

УДК 622.7

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОБОГАЩЕНИЯ МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ РУД
НА ОСНОВЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

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

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

Приведены результаты экспериментальных исследований по интенсификации процессов обогащения медно-никелевой руды с помощью методов флотации и магнитной сепарации. Установлено, что предварительная обработка руды перед измельчением ускоренными электронами позволяет увеличить выход класса -0.071 мм и извлечение полезных компонентов в концентрат. Применение магнитной сепарации повышает комплексность использования минерального сырья.

Медно-никелевое минеральное сырье, обработка ускоренными электронами, рудоподготовка, флотация, магнитная сепарация

DOI: 10.15372/FTPRPI20170514

Развитие минерально-сырьевой базы на современном этапе связано с вовлечением в разработку месторождений труднообогатимых руд, а также с освоением техногенных минеральных образований. Эта тенденция, в свою очередь, обуславливает как значительные потери промышленно ценных компонентов на стадиях добычи и переработки минерального сырья, так и высокие эксплуатационные и капитальные затраты на производство конечной продукции.

Предварительная подготовка рудного сырья, включающая измельчение и вскрытие тонко-вкрапленных минеральных комплексов, имеет важное значение для достижения максимально высокого извлечения металлов, в том числе из техногенного минерального сырья. Как указано в [1], дезинтеграция минерального сырья — основная технологическая операция в процессе рудоподготовки. Энергозатраты при этом сравнительно низкие на стадиях дробления (до 1.2 кВт·ч/т) и высокие на стадиях измельчения (50 кВт·ч/т и выше). В ряде работ [2–5] показано, что с целью сокращения расхода электроэнергии при рудоподготовке труднообогатимого минерального сырья представляется перспективным использование энергетических воздействий, позволяющих преодолеть его физическую упорность и обеспечить селективную дезинтеграцию без излишнего переизмельчения.

Россия обладает значительной минерально-сырьевой базой никеля, основу которой составляют месторождения сульфидного медно-никелевого типа. Особенностью руд этих месторождений является их комплексность. В них кроме никеля в промышленных количествах содержится медь, платиноиды, кобальт и другие металлы. Иные типы месторождений, в том числе важный для сырьевой базы ряда зарубежных стран латеритный тип, в российской сырьевой базе никеля имеют подчиненное значение [6].

Следует отметить, что в разрабатываемых и осваиваемых месторождениях страны заключено более 13 % мировых промышленных запасов никеля. По этому показателю Россия занимает четвертое место в мире, уступая Австралии, Бразилии и Новой Каледонии. Государственным балансом учтено 56 месторождений никеля, из которых 14 с забалансовыми запасами и 3 эксплуатируемых техногенных месторождения. Более 75 % запасов заключено в сульфидных медно-никелевых рудах месторождений Норильского рудного района, входящего в Норильско-Хараелахскую металлогеническую зону.

По данным Международной группы по изучению никеля (International Nickel Study Group – INSG), мировое производство первичного никеля во всех видах в 2014 г. составило 1994 тыс. т, в том числе 350 тыс. т никеля в ферроникеле и около 450 тыс. т никеля в никелистом чугуне. На долю 10 крупнейших производителей приходится около 93 % мирового выпуска первичного никеля. Лидирует Китай, у которого более 1/3 мирового производства. Россия занимает второе место с долей в 12 % [6]. Области применения никеля, по данным [6], приведены на рис. 1.

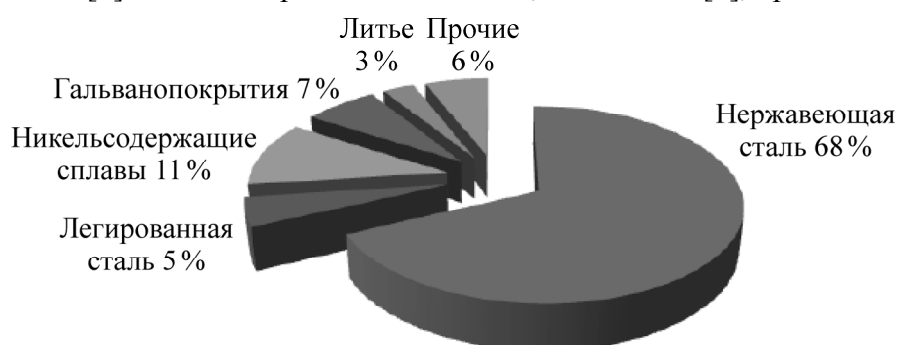


Рис. 1. Области мирового потребления никеля в 2014 г. (100 % = 1 863 тыс. т) [6]

Характерной особенностью сульфидных месторождений, сосредоточенных преимущественно на территориях России и Канады, является сравнительно выдержанный минеральный состав руд. Главные минералы руд: пирротин, пентландит, халькопирит и магнетит. Основная часть никеля представлена пентландитом $(\text{Ni}, \text{Fe})_9\text{S}_8$. В небольших количествах наблюдаются миллерит NiS , виоларит Ni_2FeS_4 и никельсодержащий пирротин $(\text{Fe}, \text{Ni})_8\text{S}_9$. Пентландит всегда встречается с другими сульфидными минералами, чаще всего с пирротинном Fe_8S_9 и халькопиритом CuFeS_2 . Указанные минералы вмещает силикатная и алюмосиликатная порода. Более подробная информация о развитии никелевой промышленности в нашей стране приведена в [7].

Цель настоящих исследований — изучение особенностей минерального состава медно-никелевых руд и экспериментальная проверка возможности совершенствования процесса их обогащения с использованием методов флотации и магнитной сепарации.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводились на образцах пробы труднообогатимой медно-никелевой руды, содержащей 3.10–3.16 % Ni, 2.94–3.35 % Cu, а также кобальт, серу, платиноиды и другие металлы. Основная масса руды на 60–70 % представлена пирротинном. Халькопирит (15–18 %) находится в виде ксеноморфных мелкозернистых выделений в пирротине. Пентландит (5–7%) равномерно распределен в пирротине и халькопирите тонкими выделениями размером до 0.1 мм. Магнетит (до 1 %) встречается в виде тонкозернистых включений в рудных минералах и поро-

дах. Породную массу составляют роговик, измененные габбро-долериты и биотит-плагиоклаз-пироксеновые метасоматиты.

Для флотационных опытов применялась лабораторная флотационная машина типа ФММ с объемом камеры 0.5 л. Измельчение исходной руды до крупности 85 % класса -0.071 мм осуществлялось в рольганговой мельнице при $T : Ж : Ш = 1 : 1 : 7$. При флотации расход реагентов: ксантогената Кх и вспенивателя Т-86 был постоянным. Подготовленные образцы руды обрабатывались пучком ускоренных электронов на промышленном ускорителе ИЛУ-6 в Институте ядерной физики СО РАН в соответствии с заданными дозами при энергии электронов 2.4 МэВ. Ток пучка импульсный — 320 мА, ширина развертки пучка — 90 см, скорость транспортировки — 2 см/с, расстояние от выпускного окна до образца — 33 см.

Технологическая схема исследований показана на рис. 2. Сухое магнитное разделение выполнялось на сепараторе 138СБЭ, обеспечивающем напряженность магнитного поля до 7.96×10^5 А/м. Химический состав исходной руды и продуктов обогащения определялся на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно-связанной плазмой модели IRIS объемным анализом с помощью стандартных методик. Подготовка проб для химического анализа проводилась термоавтоклавным разложением с использованием смеси хлороводородной, фтороводородной и азотной кислот в микроволновой печи MARS 5.



Рис. 2. Технологическая схема исследований медно-никелевой руды

Исходную руду доводили до крупности -3 мм в щековой дробилке. Грансостав исследованной пробы руды приведен в табл. 1, в которой показано распределение основных металлов по классам. Измельченную при $T : Ж : Ш = 1 : 1 : 7$ руду обогащали флотационным способом в соответствии с технологической схемой (рис. 2), получая основной коллективный и контрольный концентраты.

ТАБЛИЦА 1. Гранулометрическая характеристика исследованной пробы медно-никелевой руды крупностью -3 мм и распределение основных металлов по классам, %

| Класс, мм | Выход | Содержание | | | Извлечение | | |
|-----------------|-------|------------|------|-------|------------|-------|-------|
| | | Cu | Ni | Fe | Cu | Ni | Fe |
| +1 | 38.6 | 2.54 | 2.90 | 41.18 | 34.71 | 37.39 | 38.38 |
| $-1 + 0.5$ | 20.8 | 2.70 | 3.10 | 41.88 | 19.88 | 21.54 | 21.03 |
| $-0.5 + 0.25$ | 13.0 | 2.76 | 2.80 | 43.28 | 12.70 | 12.16 | 13.59 |
| $-0.25 + 0.125$ | 9.3 | 2.92 | 2.70 | 44.32 | 9.62 | 8.39 | 9.95 |

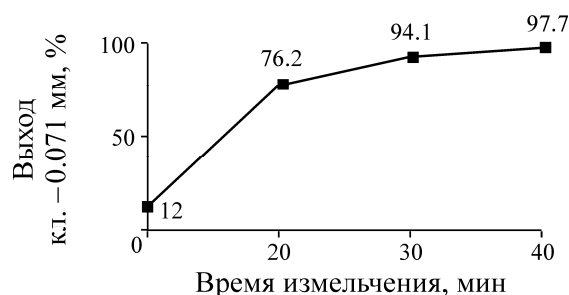
| | | | | | | | |
|----------------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| -0.125 + 0.071 | 6.3 | 3.21 | 2.90 | 43.63 | 7.16 | 6.10 | 6.64 |
| -0.071 | 12.0 | 3.75 | 3.60 | 35.95 | 15.93 | 14.42 | 10.41 |
| Итого: | 100 | 2.83 | 2.99 | 41.42 | 100 | 100 | 100 |

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Анализ данных, приведенных в табл. 1, свидетельствует о том, что в исходной пробе готового к флотации класса -0.071 мм содержится 12 %. Учитывая требуемую для флотации крупность измельченной руды (85 % указанного класса), были выполнены экспериментальные исследования по определению необходимого времени измельчения исходной руды. Из данных табл. 2 и рис. 3 следует, что время измельчения составляет 25 мин.

ТАБЛИЦА 2. Кинетика измельчения исходной медно-никелевой руды крупностью -3 мм

| Класс, мм | Выход классов (%) при времени измельчения, мин | | | |
|----------------|------------------------------------------------|-------|-------|-------|
| | 0 | 20 | 30 | 40 |
| +1 | 38.6 | 2.00 | 0.50 | 0.30 |
| -1 + 0.5 | 20.8 | 0.75 | 0.30 | 0.20 |
| -0.5 + 0.25 | 13.0 | 0.50 | 0.10 | 0.30 |
| -0.25 + 0.125 | 9.3 | 2.50 | 0.30 | 0.30 |
| -0.125 + 0.071 | 6.3 | 18.00 | 4.70 | 1.20 |
| -0.071 | 12.0 | 76.25 | 94.10 | 97.70 |
| Итого | 100 | 100 | 100 | 100 |

Рис. 3. Кинетика измельчения исходной медно-никелевой руды крупностью -3 мм в лабораторной рольганговой мельнице

В табл. 3 приведена гранулометрическая характеристика измельченной исходной и обработанной ускоренными электронами руды при найденном времени измельчения.

ТАБЛИЦА 3. Грансостав измельченной в течение 25 мин предварительно обработанной ускоренными электронами медно-никелевой руды крупностью -3 мм, %

| Класс, мм | Доза обработки, кГр | | | | |
|------------|---------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 0 | 2.5 | 5.0 | 7.5 | 10.0 |
| +1 | 1.25 | 0.80 | 0.60 | 0.80 | 0.90 |
| -1 + 0.071 | 13.57 | 11.20 | 11.40 | 12.30 | 12.00 |
| -0.071 | 85.18 | 88.00 | 88.00 | 86.90 | 87.10 |
| Итого | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |

В табл. 4 представлены результаты флотационных исследований. Для сравнения показателей обогащения рассматривались как извлечения меди и никеля в концентраты, так и суммарное извлечение в концентрат коллективной (основной) флотации $\Sigma \varepsilon_{\text{осн}}$ и полезных компонентов основной и контрольной флотаций $\Sigma \varepsilon_{\text{осн+контр}}$.

Учитывая особенности минерального состава медно-никелевой руды, связанные с наличием в ней магнитных минералов пирротина и магнетита, проведены эксперименты по сухой магнитной сепарации указанных в табл. 1 материалов различной крупности. Результаты отражены в табл. 5.

ТАБЛИЦА 4. Результаты флотации медно-никелевой руды с предварительной обработкой перед измельчением ускоренными электронами, %

| Доза обработки, кГр | Продукт | Выход | Содержание | | Извлечение | | $\Sigma \varepsilon_{\text{осн}}$ | $\Sigma \varepsilon_{\text{осн+контр}}$ |
|---------------------|------------------------|-------|------------|------|------------|-------|-----------------------------------|-----------------------------------------|
| | | | Cu | Ni | Cu | Ni | | |
| 0 | Концентрат основной | 61.2 | 4.86 | 4.30 | 95.50 | 89.00 | 184.50 | 193.95 |
| | Концентрат контрольный | 10.4 | 0.83 | 1.90 | 2.77 | 6.68 | | |
| | Хвосты | 28.4 | 0.19 | 0.45 | 1.73 | 4.32 | | |
| | Исходная | 100 | 3.11 | 2.96 | 100 | 100 | | |
| 2.5 | Концентрат основной | 57.0 | 5.35 | 4.40 | 98.76 | 83.32 | 182.08 | 194.22 |
| | Концентрат контрольный | 16.1 | 0.07 | 2.20 | 0.37 | 11.77 | | |
| | Хвосты | 26.9 | 0.10 | 0.55 | 0.87 | 4.91 | | |
| | Исходная | 100 | 3.09 | 3.01 | 100 | 100 | | |
| 5.0 | Концентрат основной | 61.3 | 4.48 | 4.20 | 97.43 | 87.60 | 185.03 | 192.26 |
| | Концентрат контрольный | 10.6 | 0.10 | 1.90 | 0.38 | 6.85 | | |
| | Хвосты | 28.1 | 0.22 | 0.58 | 2.19 | 5.55 | | |
| | Исходная | 100 | 2.82 | 2.94 | 100 | 100 | | |
| 7.5 | Концентрат основной | 47.2 | 5.93 | 5.37 | 97.51 | 88.44 | 185.95 | 194.92 |
| | Концентрат контрольный | 26.8 | 0.14 | 0.82 | 1.31 | 7.66 | | |
| | Хвосты | 26.0 | 0.13 | 0.43 | 1.18 | 3.90 | | |
| | Исходная | 100 | 2.87 | 2.87 | 100 | 100 | | |
| 10.0 | Концентрат основной | 62.9 | 4.60 | 4.30 | 97.89 | 89.98 | 187.87 | 194.50 |
| | Концентрат контрольный | 10.1 | 0.27 | 1.90 | 0.92 | 5.71 | | |
| | Хвосты | 27.0 | 0.13 | 0.45 | 1.19 | 4.31 | | |
| | Исходная | 100 | 2.96 | 3.01 | 100 | 100 | | |

ТАБЛИЦА 5. Результаты разделения медно-никелевой руды различной крупности сухой магнитной сепарацией при напряженности магнитного поля $H = 1.55 \cdot 10^5$ А/м, %

| Продукт | Выход | | Содержание | | Извлечение | | | |
|----------------------------------------|---------|-----------|------------|------|------------|-------|-----------|--------|
| | | | | | от руды | | от класса | |
| | от руды | от класса | Cu | Ni | Cu | Ni | Cu | Ni |
| Материал крупностью + 1 – 3 мм | | | | | | | | |
| Магнитный | 31.30 | 81.10 | 2.35 | 3.50 | 35.38 | 36.83 | 87.35 | 95.55 |
| Немагнитный | 7.30 | 18.90 | 1.46 | 0.70 | 5.13 | 1.72 | 12.65 | 4.45 |
| Итого | 38.60 | 100.00 | 2.18 | 2.97 | 40.51 | 38.55 | 100.00 | 100.00 |
| Материал крупностью + 0.5 – 1 мм | | | | | | | | |
| Магнитный | 16.70 | 80.30 | 0.83 | 3.40 | 6.67 | 19.09 | 59.63 | 95.19 |
| Немагнитный | 4.10 | 19.70 | 2.29 | 0.70 | 4.52 | 0.97 | 40.37 | 4.81 |
| Итого | 20.80 | 100.00 | 1.12 | 2.88 | 11.19 | 20.06 | 100.00 | 100.00 |
| Материал крупностью + 0.25 – 0.5 мм | | | | | | | | |
| Магнитный | 9.75 | 75.00 | 0.57 | 3.20 | 2.67 | 10.49 | 26.68 | 88.07 |
| Немагнитный | 3.25 | 25.00 | 4.70 | 1.30 | 7.35 | 1.42 | 73.32 | 11.93 |
| Итого | 13.00 | 100.00 | 1.60 | 2.73 | 10.02 | 11.91 | 100.00 | 100.00 |
| Материал крупностью + 0.125 – 0.25 мм | | | | | | | | |
| Магнитный | 7.03 | 75.60 | 1.65 | 3.40 | 5.58 | 8.04 | 40.34 | 90.55 |
| Немагнитный | 2.27 | 24.40 | 7.56 | 1.10 | 8.25 | 0.84 | 59.66 | 9.45 |
| Итого | 9.30 | 100.00 | 3.09 | 2.84 | 13.83 | 8.98 | 100.00 | 100.00 |
| Материал крупностью + 0.071 – 0.125 мм | | | | | | | | |
| Магнитный | 4.31 | 68.40 | 0.76 | 3.40 | 1.57 | 4.93 | 18.92 | 77.80 |
| Немагнитный | 1.99 | 31.60 | 7.05 | 2.10 | 6.75 | 1.40 | 81.08 | 22.20 |
| Итого | 6.30 | 100.00 | 2.75 | 2.99 | 8.32 | 6.33 | 100.00 | 100.00 |
| Материал крупностью – 0.071 мм | | | | | | | | |
| Магнитный | 10.87 | 90.60 | 2.29 | 3.50 | 11.97 | 12.79 | 74.24 | 89.64 |

| | | | | | | | | |
|-----------------------------|--------|--------|------|------|--------|--------|--------|--------|
| Немагнитный | 1.13 | 9.40 | 7.66 | 3.90 | 4.16 | 1.48 | 25.76 | 10.36 |
| Итого | 12.00 | 100.00 | 2.79 | 3.54 | 16.13 | 14.27 | 100.00 | 100.00 |
| Материал крупностью +0–3 мм | | | | | | | | |
| Магнитный | 79.96 | | 1.66 | 3.43 | 63.84 | 92.17 | | |
| Немагнитный | 20.04 | | 3.75 | 1.16 | 36.16 | 7.83 | | |
| Итого | 100.00 | | 2.08 | 2.37 | 100.00 | 100.00 | | |

ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно результатам, приведенным в табл. 3, обработка исходной руды перед измельчением ускоренными электронами при дозах от 2.5 до 10 кГр позволяет увеличить в измельченном продукте выход класса –0.071 мм при одном и том же времени измельчения. В [3–5] установлено, что обработка различных руд высокоэнергетическими электронами интенсифицирует процесс их измельчения. Теоретический анализ возможного действия потока ускоренных электронов на известняк, роговик и песчаник показал [8], что накопление дефектов облучения и развитие нарушений сплошности среды на многофазной границе раздела минералов, а также индуцированный излучением электрический пробой приводят к нарушениям структуры в горных породах, потере их механической прочности, что может быть использовано для снижения расхода электроэнергии при рудоподготовке и повышения ее селективности. В [8] экспериментально доказано, что прочность на сжатие для роговика, являющегося составной частью медно-никелевой руды, в результате его радиационной обработки снижается со 123.15 до 78.97 МПа. В [9] продемонстрировано снижение прочности на сжатие для гранита — самой распространенной в земной коре горной породы — с 68.33 до 35.08 МПа. Необходимость исследования прочности горных пород подчеркивается в [10] и других работах.

Подтверждением лучшего раскрытия сростков являются данные табл. 4, из которых следует возможность повышения результатов флотационного извлечения сульфидов при радиационной обработке руды перед измельчением. Если без обработки сумма извлечений меди и никеля в концентрат основной флотации $\Sigma \varepsilon_{\text{осн}}$ составляет 184.50%, то при обработке этот показатель повышается до 187.87% при дозе 10 кГр. Кроме того, отмечается улучшение качества концентрата основной флотации и уменьшение потерь с хвостами. При флотации исходной руды получен концентрат, содержащий 4.86% меди, 4.30% никеля и хвосты, включающие 0.19% меди и 0.45% никеля. В случае предварительной обработки руды перед измельчением при дозе 7.5 кГр концентрат содержит 5.93% меди и 5.37% никеля, а в хвостах — 0.13% меди и 0.43% никеля. Суммарное извлечение меди и никеля в концентрат основной флотации составило 185.95%, а полезных компонентов в концентрат основной и контрольной флотаций — 194.92%. Установлено, что добиться улучшения качества концентрата и снижения потерь с хвостами при флотации медно-никелевой норильской руды можно с помощью дезинтеграторной подготовки [11]. В [12] продемонстрирована возможность применения радиационной обработки при подготовке золотосодержащего сырья, а в [13] рассмотрена оценка раскрытия минералов при рудоподготовке труднообогатимого сульфидного сырья после энергетических воздействий.

В табл. 5 приведены результаты разделения медно-никелевой руды различной крупности сухой магнитной сепарацией. Реализация этого метода при обогащении исследованной руды связана с наличием в ней магнитных минералов — пирротина и магнетита. Анализ табличных данных свидетельствует о том, что технологические показатели разделения на магнитный и немагнитный продукты зависят от крупности исходного материала. Извлечение никеля в маг-

нитный продукт для всех классов крупности выше, чем извлечение меди. Учитывая практику использования магнитной сепарации для ряда руд [6, 7] и наличие разработок высокоградиентных магнитных сепараторов на постоянных магнитах [14], можно отметить перспективность реализации сухой магнитной сепарации при обогащении медно-никелевого минерального сырья.

ВЫВОДЫ

Изучены особенности минерального состава пробы медно-никелевой руды и установлено, что в ней кроме медных и никелевых содержатся магнитные минералы — пирротин и магнетит. Породная масса представлена роговиком, измененными габбро-долеритами и биотит-плагиоклаз-пироксеновыми метасоматитами.

Выполнены экспериментальные исследования по совершенствованию процесса обогащения методами флотации и магнитной сепарации. Показано, что обработка исходной руды перед измельчением ускоренными электронами при дозах от 2.5 до 10 кГр позволяет увеличить в измельченном продукте выход класса –0.071 мм с 85.18 до 88.00 % при одном и том же времени измельчения.

Установлена возможность повышения флотационного извлечения сульфидов при использовании радиационной обработки руды перед измельчением. Если без обработки сумма извлечений меди и никеля в концентрат основной флотации составляет 184.50 %, то при обработке этот показатель достигает 187.87 % при дозе 10 кГр. Содержание меди в концентрате основной флотации возрастает с 4.86 до 5.93 %, а никеля — с 4.30 до 5.37 %. Содержание меди в хвостах снижается с 0.19 до 0.13 %, а никеля — с 0.45 до 0.43 %.

С учетом результатов экспериментальных исследований отмечена перспективность сухой магнитной сепарации при обогащении медно-никелевой руды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Чантурия В. А., Маляров П. В.** Обзор мировых достижений и перспективы развития техники и технологии дезинтеграции минерального сырья при обогащении полезных ископаемых // Современные методы технологической минералогии в процессах комплексной и глубокой переработки минерального сырья: материалы Междунар. сов. (Плаксинские чтения-2012). — Петрозаводск: КНЦ РАН, 2012. — С. 3–10.
- 2. Чантурия В. А., Бунин И. Ж.** Нетрадиционные высокоэнергетические методы дезинтеграции и вскрытия тонкодисперсных минеральных комплексов // ФТПРПИ. — 2007. — № 3. — С. 107–128.
- 3. Bochkarev G. R., Chanturija V. A., Vigdergaus V. E., Lunin V. D., Viigelt Yu. P., Rostovtsev V. I., Voronin A. P., Auslender V. L., and Polyakov V. A.** Prospects of electron accelerators used for realizing effective low-cost technologies of mineral processing, Proceedinds of the XX International Mineral Processing Congress: 21-26 September 1997, Aachen, Germany, Clausthal-Zellerfeld, GDMB, 1997, Vol. 1. — P. 231–243.
- 4. Ростовцев В. И.** О технологической и экономической эффективности использования немеханических энергетических воздействий при переработке труднообогатимого минерального сырья // ФТПРПИ. — 2013. — № 4. — С. 145–155.
- 5. Кондратьев С. А., Ростовцев В. И., Бочкарев Г. Р., Пушкарева Г. И., Коваленко К. А.** Научное обоснование и разработка инновационных технологий комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья // ФТПРПИ. — 2014. — № 5. — С. 187–202.

6. **Информационно-технический справочник** по наилучшим доступным технологиям ИТС 12-2016 “Производство никеля и кобальта”. — М.: Бюро НДТ, 2016. — 194 с.
7. **Резник И. Д., Ермаков Г. П., Шнеерсон Я. М.** Никель: в 3 т. — Т. 1: Развитие никелевой промышленности в СССР. Подготовка руд и концентратов к металлургическому переделу. Обогащение окисленных никелевых руд. — М.: Машиностроение, 2004. — 384 с.; Т. 2: Окисленные никелевые руды. Характеристика руд. Пирометаллургия и гидрометаллургия окисленных никелевых руд. — М.: Наука и технологии, 2004. — 468 с.; Т. 3: Сульфидные медно-никелевые руды. Характеристика руд и месторождений. Пирометаллургия и гидрометаллургия сульфидного медно-никелевого сырья, получение электролитного и карбонильного никеля, поведение благородных металлов. Производство и потребление никеля в мире. — Там же. — 608 с.
8. **Кондратьев С. А., Ростовцев В. И., Бакшеева И. И.** Исследования прочностных свойств керновых образцов горных пород с применением их обработки пучком высокоэнергетических электронов // ФТПРПИ. — 2016. — № 4. — С. 168–176.
9. **Кондратьев С. А., Ростовцев В. И., Кулагин О. Р., Сиволап Б. Б.** Исследование деформационно-прочностных свойств керновых образцов гранита, обработанных потоком ускоренных электронов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр.: Междунар. науч. конф. “Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология”: сб. материалов в 4 т. — Новосибирск: СГУГиТ, 2017. — Т. 2. — С. 50–54.
10. **Вайсберг Л. А., Каменева Е. Е.** Изменение прочностных свойств горных пород в процессе дезинтеграции // Ресурсосбережение и охрана окружающей среды при обогащении и переработке минерального сырья: материалы Междунар. конф. (Плаксинские чтения-2016). — СПб., 2016. — С. 27–30.
11. **Юсупов Т. С., Кириллова Е. А., Шумская Л. Г.** Структурно-химические особенности минеральных сростков в связи с процессом их дезинтегративного раскрытия // Ресурсосбережение и охрана окружающей среды при обогащении и переработке минерального сырья: материалы Междунар. конф. (Плаксинские чтения-2016). — СПб., 2016. — С. 38–40.
12. **Ростовцев В. И., Бакшеева И. И.** Радиационная обработка руды как способ подготовки золотосодержащего сырья к обогащению // Ресурсосбережение и охрана окружающей среды при обогащении и переработке минерального сырья: материалы Междунар. конф. (Плаксинские чтения-2016), СПб., 2016. — С. 47–50.
13. **Ростовцев В. И., Бакшеева И. И., Бурдакова Е. А.** Оценка раскрытия минералов при рудоподготовке труднообогатимого сульфидного сырья с использованием энергетических воздействий // Оборудование для обогащения рудных и нерудных материалов. Технологии обогащения: материалы 11-й Междунар. науч.-практ. конф. — Новосибирск: Сибпринт, 2016. — С. 40–57.
14. **Бочкарев Г. Р., Ростовцев В. И., Воблый П. Д. и др.** Высокоградиентный магнитный сепаратор для обогащения слабомагнитных руд // ФТПРПИ. — 2004. — № 2 — С. 94–99.

Поступила в редакцию 22/VI 2017