

УДК 622.7

**ОСОБЕННОСТИ РАДИАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКОЙ
МАГНЕТИЗАЦИИ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ
И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИ ОБОГАЩЕНИИ**

С. А. Кондратьев, В. И. Ростовцев, И. И. Бакшеева

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: kondr@misd.nsc.ru,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Приведены результаты экспериментальных исследований магнитных свойств железосодержащего сульфидного и несulfидного минерального сырья при радиационно-термической обработке. Установлено, что объемная магнитная восприимчивость для пирита возросла более чем в 100 раз, а для бокситовой руды — почти в 6 раз. Показана возможность использования радиационно-термической модификации для бокситового и оловосодержащего минерального сырья при его переработке.

Минеральное сырье, пирит, бокситы, оловянные продукты, обработка ускоренными электронами, сухая магнитная сепарация

В настоящее время особую актуальность приобрели экономико-экологические проблемы горнодобывающих и перерабатывающих производств, обусловленные тенденциями ухудшения качества добываемого сырья и состояния технологии и организации первичной его переработки. Необходимо отметить, что потери ценных компонентов от добычи руды до получения металла, связанные с процессами обогащения полезных ископаемых, составляют от 10 до 30 % [1].

В этих условиях повышение полноты и комплексности обогащения минерального сырья, внедрение малоотходных, экологически безопасных технологий приобретают первостепенное значение, что и определяет современную стратегию в освоении минерально-сырьевой базы страны. Создаются новые высокоэффективные экологически безопасные процессы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья на основе комбинирования современных методов обогащения, пиро- и гидрометаллургии, использующих дополнительные энергетические воздействия [2].

В нашей стране и за рубежом проявляется все больший интерес к энергетическим воздействиям в виде различных физических полей и их влиянию на свойства горных пород и минералов [3–6]. Происходящие при этом изменения имеют прямую связь с процессами рудоподготовки и обогащения минерального сырья. Раскрытие сущности происходящих явлений в различных минералах при воздействии ускоренных электронов высоких энергий может послужить основой принципиально новых решений по управлению процессами механической обработки полезных ископаемых, направленных в первую очередь на повышение содержания полезных

компонентов в концентрате, снижение потерь в хвостах обогащения, уменьшение материальных и энергетических затрат [3]. При этом открываются возможности более полного использования разрабатываемых недр. Достоинством рассматриваемых энергетических воздействий является то, что в случае их реализации нет необходимости радикально изменять технологические схемы и оборудование обогатительных фабрик. Их существо состоит в определении предмета обработки и оптимальных режимов, при которых происходят целенаправленные изменения каких-либо свойств минерального сырья, а также места в технологической схеме конкретного предприятия для установки источника энергетических воздействий.

В [5] приведены результаты выполненных в ИГД СО РАН исследований по развитию научных основ применения потока ускоренных электронов в процессах подготовки труднообогатимого минерального сырья к обогащению.

Цель настоящих исследований — изучение возможности применения радиационно-термических воздействий для магнетизации железосодержащего сульфидного и несulfидного минерального сырья и перспектив их реализации в процессах сухого магнитного обогащения комплексных руд и техногенного сырья сложного состава.

В сравнении с другими методами, себестоимость магнитной сепарации для кусковых сильномагнитных материалов самая низкая, для мелкодисперсных — вторая после самого дешевого метода винтовой сепарации. Производительность сепараторов для кусковых руд превышает 500 т/ч, для тонкоизмельченных сильномагнитных — 200 т/ч, слабомагнитных — более 40 т/ч. Перспективность магнитного обогащения обуславливается интенсивным развитием производства магнитных материалов и техники образования сильных магнитных полей, параметры которых постоянно улучшаются, а себестоимость обогащения снижается.

При магнитном обогащении на минеральное зерно в неоднородном магнитном поле действует магнитная сила F , которая определяется формулой

$$F = \chi H \text{grad} H,$$

где χ — удельная магнитная восприимчивость; $H \text{grad} H$ — магнитная сила поля.

Различия в магнитных свойствах большинства природных минералов недостаточно велики для их эффективного разделения, что в отдельных случаях снижает технологические показатели обогащения, особенно слабомагнитных руд. Анализ формулы показывает, что для увеличения действующей на частицу магнитной силы F необходимо увеличивать или удельную магнитную восприимчивость полезных минералов χ , или магнитную силу поля, зависящую от напряженности H и градиента магнитного поля $\text{grad} H$.

Повышение χ возможно физическими, физико-химическими и химическими способами обработки материала. В промышленных и лабораторных условиях часто используются процессы изменения объемных и поверхностных магнитных свойств минералов и руд [7]. Один из объемных процессов — обжиг — основан на превращении слабомагнитных железосодержащих минералов в магнитные компоненты (магнетит или γ -гематит) в определенных условиях (окислительная, нейтральная или восстановительная среда) при постоянной температуре. Этот процесс в промышленности является основным для изменения объемных магнитных свойств железосодержащих минералов. При этом главными негативными проблемами считаются: большое энергопотребление, высокая стоимость процесса обжига и загрязнение воздуха.

Второй путь увеличения действующей магнитной силы F — изменение магнитного поля, обеспечивающего увеличение $H \text{grad} H$, что достигается за счет совершенствования конструкции магнитного сепаратора. В [8] описаны преимущества высокоградиентных магнитных сепараторов на постоянных магнитах по сравнению с традиционными сепараторами с медными или

сверхпроводящими катушками. Установлена возможность получения магнитных полей с индукцией от 12 до 35 кГс и градиентом от 10 до 70 кГс/см. Опыт Института ядерной физики СО РАН по реализации постоянных магнитов с $B_g = 10–12$ кГс в ускорителях показал, что устройства, созданные на их базе, работают более 30 лет без замены.

Объекты исследования. В лабораторных экспериментах изучались: пирит — основной сульфидный минерал многих руд, а также оловянные и алюминиевые железосодержащие продукты. В качестве оловянных продуктов исследовались черновой оловянный концентрат, а в качестве алюминиевого — бокситы Вежаю-Ворыквинского месторождения (Средний Тиман, Российская Федерация), содержащие железо как в виде сульфидов, так и в несульфидной форме.

Методы исследования. Исследования выполнялись с помощью рентгенофлуоресцентного анализа (спектрометр ARL.OPTIM'X), рентгеновской дифрактометрии (ДРОН-4), термографии (дериватограф STA 449 F1 Jupiter, сопряженный с квадрупольным масс-спектрометром QMS 403C Aeolos, NETZSCH GmbH). Нагревание образцов проводилось в муфельной печи типа МИМП 10п с программным управлением. Радиационно-термическая обработка осуществлялась пучком ускоренных электронов с энергией 2.4 МэВ на промышленном ускорителе ИЛУ-6 в Институте ядерной физики СО РАН. При этом переменными параметрами были ток пучка и его частота, манипулированием которых достигались требуемые режимы обработки материала. Нагрев минеральных объектов при обработке на ускорителе ИЛУ-6 происходил со скоростью $25^\circ\text{C}/\text{мин}$. Для определения температуры и величины поглощенной дозы использовались стандартные физические методы. Для измерения магнитной восприимчивости исходных и обработанных образцов бокситов применялся измеритель магнитной восприимчивости ИМВ, для сухого магнитного разделения — сепаратор 138СБЭ, обеспечивающий напряженность магнитного поля H до $7.96 \cdot 10^5$ А/м.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Основные результаты исследований по изучению влияния радиационно-термической модификации минеральных образцов на их свойства в процессах переработки, включая магнитную сепарацию, приведены на рис. 1–4 и в табл. 1–3.

На рис. 1 представлена диаграмма режимов увеличения температуры образцов при их радиационно-термической обработке [9].

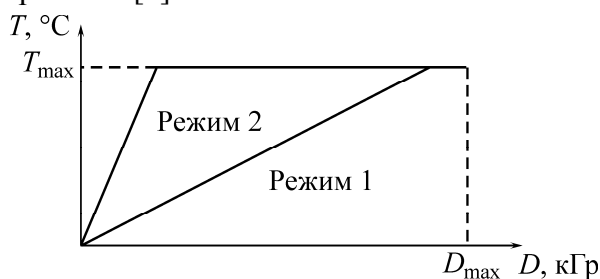


Рис. 1. Схематичная диаграмма двух методов повышения температуры минеральных образцов при их радиационно-термической обработке

При первом режиме температура поднимается медленно и набирается соответствующая доза, а при втором — быстро и доза набирается в условиях заданной температуры. Чтобы снизить показатель рассеивания тепловой энергии до уровня окружающей среды, использовалась специально сконструированная ячейка для сохранения тепла. Во время эксперимента температура облучаемого образца измерялась термопарой и регулировалась контрольной системой ее поддержки. Когда температура образца поднималась до заданного уровня, скорость дозы облуче-

ния автоматически изменялась до уровня, необходимого для стабилизации этой температуры. Нагрев минеральных объектов при обработке на ускорителе ИЛУ-6 осуществлялся со скоростью 25°C/мин в режиме 1.

В табл. 1, 2 показаны результаты исследований магнитных свойств бокситов и пирита при термической обработке.

ТАБЛИЦА 1. Влияние термической обработки на магнитную восприимчивость бокситов

| Условия обработки | | Магнитная восприимчивость | |
|-------------------------------|---------------------|---------------------------|------------------------------|
| Температура, °C | Время выдержки, мин | Объемная, ед. СИ | Удельная, см ³ /г |
| Без обработки | | | |
| — | — | 33.4·10 ⁻⁵ | 8.43·10 ⁻⁵ |
| Обработка в муфельной печи | | | |
| 180 | 60 | 28.55·10 ⁻⁵ | 7.21·10 ⁻⁵ |
| 300 | 60 | 27.85·10 ⁻⁵ | 7.03·10 ⁻⁵ |
| 500 | 60 | 25.44·10 ⁻⁵ | 6.42·10 ⁻⁵ |
| 600 | 60 | 30.73·10 ⁻⁵ | 7.76·10 ⁻⁵ |
| Обработка на ускорителе ИЛУ-6 | | | |
| 200 | 0 | 29.94·10 ⁻⁵ | 7.56·10 ⁻⁵ |
| 200 | 20 | 23.68·10 ⁻⁵ | 5.98·10 ⁻⁵ |
| 300 | 0 | 32.87·10 ⁻⁵ | 8.30·10 ⁻⁵ |
| 300 | 20 | 23.58·10 ⁻⁵ | 5.95·10 ⁻⁵ |
| 500 | 0 | 138.08·10 ⁻⁵ | 34.87·10 ⁻⁵ |
| 600 | 0 | 197.81·10 ⁻⁵ | 49.95·10 ⁻⁵ |

ТАБЛИЦА 2. Влияние радиационно-термической обработки пирита на его магнитную восприимчивость

| Температура, °C | Магнитная восприимчивость | |
|-------------------------------|---------------------------|------------------------------|
| | Объемная, ед. СИ | Удельная, см ³ /г |
| Без обработки | | |
| — | 19.87·10 ⁻⁵ | 3.90·10 ⁻⁵ |
| Обработка на ускорителе ИЛУ-6 | | |
| 400 | 114.80·10 ⁻⁵ | 22.51·10 ⁻⁵ |
| 500 | 5120.78·10 ⁻⁵ | 1004.07·10 ⁻⁵ |
| 600 | 3016.49·10 ⁻⁵ | 591.47·10 ⁻⁵ |

Из приведенных в табл. 1, 2 данных следует, что магнитная восприимчивость бокситов и пирита при термическом воздействии изменяется. Если после термической обработки в муфельной печи она для бокситов уменьшается, то в результате радиационно-термической обработки увеличивается. После нагрева материала до 600°C на ускорителе ИЛУ-6 и последующего естественного охлаждения до комнатной температуры объемная магнитная восприимчивость бокситов составила 197.81·10⁻⁵ ед. СИ, т. е. возросла почти в 6 раз. Что касается пирита, то после его нагрева до 600°C на ускорителе ИЛУ-6 и последующего естественного охлаждения до комнатной температуры объемная магнитная восприимчивость составила 3016.49·10⁻⁵ ед. СИ, т. е. возросла в более чем в 100 раз (3016.49·10⁻⁵/19.87·10⁻⁵ = 151.8).

Для изучения особенностей радиационно-термической обработки пирита и бокситов выполнен рентгеноструктурный анализ (рис. 2–4).

Результаты рентгеноструктурного анализа (рис. 2) показали появление в обработанных пучком ускоренных электронов образцах пирита магнитных фаз в виде Fe_2O_3 , $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ и Fe_3O_4 в разных сочетаниях, тогда как при обычном нагревании фиксируется образование только одной фазы Fe_3O_4 .

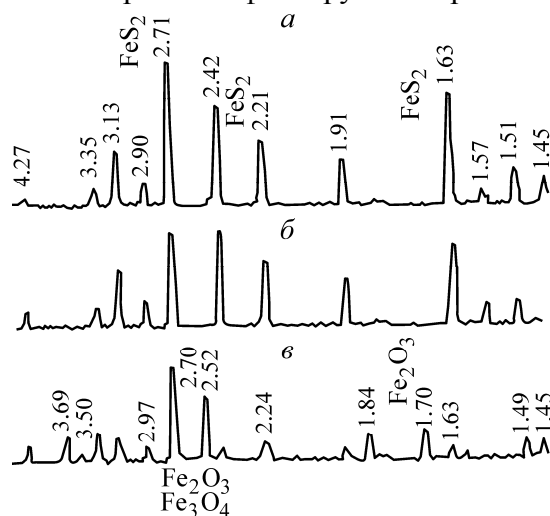


Рис. 2. Рентгенограммы пирита: исходного (а), нагретого в печи до 400°C (б) и обработанного ускоренными электронами в радиационно-термическом режиме до той же температуры (в)

Изменения магнитных свойств минерала определяются протекающими физико-химическими процессами с образованием магнитных фаз. На рентгенограмме исходного пирита FeS_2 (рис. 2а) присутствуют все основные рефлексы минерала. Самые интенсивные с межплоскостными расстояниями $d = 2.71, 2.42$ и 1.63 Å. На дифрактограмме пирита, подвергнутого термической обработке в печи до 400°C (рис. 2б), присутствуют все основные рефлексы минерала и отсутствуют какие-либо другие рефлексы. Для рентгенограммы пирита, подвергнутого радиационно-термической обработке на ускорителе до 400°C (рис. 2в), характерно появление всех основных рефлексов Fe_2O_3 , из которых самые интенсивные с $d = 2.70, 1.69$ и 2.51 Å. Остались очень мало интенсивные рефлексы пирита с $d = 1.63$ и 2.42 Å.

С целью определения фазового состава исходной пробы бокситов и изучения влияния радиационно-термической обработки на ее свойства выполнен рентгенофазовый анализ. Анализ рентгенограммы исходного боксита, приведенной на рис. 3, показывает, что основными минеральными компонентами исходных бокситов являются бемит, гетит и гематит, а в виде примеси присутствуют рутил и анатаз.

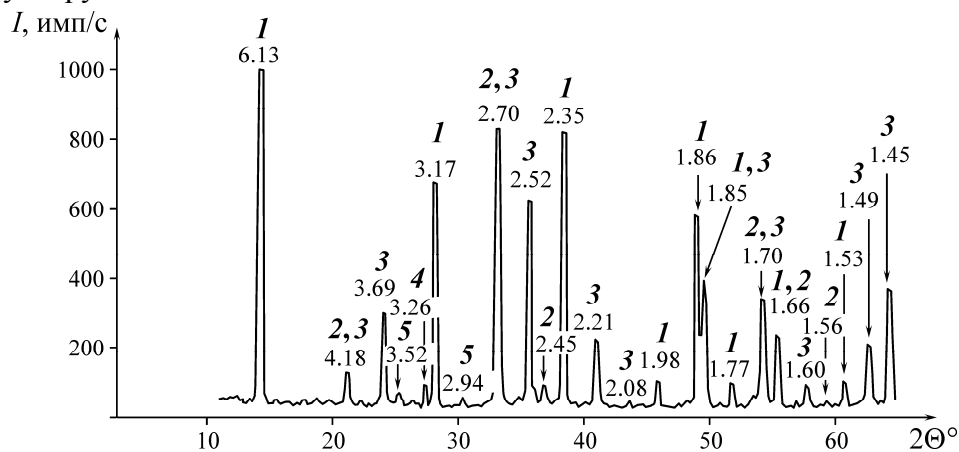


Рис. 3. Рентгеновская дифрактограмма исходного образца боксита. Минералы: 1 — бемит; 2 — гетит; 3 — гематит; 4 — рутил; 5 — анатаз

Согласно рис. 4, нагревание образца исходного боксита в сочетании с облучением приводит к кардинально иным результатам, чем обычное нагревание. В этом случае на рентгеновской дифрактограмме обнаруживаются (рис. 4), с одной стороны, относительно малочисленные и умеренно интенсивные отражения от реликтового бемита, а с другой — отражения от новообразованных шпинелида $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, магнетита и маггемита — $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, что связано с полной диссоциацией гетита и бемита.

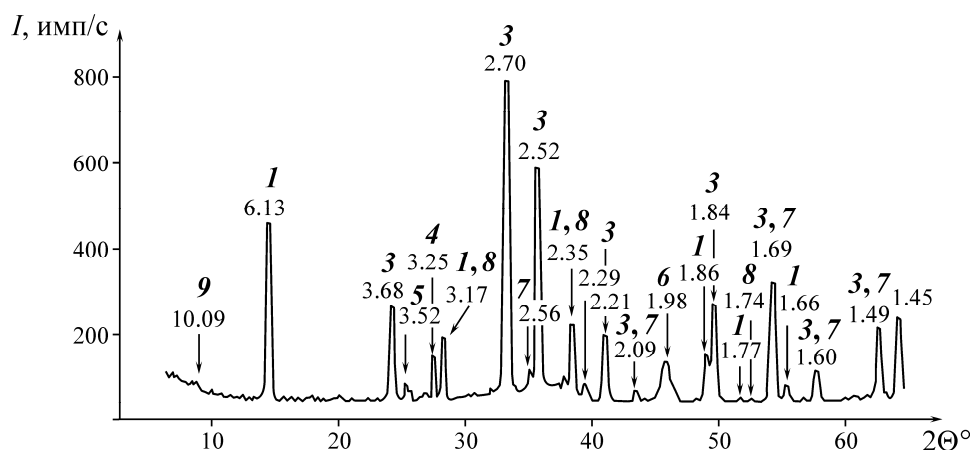


Рис. 4. Рентгеновская дифрактограмма образца боксита, подвергнутого радиационно-термической обработке до температуры 600°C на ускорителе ИЛУ-6. Минералы: 1 — бемит; 2 — гетит (не обнаружен); 3 — гематит; 4 — рутил; 5 — анатаз; 6 — $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$; 7 — магнетит; 8 — маггемит; 9 — слюда

Появление двух ферромагнитных фаз — маггемита и магнетита — связано именно с радиационно-термической обработкой боксита ускоренными электронами. Образование таких фаз существенно повлияло на магнитные свойства модифицированного образца боксита — объемная и удельная магнитная восприимчивость увеличились по сравнению с исходным образцом почти в 6 раз (см. табл. 1).

Таким образом, проведенные эксперименты впервые показали, что путем терморadiационного воздействия можно существенно модифицировать фазовый состав бокситов, значительно увеличить их магнитную восприимчивость и направленно изменять их разделительные свойства [10].

Используя разницу в поведении пирита и других сульфидных минералов в сложных по вещественному составу упорных рудах после их обработки пучком ускоренных электронов, можно управлять технологическим процессом их обогащения, добиваясь при этом высоких показателей разделения. Продемонстрированная в ряде работ [3–6, 9] возможность селективно направленного изменения магнитных свойств железосодержащих минералов при их радиационно-термической обработке открывает перспективы для создания эффективных, экологически чистых технологий переработки комплексных руд сложного состава и продуктов их обогащения.

В табл. 3 приведены результаты по магнитному разделению черного оловянного концентрата с использованием радиационно-термической обработки, которая позволяет интенсифицировать процесс разделения оловянных продуктов, содержащих железо. При этом в магнитную фракцию извлекается более 70% железа и около 90% мышьяка, а немагнитный продукт содержит 36% олова, 9% железа и 1.30% мышьяка. Такой продукт не удается получить только при увеличении напряженности магнитного поля.

ТАБЛИЦА 3. Влияние напряженности магнитного поля и обработки ускоренными электронами пробы черного оловянного концентрата на результаты ее сухой магнитной сепарации

| Обработка и напряженность | Продукт | Выход % | Содержание, % | | | Извлечение, % | | |
|-------------------------------------|-------------|---------|---------------|-------|-------|---------------|-------|-------|
| | | | Sn | Fe | As | Sn | Fe | As |
| Без обработки H = 1950 Э | Магнитный | 11.72 | 2.79 | 31.92 | 1.41 | 1.56 | 20.90 | 2.83 |
| | Немагнитный | 88.28 | 23.41 | 16.04 | 6.43 | 98.44 | 79.10 | 97.17 |
| | Итого | 100 | 20.99 | 17.90 | 5.84 | 100 | 100 | 100 |
| Обработка электронами H = 1950 Э | Магнитный | 47.69 | 8.70 | 29.55 | 10.97 | 18.05 | 74.96 | 89.71 |
| | Немагнитный | 52.31 | 36.00 | 9.00 | 1.30 | 81.95 | 25.04 | 10.29 |
| | Итого | 100 | 22.98 | 18.80 | 5.83 | 100 | 100 | 100 |
| Без обработки H = 3020 Э | Магнитный | 36.38 | 4.32 | 26.30 | 2.13 | 8.07 | 51.97 | 12.97 |
| | Немагнитный | 63.62 | 28.14 | 13.90 | 8.25 | 91.93 | 48.03 | 87.03 |
| | Итого | 100 | 19.47 | 18.41 | 6.03 | 100 | 100 | 100 |
| Без обработки H = 4050 Э | Магнитный | 39.32 | 4.53 | 25.86 | 1.33 | 8.18 | 57.93 | 9.30 |
| | Немагнитный | 60.68 | 32.97 | 12.47 | 8.40 | 91.82 | 42.07 | 90.70 |
| | Итого | 100 | 21.79 | 17.55 | 5.62 | 100 | 100 | 100 |

Таким образом, проведенные эксперименты показали, что радиационно-термическая обработка железосодержащего сульфидного и несulfидного минерального сырья сложного состава позволяет направленно изменять его магнитные свойства за счет интенсивно протекающих под действием ускоренных электронов фазовых переходов минералов железа. Установлено, что при этом объемная магнитная восприимчивость пирита возрастает более чем в 150 раз, а для бокситовой руды — почти в 6 раз. Выявленные закономерности подтвердили возможность применения радиационно-термической модификации минерального сырья при его переработке.

ВЫВОДЫ

Показано, что радиационно-термическая обработка железосодержащего сульфидного и несulfидного минерального сырья сложного состава позволяет направленно изменять его магнитные свойства за счет интенсивно протекающих под действием ускоренных электронов фазовых переходов минералов железа. Образование ферромагнитных фаз, таких как Fe_2O_3 , Fe_3O_4 и $\gamma-Fe_2O_3$ в рудах и продуктах обогащения, подвергшихся радиационно-термической обработке, способствует усилению магнитных свойств.

Экспериментально установлено, что при радиационном нагреве до $600^\circ C$ объемная магнитная восприимчивость пирита возрастает более чем в 100 раз, а для бокситовой руды — почти в 6 раз. При этом в бокситах происходит полная диссоциация гетита и бемита с образованием гематита и шпинелида $\gamma-Al_2O_3$. Образование ферромагнитных фаз в бокситах улучшает их магнитное разделение.

Радиационно-термическая обработка черного оловянного концентрата, содержащего железо в сульфидной форме, позволяет при последующей сухой магнитной сепарации извлекать в магнитную фракцию более 70 % железа и около 90 % мышьяка. Немагнитный продукт, содержащий 36 % олова, 9 % железа и 1.30 % мышьяка, без обработки и только при увеличении напряженности магнитного поля получить не удастся.

Использование радиационно-термической магнетизации и последующей сухой магнитной сепарации открывает возможности для создания высокоэффективных технологий обогащения железосодержащих сульфидных и несulfидных руд и техногенных продуктов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Чантурия В. А.** Прогрессивные технологии комплексной и глубокой переработки природного и техногенного минерального сырья // Прогрессивные методы обогащения и комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья (Плаксинские чтения-2014): материалы Международ. совещ. — Алматы, 16–19 сентября 2014 г. — С. 5–6.
2. **Чантурия В. А.** Современные проблемы обогащения минерального сырья в России // ФТПРПИ. — 1999. — № 3. — С. 107–121.
3. **Потапов С. А., Чантурия В. А., Поляков В. А. и др.** Влияние пучка ускоренных электронов на технологические свойства железистых кварцитов Михайловского месторождения // ФТПРПИ. — 1989. — № 3. — С. 111–115.
4. **Wang H., Lu S.** Modifying effect of electron beam irradiation on magnetic property of iron-bearing minerals, *J. Physiochem. Probl. Miner. Proc.*, 2014, No. 50(1). — P. 79–86.
5. **Кондратьев С. А., Ростовцев В. И., Бочкарев Г. Р. и др.** Научное обоснование и разработка инновационных технологий комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья // ФТПРПИ. — 2014. — № 5. — С. 187–202.
6. **Korobeinikov M. V., Bryazgin A. A., Bezuglov V. V., et al.** Radiation-thermal treatment in ore dressing, *Iop Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 81 (2015) 012124. — P. 1–6.
7. **Ростовцев В. И.** Радиационно-термический метод изменения магнитных свойств минералов в обогащении минерального сырья // Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология: сб. материалов XI Международ. науч. конгр. Интерэкспо “ГЕО-Сибирь-2015”, 13–25 апреля 2015 г., Т. 3 — Новосибирск: СГУГиТ, 2015. — С. 206–210.
8. **Бочкарев Г. Р., Ростовцев В. И., Воблый П. Д. и др.** Высокоградиентный магнитный сепаратор для обогащения слабомагнитных руд // ФТПРПИ. — 2004. — № 2. — С. 94–99.
9. **Ванг Х., Бочкарев Г. Р., Ростовцев В. И. и др.** Повышение магнитных свойств железосодержащих минералов при радиационно-термической обработке // ФТПРПИ. — 2004. — № 4. — С. 89–97.
10. **Котова О. Б., Размыслов И. Н., Ростовцев В. И., Силаев В. И.** Радиационно-термическое модифицирование железистых бокситов в процессах их переработки // Обогащение руд. — 2016. — № 4. — С. 16–22.

Поступила в редакцию 14/IX 2016