титаномагнетитовой руды, полученных при значении напряжения магнитного поля, равном 10 мТл. Диоксид титана большей частью концентрируется в продуктах электромагнитной сепарации, выделенных при напряжении магнитного поля, равном 140 мТл. Исследованиями установлено, что продукты, полученные при напряжении магнитного поля 10 мТл, сложены на 37 % титаномагнетитовыми агрегатами разной степени мартитизации. С повышением значения напряженности магнитного поля в продуктах электромагнитной сепарации уменьшается количество зерен титаномагнетита и возрастает содержание зерен ильменита. Так, при напряжении магнитного поля 140 мТл свободные зерна (55 %) в основном сложены ильменитом.

**Выводы.** Анализ продуктов магнитной сепарации показал, что при напряженности магнитного поля 10 мТл возможно получение продукта существенно титаномагнетитового состава, а при 140 мТл – ильменитового.

**Ключевые слова:** титаномагнетитовые руды, сухая магнитная сепарация, титаномагнетит, магнетит, ильменит, гематит, напряженность магнитного поля.

## Введение

Высокотитанистые (титаномагнетитовые, ильменит-титаномагнетитовые) руды магматогенного происхождения с различным характером наложенных процессов минералообразования – амфиболизации, хлоритизации, сосюритизации и мартитизации – отличаются сложным строением и минеральным составом, обуславливающими их высокую степень гетерогенности и определяющими поведение минеральных агрегатов в процессах магнитной (электромагнитной) сепарации [1–6].

Объектом исследования являлась вкрапленная титаномагнетитовая руда Медведевского месторождения, представляющая собой меланократовый амфиболизированный габбро-норит. Текстура руды – вкрапленная, обусловленная равномерным распределением моно- или

✉ [lana\\_gorbatova@mail.ru](mailto:lana_gorbatova@mail.ru)

 <https://orcid.org/0000-0003-4251-2381>

\*\* [pirogov\\_bi@inbox.ru](mailto:pirogov_bi@inbox.ru)

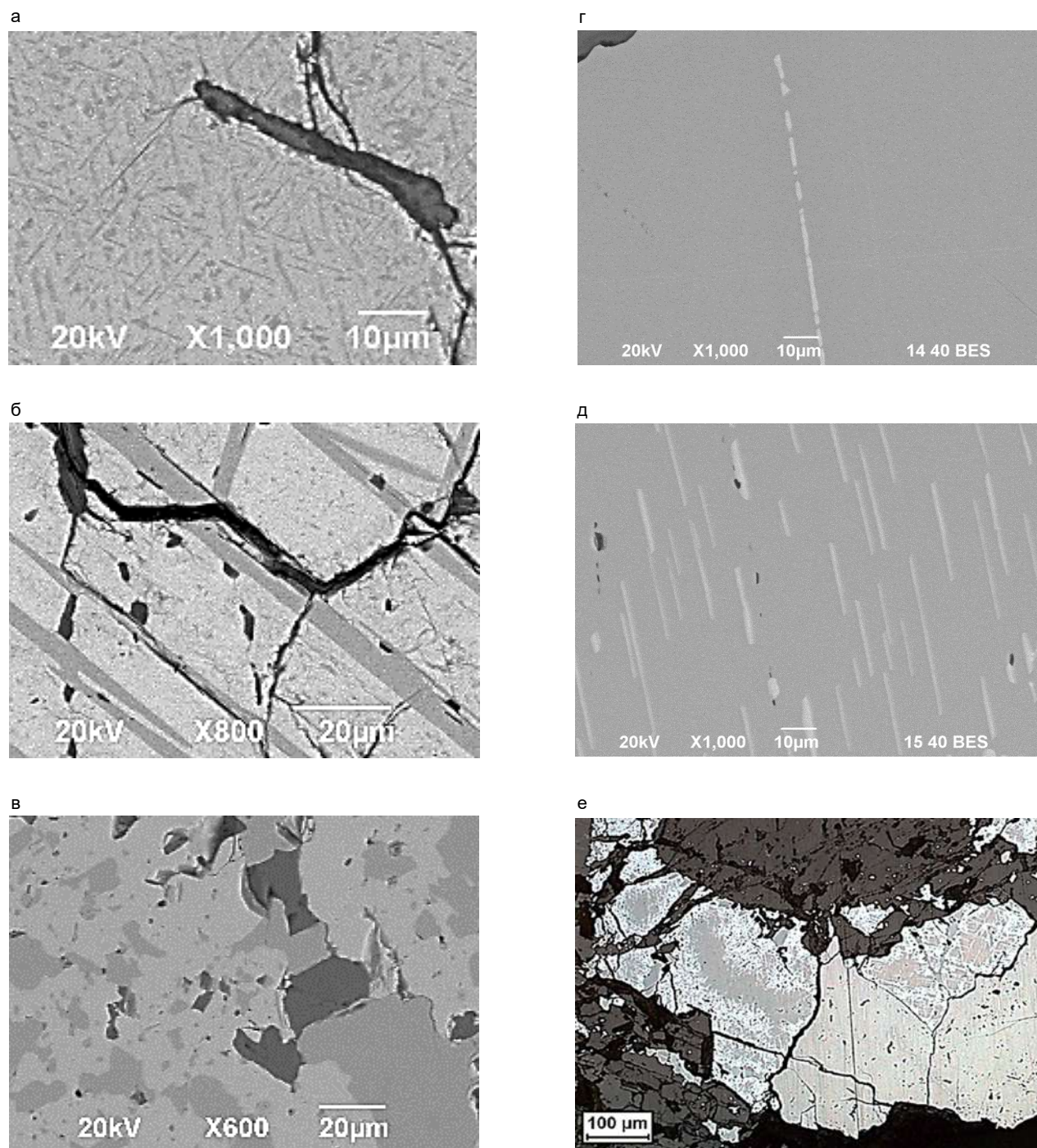
 <https://orcid.org/0000-0002-2528-3022>

\*\*\* [sibra115@bk.ru](mailto:sibra115@bk.ru)

 <https://orcid.org/0000-0001-5667-1629>

\*\*\*\* [okolesatova@mail.ru](mailto:okolesatova@mail.ru)

 <https://orcid.org/0000-0002-9307-9779>



**Рисунок 1.** Структуры рудных агрегатов. Продукты распада твердого раствора ряда магнетит–ильменит с формированием паркетного (а) и тонкорешчатого (б) строения, сегрегационных обособлений (в); продукты распада твердого раствора ряда ильменит–гематит с формированием отдельных пластин гематита в ильмените (г) и гемоильменита (д); структура замещения магнетита гематитом (е). Изображение в отраженных электронах (а–д). Отраженный свет, николи параллельны (е).

**Figure 1.** Ore aggregate structures. The decomposition products of a solid solution of a magnetite–ilmenite series with the formation of parquet (a) and fine-lattice (b) structures, segregations (c); the decomposition products of a solid solution of the ilmenite–hematite series with the formation of separate plates of hematite in ilmenite (g) and hemo-ilmenite (e); substitution structure of magnetite with hematite (e). Image in reflected electrons (a–d). Reflected light, parallel nicols (e).

полиминеральных агрегатов титаномагнетита и ильменита в породе. Структура руды по размерам зерен мелко- и среднезернистая [7–10].

Минеральный состав изучаемой вкрапленной титаномагнетитовой руды представлен нерудными минералами, в основном амфиболом (74 %), хлоритом (7 %), эпидотом (7 %), плагиоклазом (6 %), кварцем (2 %) и рудными

(4 %) – ильменитом, магнетитом, титаномагнетитом, гематитом и пиритом.

Этапы формирования и преобразования руды четко отражаются в существующих природных минеральных ассоциациях. Для вкрапленных руд преобладающими являются рудно-силикатные и силикатно-рудные ассоциации, характеризующиеся сидеронитовым и (или)

интерстиционным строением. Данные структуры выражены в межзерновом расположении рудных минералов, в развитии ровных поверхностей границ их сростаний с частичным проникновением друг в друга, что положительно влияет на разделение минеральных агрегатов титаномагнетита и ильменита с редкими включениями силикатов и на последующее их выделение в грубый концентрат.

Для рудных микроагрегатов характерны структуры распада твердых растворов (магнетит–ильменит, гематит–ильменит) (рис. 1).

В исследуемых рудах титаномагнетит представлен большей частью продуктами распада твердых растворов  $Fe_3O_4-FeTiO_3$ . Продукты распада отличаются морфологией и размерами выделений ильменита, а также пространственным его расположением в магнетите. Различают следующие структуры: паркетную, тонкорешетчатую и сегрегационного обособления. Паркетная структура представлена пластинками ильменита, ориентированными параллельно граням гексаэдра (100) и октаэдра (111) (рис. 1, а), возможно, фиксирующими разные этапы структур распада [11].

Длина пластинок ильменита достигает 10–12 мкм при ширине 1–2 мкм. Тонкорешетчатая структура – пластинки ильменита расположены параллельно граням октаэдра (111) магнетита в виде табличек по (0001). Ширина пластинок 4–10 мкм (рис. 1, б). Особенности морфологии выделений и сложные структуры прорастания магнетита и ильменита предопределяют низкую степень их раскрытия при обогащении.

Существенно изменяются морфология и размеры сегрегационных обособлений от укрупненных зерен (размером до 50 мкм), незакономерно расположенных в магнетите и в межзерновом пространстве до ксеноморфных выделений в полостях трещин (рис. 1, в). Следует отметить, что более крупные выделения минерала при дроблении и измельчении руды будут высвобождаваться в значительной степени.

Продукты распада  $FeTiO_3-Fe_2O_3$  представлены единичными пластинками гематита или их сериями параллельно ориентированными гранями пинакоида {0001} ильменита. Обилие и мощность пластинок сильноизменчивы, что обусловлено, вероятно, стадийностью проявления распада твердых растворов с образованием двух и более

разновидностей гематита (рис. 1, г, д).

В процессе постагматических преобразований по-разному проявляются изменения в силикатной и рудной составляющих. Преобразования в силикатной части отмечаются проявлением структур изменения – ситовидных, замещения. Такое измененное и трещиноватое состояние силикатов приводит к их переизмельчению и ошламованию дробленой руды.

Структуры растворения связаны с частичным или полным замещением в титаномагнетите магнетитовой основной массы актинолитом, сине-зеленой роговой обманкой, хлоритом и биотитом. Ильменитовые включения при этом выделяются в свободном виде, образуя облачковые скопления мелких зерен, повторяющие контуры исходного зерна титаномагнетита. Таким образом, происходит очищение от магнетита породы и руды с увеличением количества свободного ильменита.

Микроагрегаты титаномагнетита подвержены мартитизации, что выражается в частичном или полном замещении магнетита гематитом. По периферии зерен магнетита и по трещинкам четко фиксируется развитие гематита с постепенным его проникновением внутрь зерна (рис. 1, е), что приводит к снижению значений удельной магнитной восприимчивости и изменению поведения мартитизированного титаномагнетита в процессе магнитной сепарации.

#### Метод проведения работы

Исследование железо-титановых руд включало следующие операции: классификацию дробленого материала с последующим его фракционированием по магнитным (электромагнитным) свойствам [12–15].

После обесшламливания дробленую руду (класс крупности более 0,044 мм) подвергали рассеву способом всухую на стандартном наборе сит: –1,0+0,5 мм; –0,5+0,25 мм; –0,25+0,125 мм; –0,125+0,071 мм; –0,071+0,044 мм.

Фракционирование классифицированного материала по магнитным (электромагнитным) свойствам осуществлялось в разных классах крупности на электромагнитном индукционно-роликовом сепараторе 138Т-СЭМ при значениях напряженности магнитного поля 10, 85, 140, 250, 400 мТл.

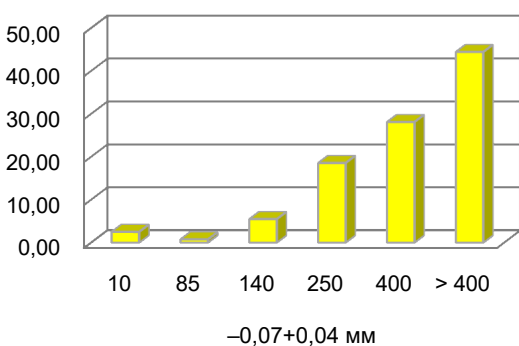
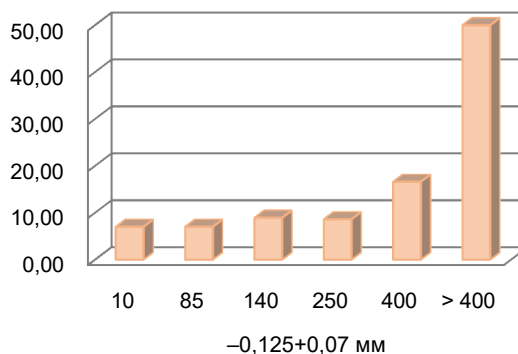
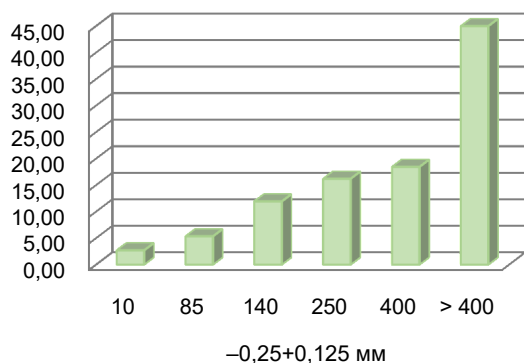
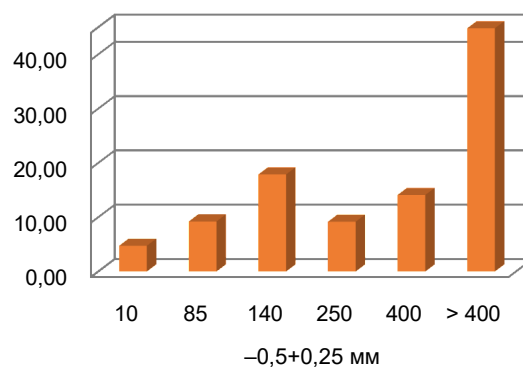
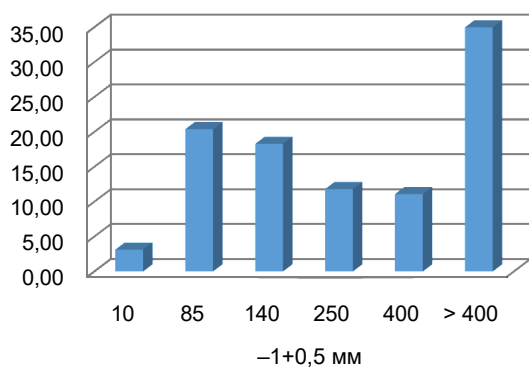
В полученных продуктах проанализировано распределение железа магнетитового и диоксида титана, а также выявлен характер раскрытия рудных и нерудных минералов.

**Таблица 1. Результаты магнитной (электромагнитной) сепарации дробленой руды, полученные при разных значениях напряженности магнитного поля, мТл.**

**Table 1. The results of the magnetic (electromagnetic) separation of crushed ore, obtained at different values of the magnetic field strength, mT.**

| Класс крупности, мм | Выход класса крупности, % | Выход продуктов сепарации, % |       |       |       |       |       |
|---------------------|---------------------------|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                     |                           | 10                           | 85    | 140   | 250   | 400   | > 400 |
| –1+0,5              | 72,49                     | 2,28                         | 14,79 | 13,26 | 8,57  | 8,05  | 25,54 |
| –0,5+0,25           | 5,83                      | 0,28                         | 0,54  | 1,04  | 0,54  | 0,82  | 2,61  |
| –0,25+0,125         | 3,56                      | 0,10                         | 0,19  | 0,42  | 0,58  | 0,66  | 1,61  |
| –0,125+0,071        | 0,66                      | 0,05                         | 0,04  | 0,06  | 0,06  | 0,11  | 0,34  |
| –0,071+0,044        | 7,26                      | 0,18                         | 0,06  | 0,40  | 1,35  | 2,04  | 3,23  |
| Итого               | 89,80                     | 2,89                         | 15,62 | 15,18 | 11,10 | 11,68 | 33,33 |





**Рисунок 2. Распределение продуктов электромагнитной сепарации дробленой вкрапленной титаномагнетитовой руды, полученных при разных значениях напряженности магнитного поля в разных классах крупности.**

**Figure 2. Distribution of electromagnetic separation products of crushed disseminated titanomagnetite ore obtained at different values of the magnetic field in different particle sizes.**

### Результаты работы

Продукты магнитной (электромагнитной) сепарации классифицированной руды, приведенные в табл. 1, характеризуются неравномерным распределением. Большая часть материала (45,01 %) сконцентрирована во фракциях, выделенных при напряженности магнитного поля более 250 мТл. Магнитная фракция составила 2,89 %.

Распределение продуктов магнитной (электромагнитной) сепарации дробленой вкрапленной титаномагнетитовой руды в рамках гранулометрического спектра характеризуется левосторонней асимметрией (рис. 2). В классах крупности  $-1+0,5$  мм,  $-0,5+0,25$  мм и  $-0,25+0,125$  мм наблюдаются четко выраженные пики, отражающие повышение количества продуктов сепарации при значениях напряженности магнитного поля 140 и более 250 мТл. Такое распределение обусловлено гетерогенным строением микроагрегатов рудных и нерудных минералов в крупных классах крупности. При понижении тонины помола фиксируется плавное изменение распределения продуктов магнитной (электромагнитной) сепарации, что наглядно

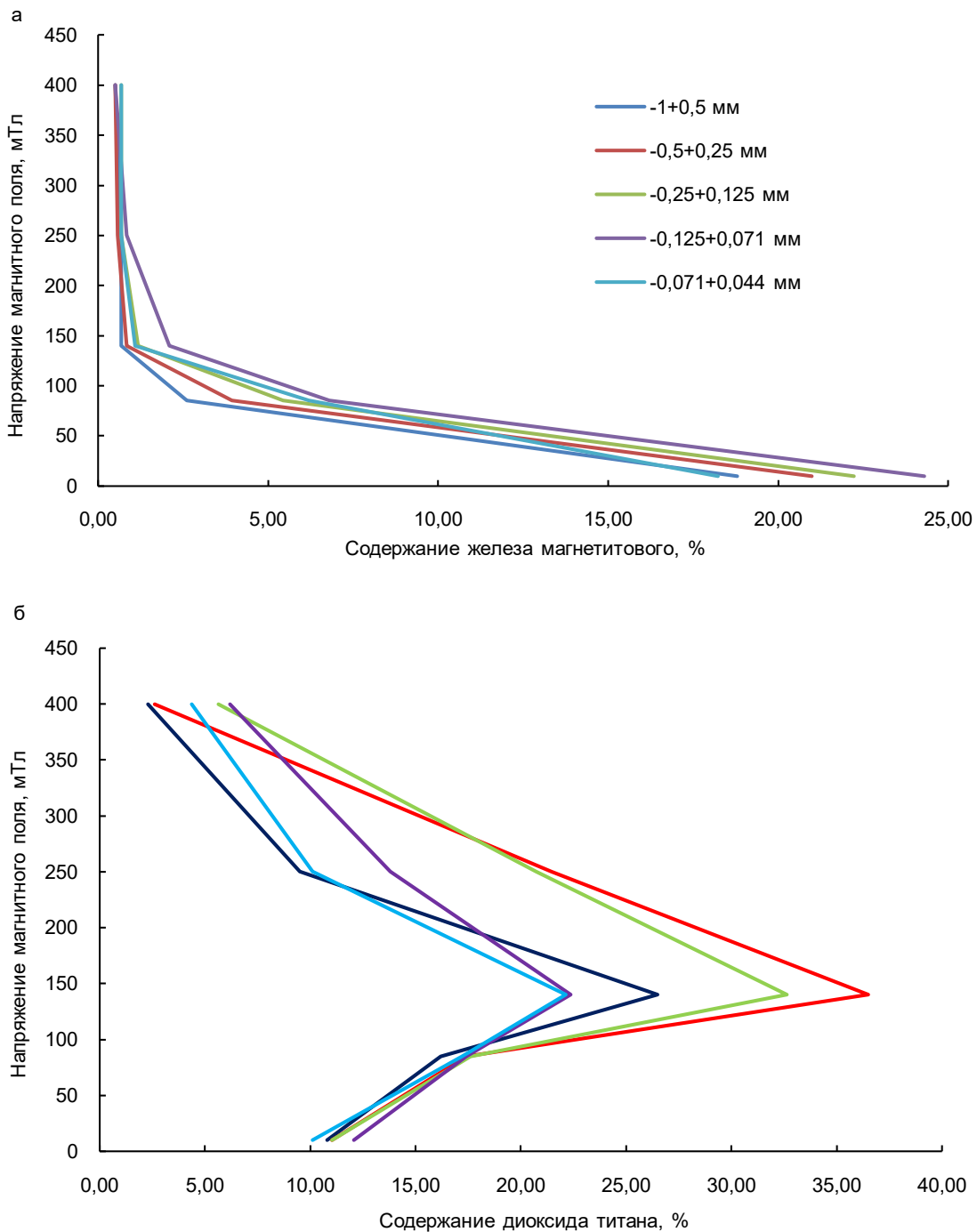
демонстрирует высокую степень раскрытия микроагрегатов рудных и нерудных минералов.

Установлено, что высокое содержание  $Fe_{\text{магн}}$  характерно для продуктов магнитной (электромагнитной) сепарации титаномагнетитовой руды, полученных при значении напряжения магнитного поля равного 10 мТл (рис. 3, а).

С понижением класса крупности содержание железа магнетитового увеличивается с 18,80 до 24,30 %, максимум достигается в классе крупности  $-0,125+0,071$  мм. Увеличение напряженности магнитного поля приводит к снижению содержания  $Fe_{\text{магн}}$  до 1% в продуктах электромагнитной сепарации.

Диоксид титана большей частью концентрируется в продуктах электромагнитной сепарации (рис. 3, б), выделенных при напряжении магнитного поля равном 140 мТл в классе крупности  $-0,5+0,25$  мм.

Распределение железа магнетитового и диоксида титана четко сопоставляется с минеральным составом продуктов сепарации и характером раскрытия рудных и нерудных микроагрегатов (табл. 2, рис. 4).



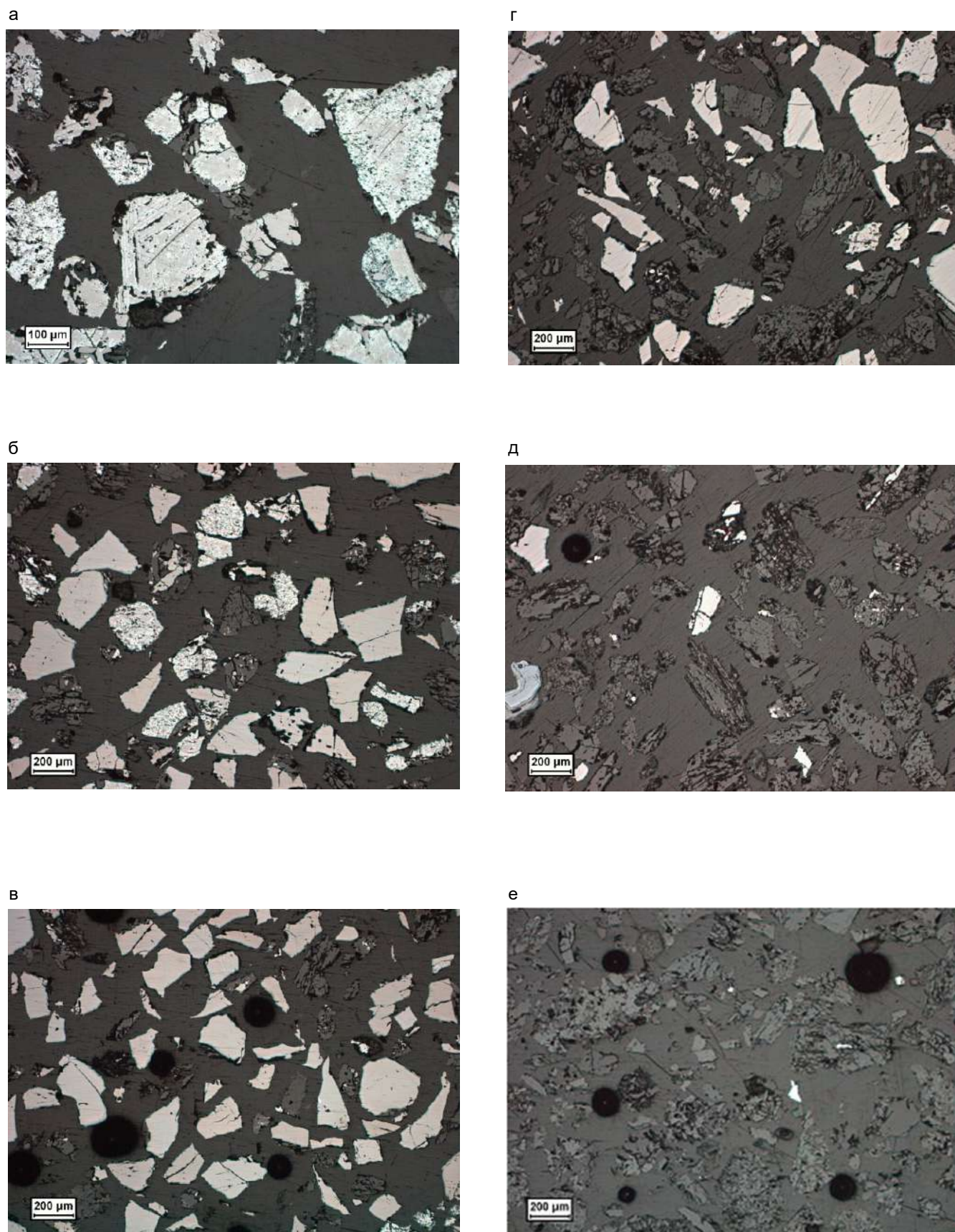
**Рисунок 3. Содержание железа магнетитового (а) и диоксида титана (б) в продуктах магнитной (электромагнитной) сепарации дробленой титаномагнетитовой руды в гранулометрическом спектре.**  
**Figure 3. The content of magnetite iron (a) and titanium dioxide (b) in the products of magnetic (electromagnetic) separation of crushed titanomagnetite ore in the particle size spectrum.**

Анализ раскрытия минеральных сростков дробленой титаномагнетитовой руды на примере класса крупности  $-0,5+0,25$  мм показывает, что при напряженности магнитного поля 10 мТл свободные зерна составляют 37 % (табл. 2) и представлены обломками титаномагнетитовых агрегатов с разной степенью мартитизации магнетита (рис. 4, а).

С повышением значения напряженности магнитного поля в продуктах магнитной (электромагнитной) сепарации уменьшается количество зерен титаномагнетита и

возрастает содержание зерен ильменита (рис. 4, б). Так, при  $H = 140$  мТл свободные зерна (55 %) в основном сложены ильменитом (рис. 4, в).

В немагнитной фракции (полученной при напряженности магнитного поля более 400 мТл) наблюдаются единичные зерна рудных минералов (ильменита, пирита, гетита), что объясняется погрешностью фракционирования дробленой руды, состоящей из обломков минеральных агрегатов разной удельной магнитной восприимчивости (рис. 4, е).



**Рисунок 4.** Характер особенностей раскрытия рудных минералов класса крупности  $-0,5+0,25$  мм магнитных (электромагнитных) фракций, полученных при напряженности магнитного поля мТл. а – 10; б – 85; в – 140; г – 250; д – 400; е – более 400. Отраженный свет, николи параллельны.

**Figure 4.** Character of the disclosure features of ore minerals with particle size of  $-0.5+0.25$  mm of magnetic (electromagnetic) fractions obtained at a magnetic field strength of mT. а – 10; б – 85; в – 140; г – 250; д – 400; е – more than 400. Reflected light, parallel nicols.



**Таблица 2. Распределение свободных зерен и микроагрегатов в продуктах магнитной (электромагнитной) сепарации, полученных при разных значениях напряженности магнитного поля, отн. %.****Table 2. Distribution of free grains and microaggregates in the products of magnetic (electromagnetic) separation obtained at different values of the magnetic field, rel. %.**

| Тип сростков             | Напряженность магнитного поля, мТл |     |     |     |     |       |
|--------------------------|------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-------|
|                          | 10                                 | 85  | 140 | 250 | 400 | > 400 |
| Свободные рудные зерна   | 37                                 | 29  | 55  | 36  | 13  | 1     |
| Богатые сростки          | 10                                 | 3   | 3   | 8   | 2   | 0     |
| Рядовые сростки          | 34                                 | 47  | 18  | 10  | 4   | 0     |
| Бедные сростки           | 8                                  | 5   | 4   | 3   | 2   | 0     |
| Свободные нерудные зерна | 10                                 | 16  | 19  | 44  | 80  | 99    |
| <i>Итого</i>             | 100                                | 100 | 100 | 100 | 100 | 100   |

Примечание:

– содержание рудных минералов (ильменита, магнетита) в свободных зернах – 96-100%, в богатых сростках – 71-95 %, в рядовых сростках – 31-70 %, в бедных сростках – 6-30 %, в свободных нерудных зернах – 0-5 %;

– свободные рудные зерна представлены микроагрегатами мартитизированного титаномагнетита и (или) ильменита;

– свободные нерудные зерна сложены силикатами.

### Выводы

Особенности строения и состава высокотитанистой вкрапленной руды Медведевского месторождения обусловлены многостадийностью ее формирования, что определяет различное поведение рудных минералов и микроагрегатов – ильменита, магнетита и титаномагнетита в магнитном поле в процессе магнитной (электромагнитной) сепарации.

Продукты магнитной (электромагнитной) сепарации классифицированной руды характеризуются неравномерным распределением. Большая часть материала (45,01 %) сконцентрирована во фракциях, выделенных при напряженности магнитного поля более 250 мТл. Магнитная фракция составила 2,89 %.

Высокое содержание  $Fe_{\text{магн}}$  характерно для продуктов магнитной сепарации титаномагнетитовой руды,

полученных при значении напряжения магнитного поля, равном 10 мТл. Максимум (24,30 %) достигается в классе крупности  $-0,125+0,071$  мм. Диоксид титана большей частью концентрируется в продуктах электромагнитной сепарации, выделенных при напряжении магнитного поля, равном 140 мТл, в классе крупности  $-0,5+0,25$  мм и составляет 36,50 %.

Исследованиями установлено, что продукты, полученные при  $H = 10$  мТл, сложены на 37 % титаномагнетитовыми агрегатами разной степени мартитизации. С повышением значения напряженности магнитного поля в продуктах электромагнитной сепарации уменьшается количество зерен титаномагнетита и возрастает содержание зерен ильменита. Так, при  $H = 140$  мТл свободные зерна (55 %) в основном сложены ильменитом.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Газалеева Г. И., Шихтов Н. В., Сопина Н. А., Мушкетов А. А. Современные тенденции переработки титаносодержащих руд // Черная металлургия. 2015. Вып. 12. С. 30–36.
2. Газалеева Г. И., Мушкетов А. А., Сопина Н. А. Проблемы снижения содержания титана в обогащительных и металлургических переделах при переработке титаномагнетитов // Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР: труды науч.-практ. конф. с междунар. участием и элементами школы для молодых ученых (2–4 окт. 2013 г.). Екатеринбург, 2013. С. 375–380.
3. Резниченко В. А., Броницкая Е. В., Аверин В. В. Титанаты. Научные основы, технология, производство. М.: Наука, 2013. 267 с.
4. Пирогов Б. И., Быстров И. Г. Минералого-технологические особенности неоднородности титаномагнетитов РФ и методы их оценки // Рациональное недропользование: сб. науч. трудов IX Всерос. семинара по технологической минералогии / под ред. С. Е. Гавришева. Магнитогорск: Изд-во МГТУ, 2014. С. 180–187.
5. Пирогов Б. И., Броницкая Е. С., Астахова Ю. М., Волков Е. С. Особенности вещественного состава титаномагнетитовых руд магматического генезиса, определяющие их обогатимость // Разведка и охрана недр. 2013. № 2. С. 47–51.
6. Быстров И. Г. Титаномагнетит как объект технологической минералогии // Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых: сб. материалов IX междунар. молодеж. науч. школы. М.: ИПКОН РАН, 2013. С. 251–254.
7. Холоднов В. В., Бочарникова Т. Д., Шагалов Е. С. Состав, возраст и генезис магнетит-ильменитовых руд среднерифейского стратифицированного Медведевского массива (Кусинско-Копанский комплекс Южного Урала) // Литосфера. 2012. № 5. С. 145–165.
8. Холоднов В. В., Шагалов Е. С., Бочарникова Т. Д., Коновалова Е. В. Состав и условия формирования Ti-Fe-V оруденения в двупироксеновом габбро Медведевского месторождения (Южный Урал). Ч. II. Стадийность рудообразования как результат эволюции рудоносного расплава // Литосфера. 2016. № 2. С. 48–69.
9. Бочарникова Т. Д., Холоднов В. В., Шагалов Е. С. Состав минералов (апатит, магнетит, ильменит и др.) как отражение процессов формирования рудных тел и расслоенности в Кусинской габбровой интрузии (Южный Урал) // Литосфера. 2019. Т. 19, № 4. С. 533–557.
10. Пахомов Ф. П., Тигунов Л. П., Быховский Л. З. Титаномагнетитовые месторождения России: минерально-сырьевая база, перспективы освоения и комплексного использования. М.: ВИМС, 2010. 138 с.
11. Горбатова Е. А., Шавакулева О. П., Колкова М. С., Чернов Д. В. Анализ раскрываемости минералов ильменитовых руд Медведевского месторождения в процессе их дезинтеграции // ГИАБ. 2014. № S2-4. С. 43–51.
12. Jena B. C., Dresler W., Reilly I. G. Extraction of titanium, vanadium and iron from titanomagnetite deposits at pipestone lake, Manitoba, Canada // Minerals Engineering. 1995. Vol. 8, issues 1–2, January–February. P. 159–168. [https://doi.org/10.1016/0892-6875\(94\)00110-X](https://doi.org/10.1016/0892-6875(94)00110-X)
13. NRRRI Technical Report / Pilot-Scale Demonstration of Ilmenite Processing Technology, May 2017. 165 p.

14. 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. <https://doi.org/10.3390/min7110220>
15. 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. <https://dx.doi.org/10.22044/jme.2016.661>

*Статья поступила в редакцию 17 января 2020 года*



# Determination of the possibility of separation of titanomagnetite and ilmenite in the selective separation of titanomagnetite ores

Elena Aleksandrovna GORBATOVA<sup>1\*</sup>,  
Boris Ivanovich PIROGOV<sup>1\*\*</sup>,  
Mariya Sergeevna KOLKOVA<sup>2\*\*\*</sup>,  
Oksana Sergeevna KOLESATOVA<sup>3,4\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>All-Russian Scientific-Research Institute of Mineral Resources named after N. M. Fedorovsky, Magnitogorsk, Russia

<sup>2</sup>Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

<sup>3</sup>Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia

<sup>4</sup>Technical University of UMMC, Verkhnyaya Pyshma, Sverdlovskaya Oblast', Russia

## Annotation

Experience in the development of iron-titanium ores has shown that their successful processing is possible only with the use of complex combined processing schemes. The possibility of selective extraction of titanomagnetite and ilmenite products during magnetic (electromagnetic) separation is considered during processing of altered disseminated titanomagnetite ores of the Medvedevsky deposit.

**Purpose of the research** is to determine the possibility of separation of microaggregates of titanomagnetite and ilmenite during selective magnetic (electromagnetic) separation of disseminated titanomagnetite ores.

**Materials and methods.** Classification of crushed material with its subsequent separation by magnetic (electromagnetic) properties. Analysis of the distribution of iron and titanium dioxide and the identification of the nature of the disclosure of ore and non-metallic minerals from the standpoint of technological mineralogy.

**Results.** Products of classified ore after magnetic (electromagnetic) separation are characterized by uneven distribution. Most of the material (45,01%) is concentrated in fractions separated at a magnetic field with strength of more than 250 mT. The yield of magnetic fraction is 2,89%. A high content of Fe<sup>magnetic</sup> is characteristically for the products of magnetic separation of titanomagnetite ore obtained at the magnetic field with strength of 10 mT. Generally, titanium dioxide is concentrated in the products of electromagnetic separation separated at a magnetic field with strength of 140 mT. Studies have established that the products obtained at  $H = 10$  mT consist of 37% titanomagnetite aggregates of varying degrees of martitization. With increasing of magnetic field strength, the number of titanomagnetite grains decreases and the content of ilmenite grains increases in the products of electromagnetic separation. In this case at  $H = 140$  mT, free grains (55%) are mainly consist of ilmenite.

**Conclusions.** Analysis of the magnetic separation products showed that with a magnetic field strength of 10 mT it is possible to obtain a product with mainly titanomagnetite composition, and it is possible to obtain a product with mainly ilmenite composition with a magnetic field strength of 140 mT.

**Keywords:** titanomagnetite ores, dry magnetic separation, titanomagnetite, magnetite, ilmenite, hematite, magnetic field strength.

## REFERENCES

1. Gazaleeva G. I., Shikhtov N. V., Sopina N. A., Mushketov A. A. Modern trends in the processing of titanium-containing ores // Iron and Steel. 2015. Issue. 12. P. 30–36.
2. Gazaleeva G. I., Mushketov A. A., Sopina N. A. Problems of reducing the titanium content in ore processing and metallurgical processes during the processing of titanomagnetites // Prospects for the development of metallurgy and mechanical engineering using completed basic research and R&D: Conference with international participation and elements of a school for young scientists. October 2–4. Ekaterinburg, 2013. P. 375–380.
3. Reznichenko V. A., Olyunina T. V., Averin V. V. Titanates. Scientific foundations, technology, production. Moscow: Science, 2013. 267 p.
4. Pirogov B. I., Bystrov I. G. Mineralogical and technological features of the heterogeneity of titanomagnetites of the Russian Federation and methods for their assessment // IX All-Russian Seminar on Technological Mineralogy / Editor S. E. Gavrishev. Magnitogorsk, 2014. P. 180–187.
5. Pirogov B. I., Bronitskaya E. S., Astakhova Yu. M., Volkov E. S. Features of the material composition of titanomagnetite ores of magmatic origin, determining their processing // Exploration and protection of mineral resources. 2013. № 2. P. 47–51.
6. Bystrov I. G. Titanomagnetite as an object of technological mineralogy // Problems of subsurface development in the 21<sup>st</sup> century through the eyes of young people: Collection of materials of intellectual scientific youth school № IX. Moscow: IPKON RAS, 2013. P. 251–254.
7. Kholodnov V. V., Bocharnikova T. D., Shagalov E. S. Composition, age and genesis of magnetite-ilmenite ores of the middle Riphean stratified Medvedev massif (Kusinsko-Kopansky complex of the Southern Urals) // Lithosphere. 2012. № 5. P. 145–165.

✉ [lena\\_gorbatova@mail.ru](mailto:lena_gorbatova@mail.ru)

 <https://orcid.org/0000-0003-4251-2381>


\*\* [pirogov\\_bi@inbox.ru](mailto:pirogov_bi@inbox.ru)

 <https://orcid.org/0000-0002-2528-3022>

\*\*\* [sibra115@bk.ru](mailto:sibra115@bk.ru)

 <https://orcid.org/0000-0001-5667-1629>

\*\*\*\* [okolesatova@mail.ru](mailto:okolesatova@mail.ru)

 <https://orcid.org/0000-0002-9307-9779>

8. Kholodnov V. V., Bocharnikova T. D., Shagalov E. S. Composition, age and genesis of magnetite-ilmenite ores of the middle Riphean stratified Medvedevsky deposit (Kusinsko-Kopansky complex of the Southern Urals). Part. II. Staging of ore formation as a result of the evolution of an ore-bearing melt // *Lithosphere*. 2012. № 2. P. 48–69.
9. Bocharnikova T. D., Kholodnov V. V., Shagalov E. S. The composition of minerals (apatite, magnetite, ilmenite, etc.) as a reflection of the processes of formation of ore bodies and stratification in the Kusinsky gabbro intrusion (Southern Urals) // *Lithosphere*. 2019. Vol. 19. № 4. P. 553–557.
10. Pakhomov F. P., Tiginov L. P., Bykhovsky L. Z. Titanomagnetite deposits in Russia: mineral resource base, development prospects and integrated use. Moscow: SIMS, 2010. 138 p.
11. Gorbatova E. A., Shavakuleva O. P., Kolkova M. S., Chernov D. V. Analysis of the disclosure of minerals of ilmenite ores of the Medvedevsky deposit in the process of their disintegration // *GIAB*. 2014. № S2-4. P. 43–51.
12. Jena B. C., Dresler I. G. Reilly Extraction of titanium, vanadium and iron from titanomagnetite deposits at pipestone lake, Manitoba, Canada // *Minerals Engineering*. 1995. Vol. 8, issues 1–2, January – February. P. 159–168. [https://doi.org/10.1016/0892-6875\(94\)00110-X](https://doi.org/10.1016/0892-6875(94)00110-X)
13. NRRRI Technical Report. Pilot-Scale Demonstration of Ilmenite Processing Technology, May 2017. 165 p.
14. Wen Yu, Xiaojin Wen, Jiangan Chen, Jingzhong Kuang, Qiongyao Tang, Yuechao Tian, Jiali Fu, Weiqin Huang and Tingsheng Qiu. Preparation of Direct Reduced Iron and Titanium Nitride from Panzhihua Titanomagnetite Concentrate through Carbothermic Reduction-Magnetic Separation // *Minerals*. 2017. Vol. 7. P. 1–10. <https://doi.org/10.3390/min7110220>
15. Mineralogical and physical beneficiation studies for iron extraction from Bardaskan titanomagnetite deposit // *Journal of Mining & Environment*. 2017. Vol. 8, № 2. P. 191–201. <https://dx.doi.org/10.22044/jme.2016.661>

*The article was received on January 17, 2020*