**РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК**
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
**ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ**

2017 № 4

УДК 622.7:621.926

# ВЛИЯНИЕ МЕТОДА ДРОБЛЕНИЯ НА ПРОЦЕСС ОБОГАЩЕНИЯ СВИНЦОВО-ЦИНКОВОЙ РУДЫ

**Н. Г. Барнов[1], А. А. Лавриненко[2], О. Г. Лусинян[2], В. В. Чихладзе[2]**

[1]*Институт минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов,*
E-mail: barnov@inbox.ru*, ул. Вересаева, 15, 121357, г. Москва, Россия*
[2]*Институт проблем комплексного освоения недр РАН,*
E-mail: lavrin_a@mail.ru, lusinyan.oganes@yandex.ru, chik42@mail.ru,
*Крюковский тупик, 4, 111020, г. Москва, Россия*

Рассмотрено влияние различных методов дробления на гранулометрический состав продуктов и селективность раскрытия основных минеральных компонентов полиметаллической руды Дальнегорского месторождения при ее подготовке к обогащению. Установлено распределение основных элементов по классам крупности исходных продуктов измельчения и после их разделения с применением методов магнитной сепарации и флотации. Представлены методические условия подготовки и разделения продуктов дезинтеграции. Показано изменение критерия селективности дезинтеграции руды в щековой дробилке и под прессом при подготовке различных классов крупности исходной руды к разделению полученных фракций методами магнитного и флотационного обогащения.

*Свинцово-цинковая руда, дробление, объемное сжатие, гранулометрический состав продуктов, обогащение, магнитная сепарация, флотация*

Селективное раскрытие минеральных комплексов — одно из основных требований к процессу дезинтеграции горной породы для последующего качественного разделения составляющих ее минералов. Раскрытие сростков минералов при измельчении приводит к перераспределению минералов по классам крупности и изменению минерального состава отдельных фракций [1 – 4]. Представляет интерес оценить не только величины извлечения и выхода, но и селективность распределения минеральных компонентов по классам крупности измельченного разными способами минерального сырья.

Согласно теории Орована – Ребиндера, наиболее эффективное разрушение минеральных агрегатов происходит в области дефектных зон и межфазных границ. Основанная на этой теории технология рудоподготовки, включающая применение валковых дробилок высокого давления (ВДВД) в операциях мелкого дробления, в последнее время получила широкое развитие [5, 6]. Одноосное напряжение, создаваемое поджимающим валком, из-за значительной массы материала, находящегося между валками, вызывает эффект межчастичного объемного сжатия. Давление поджимающего валка передается всем частицам, находящимся внутри слоя материала, при этом раскрытые минералы различной прочности воздействуют друг на друга, разрушая соседние сростки. Куски материала подвергаются силовому воздействию в объемной массе, когда формируются разнонаправленные локальные нагрузки внутри этого объема, а в промежутках между циклами нагружения куски приобретают относительную подвижность, обеспе-

чивающую их взаимную переориентацию. Такой механизм дезинтеграции, включающий элементы объемного сжатия слоя рудного материала между вращающимися валками, способствует повышению селективности раскрытия минералов и уменьшению энергозатрат. Работа ВДВД хорошо моделируется с помощью гидравлического пресса [7 – 9].

Сравнение результатов дезинтегрирования в ВДВД и на прессовой машине проб медно-молибденовой руды месторождения Северный Нурказган (Республика Казахстан) и медно-порфировой руды месторождения Кальмакыр (Республика Узбекистан) показало, что полученные продукты близки по гранулометрическому составу, распределению элементов по классам крупности, трещиноватости зерен и количеству свободных зерен [10]. Сходство технологических признаков продуктов подтверждается минералогическими исследованиями, в результате которых не обнаружено существенных различий между материалами параллельного дробления в ВДВД и под прессом. Экспериментально установлена возможность существования условий прессового воздействия, при которых разрушенные под прессом и в ВДВД материалы практически идентичны.

Представляет интерес сравнение влияния объемного сжатия в процессе рудоподготовки для других типов руд на результаты их последующего обогащения. Цель работы — оценка влияния метода дробления на процесс обогащения свинцово-цинковой руды Дальнегорского месторождения Приморского края. В рамках поставленной цели решались следующие задачи:

— выбор параметров дезинтеграции руды в щековой дробилке и под прессом;

— сравнение гранулометрического и элементного составов продуктов соответствующего дробления;

— определение зависимости результатов разделения минеральных компонентов методами магнитной сепарации и флотации руды от способа ее дезинтеграции.

Проба месторождения представлена колчеданной свинцово-цинковой рудой с преобладанием дисульфидов железа (пирита, арсенопирита, марказита). Общее содержание сульфидов железа в пробе выше 40 %, сфалерита — около 10 %, галенита — примерно 1 %; карбонаты кальция, магния, марганца составляют до 30 % руды. В ней также присутствуют в незначительном количестве кварц, алюмосиликаты и примеси рутила, ильменит, барит, флюорит.

Для сравнения результатов дробления руды использованы универсальная прессовая гидравлическая машина SATEC 300DX фирмы INSTRON, оснащенная цилиндрической камерой одноосного сжатия с возможностью регистрации графиков нагрузочно-деформационной характеристики компьютерной программой “Bluehill”, и лабораторная щековая дробилка двойного действия BOYD производства фирмы Rocklabs (Новая Зеландия). В дробилке обе дробящие поверхности совершают сложное движение: со стороны эксцентрика — круговое, со стороны опоры — возвратно-поступательное, и руда многократно подвергается сложному воздействию.

Характер деформации и разрушения кристаллических частиц изучен в аналитическом центре ИПКОН РАН с помощью электронной микроскопии на сканирующем электронном микроскопе Leo 1420 VP. Анализ элементного состава образцов осуществлялся с помощью рентгенофлюоресцентного спектрометра Shimadzu XRF-1800.

Условия дробления в аппаратах подбирались для получения близких характеристик кумулятивных выходов, чтобы нивелировать влияние этого параметра на последующий процесс разделения минералов. Предварительные опыты показали, что это достижимо при разгрузочной щели дробилки 1.7 мм и конечном усилии пресса 240 кН. Результаты дробления при таких условиях представлены на рис. 1, из которого следует, что 40 % материала находится во фракции – 0.315 мм, в других фракциях он оказался почти одинаковым — близко к 20 %.

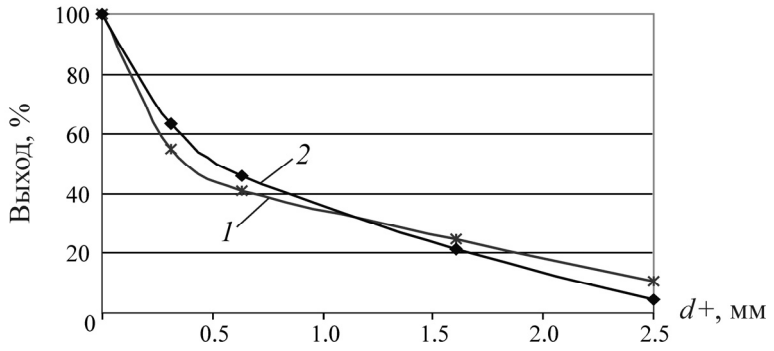


Рис. 1. Кумулятивные характеристики продуктов дробления (Pb-Zn руда – 5 мм): *1* — пресс; *2* — дробилка

Результаты микроанализа (рис. 2) показали, что в материале одинаковой крупности продукты прессовой обработки отличаются бóльшим содержанием дефектных зерен.

Для прессовой обработки характерны трещины, часто проходящие по линиям срастания кристаллов, сколы по краям поверхностей частиц. В крупных классах дробленого материала, при наличии трещиноватости, частицы представляют собой сростки кристаллов, но в более мелких классах наблюдается увеличение количества свободных зерен. Следовательно, различие в рудоподготовке должно проявиться при последующем обогащении.

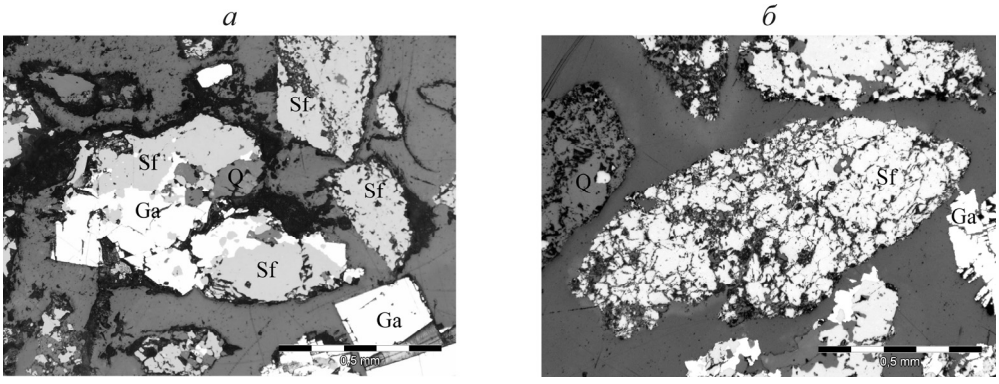


Рис. 2. Фракция – 1 + 0.315 мм после дробления (*а*) и прессования (*б*)

В полиметаллической руде Дальнегорского месторождения в значительном количестве присутствует пирит, высокая флотоактивность которого приводит к разубоживанию полученных свинцовых и цинковых концентратов. Хотя сульфид железа проявляет магнитные свойства в электрическом поле, в практике обогащения пиритных полиметаллических руд операция магнитной сепарации не применяется, а негативное влияние пирита на качество получаемых концентратов устраняют подбором реагентного режима флотации. В процессе исследований использовались наведенные магнитные свойства сульфида железа с целью определения влияния различных способов рудоподготовки на раскрытие зерен пирита и магнетита методом магнитной сепарации руды различной крупности.

Две параллельные пробы после дробления в аппаратах подвергали сухой магнитной сепарации с помощью ручного лабораторного магнита типа МРП (напряженность поля 26586 А/м), разделяли на классы крупности, в которых анализировали содержание основных элементов. Для оценки селективности дезинтеграции геоматериала использован числовой критерий

$G_i = \gamma_i(\beta_i / \alpha - 1)$, где $\beta_i$ — содержание данного компонента в *i*-м классе; $\alpha$ — содержание этого же компонента в продукте; $\gamma_i$ — выход класса [7 – 9]. Результаты магнитной сепарации представлены в табл. 1 и 2.

ТАБЛИЦА 1. Распределение Pb по классам крупности руды, %

| Исходный класс, мм | Магнитная фракция | | | | Немагнитная фракция | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Выход | Содержание | Извлечение | Селективность | Выход | Содержание | Извлечение | Селективность |
| Дробилка | | | | | | | | |
| –5.0+2.5 | 6.28 | 12.15 | 3.83 | –2.45 | 11.28 | 19.04 | 10.78 | –0.50 |
| –2.5+1.60 | 7.19 | 9.81 | 3.54 | –3.65 | 13.20 | 16.63 | 11.02 | –2.18 |
| –1.60+0.63 | 5.30 | 8.45 | 2.25 | –3.05 | 14.12 | 21.41 | 15.17 | 1.06 |
| –0.63+0.315 | 3.65 | 10.41 | 1.91 | –1.74 | 11.65 | 31.85 | 18.63 | 6.98 |
| –0.315+0.0 | 4.36 | 12.42 | 2.72 | –1.64 | 22.97 | 26.13 | 30.14 | 7.17 |
| Сумма | 26.78 | 10.60 | 14.25 | –12.53 | 73.22 | 23.32 | 85.74 | 12.53 |
| Пресс | | | | | | | | |
| –5.0+2.5 | 2.12 | 6.74 | 0.68 | –1.43 | 9.56 | 12.77 | 5.85 | –3.70 |
| –2.5+1.60 | 4.08 | 10.49 | 2.06 | –2.03 | 17.55 | 16.00 | 13.47 | –4.08 |
| –1.60+0.63 | 3.89 | 9.04 | 1.68 | –2.20 | 13.59 | 21.84 | 14.24 | 0.65 |
| –0.63+0.315 | 5.69 | 9.31 | 2.53 | –3.15 | 27.26 | 31.77 | 41.53 | 14.27 |
| –0.315+0.0 | 1.17 | 5.48 | 0.31 | –0.86 | 15.10 | 24.37 | 17.65 | 2.55 |
| Сумма | 16.95 | 8.95 | 7.26 | –9.67 | 83.05 | 23.28 | 92.74 | 9.68 |

ТАБЛИЦА 2. Распределение Zn по классам крупности руды, %

| Исходный класс, мм | Магнитная фракция | | | | Немагнитная фракция | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Выход | Содержание | Извлечение | Селективность | Выход | Содержание | Извлечение | Селективность |
| Дробилка | | | | | | | | |
| –5.0+2.5 | 6.28 | 10.39 | 6.44 | 0.15 | 11.28 | 9.20 | 10.23 | –1.05 |
| –2.5+1.60 | 7.19 | 9.21 | 6.53 | –0.66 | 13.20 | 8.06 | 10.50 | –2.71 |
| –1.60+0.63 | 5.30 | 9.15 | 4.78 | –0.52 | 14.12 | 9.89 | 13.77 | –0.35 |
| –0.63+0.315 | 3.65 | 9.71 | 3.49 | –0.15 | 11.65 | 11.69 | 13.43 | 1.78 |
| –0.315+0.0 | 4.36 | 7.74 | 3.33 | –1.03 | 22.97 | 12.13 | 27.47 | 4.51 |
| Сумма | 26.78 | 9.30 | 24.58 | –2.21 | 73.22 | 10.44 | 75.41 | 2.20 |
| Пресс | | | | | | | | |
| –5.0+2.5 | 2.12 | 5.78 | 1.32 | –0.80 | 9.56 | 5.32 | 5.48 | –4.07 |
| –2.5+1.60 | 4.08 | 6.98 | 3.08 | –1.01 | 17.55 | 7.90 | 14.96 | –2.59 |
| –1.60+0.63 | 3.89 | 7.17 | 3.01 | –0.88 | 13.59 | 8.44 | 12.37 | –1.23 |
| –0.63+0.315 | 5.69 | 7.09 | 4.34 | –1.34 | 27.26 | 10.85 | 31.90 | 4.65 |
| –0.315+0.0 | 1.17 | 5.15 | 0.65 | –0.52 | 15.10 | 14.06 | 22.89 | 7.80 |
| Сумма | 16.95 | 6.78 | 12.40 | –4.55 | 83.05 | 9.78 | 87.60 | 4.56 |

В процессе магнитной сепарации, помимо свободных зерен пирита и магнетита, в концентрат извлекаются их сростки с немагнитными минералами свинца и цинка, что повышает выход магнитного продукта в концентрат, но ухудшает его качество. Из приведенных данных видно, что суммарный выход магнитной фракции пресса почти на 10 % ниже, чем для дробилки, соответственно на столько же выше выход немагнитной фракции. При этом за счет меньшего содержания немагнитных минералов свинца и цинка в магнитной фракции их извлечение для пресса практически в 2 раза ниже, хотя в работе дробилки также велика доля объемного сжатия.

Полученный результат магнитной сепарации можно объяснить лучшим раскрытием минералов при прессовом измельчении и, следовательно, относительным уменьшением количества сростков. Улучшение раскрытия приводит к лучшему разделению при одних и тех же параметрах магнитного поля, что согласуется с результатами [8 – 9]. Наглядно это продемонстрировано на рис. 3.

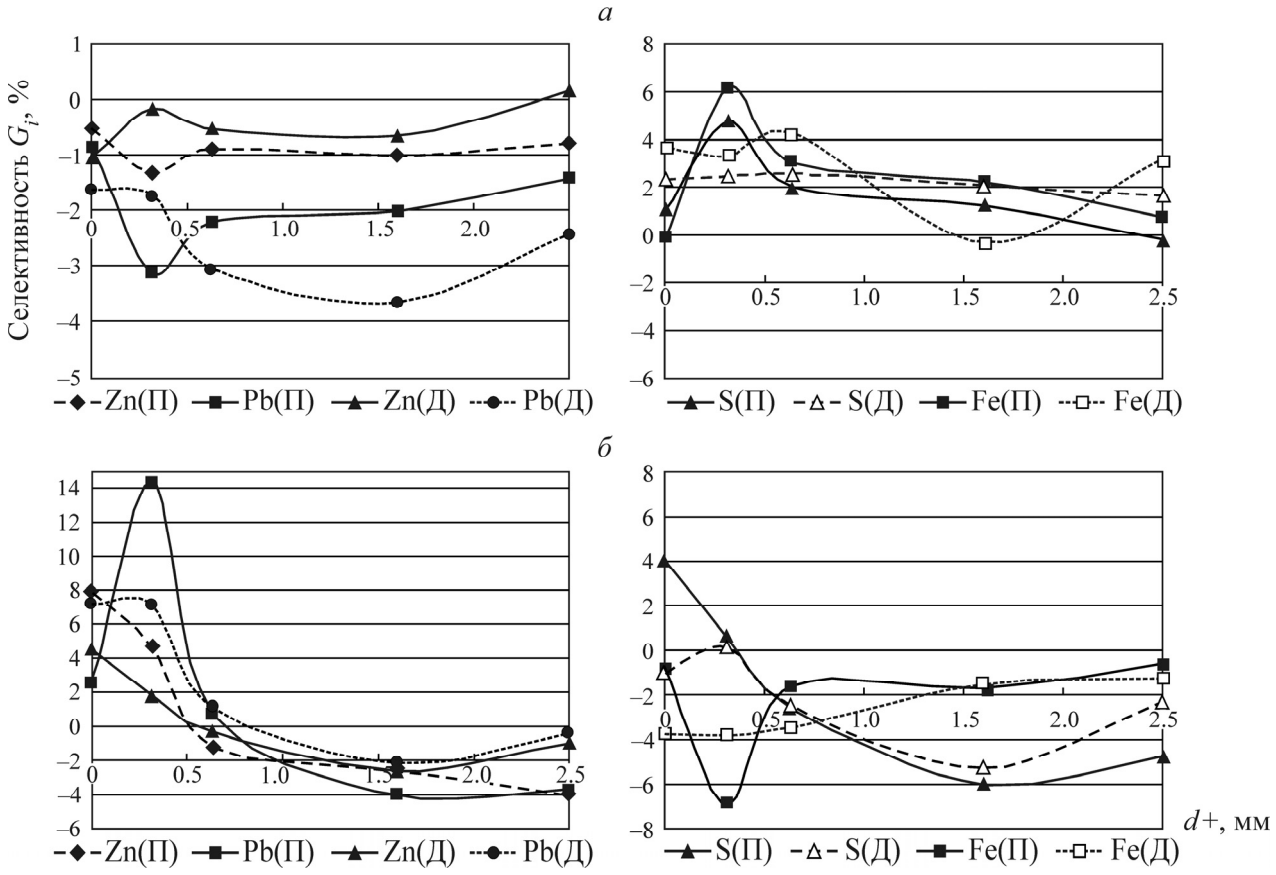


Рис. 3. Распределение элементов по магнитным (*а*) и немагнитным (*б*) фракциям руды (П — пресс, Д — дробилка)

Расчеты селективности распределения показывают, что селективно вскрытые минералы свинца и цинка, не связанные с железными, не будут извлекаться в магнитную фракцию и переходят в немагнитную, тогда как минералы железа переходят в магнитную фракцию под действием магнитного поля. В магнитном поле магнитные минералы в сростках увлекают с собой частицы породы, таким образом увеличивается выход магнитного продукта, но снижается его качество.

Особый интерес представляют результаты флотации — процесса, традиционно используемого при обогащении свинцово-цинковых руд. Для флотации каждый продукт рассева додрабливался в соответствующем аппарате (пресс или дробилка) до флотационной крупности (– 100 + 0 мм) с предварительным отсевом готового класса перед каждым циклом.

Флотация всех проб проводилась в строго одинаковых условиях: 50 г продукта делили квартованием на две порции по 25 г и флотировали в ячейке вместимостью 100 мл в режиме, установленном в предварительных опытах. Вначале замачивали 15 мин, кондиционировали 5 мин с бутиловым ксантогенатом (100 г/т) и 1 мин со вспенивателем Т-80 (100 г/т), а затем подавали воздух и вели пеносъем в течение 5 мин. После сушки и взвешивания продуктов коллективной флотации оценивали сходимость результатов параллельных опытов, при необходимости опыты повторяли. Затем одноименные параллельные продукты объединяли, определяли их гранулометрический состав и содержание основных элементов. Результаты экспериментов приведены в табл. 3 и 4.

ТАБЛИЦА 3. Распределение Pb по классам крупности руды, %

| Исходный класс, мм | Флотоконцентрат | | | | Хвосты флотации | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Выход | Содержание | Извлечение | Селективность | Выход | Содержание | Извлечение | Селективность |
| Пресс | | | | | | | | |
| −5.0 + 2.5 | 6.82 | 32.67 | 11.70 | 4.88 | 12.78 | 2.46 | 1.65 | −11.13 |
| −2.5 + 1.60 | 6.94 | 34.54 | 12.58 | 5.64 | 12.39 | 2.29 | 1.49 | −10.90 |
| −1.60 + 0.63 | 7.84 | 40.16 | 16.53 | 8.69 | 11.56 | 2.31 | 1.40 | −10.16 |
| −0.63 + 0.315 | 9.08 | 44.32 | 21.12 | 12.04 | 10.15 | 2.54 | 1.35 | −8.80 |
| −0.315 + 0.0 | 13.48 | 43.84 | 31.02 | 17.54 | 8.96 | 2.46 | 1.16 | −7.80 |
| Сумма | 44.16 | 40.10 | 92.95 | 48.80 | 55.84 | 2.41 | 7.05 | −48.79 |
| Дробилка | | | | | | | | |
| −5.0 + 2.5 | 7.62 | 41.77 | 16.23 | 8.61 | 11.85 | 1.93 | 1.17 | −10.68 |
| −2.5 + 1.60 | 7.76 | 41.32 | 16.35 | 8.59 | 12.52 | 2.14 | 1.37 | −11.30 |
| −1.60 + 0.63 | 7.89 | 43.92 | 17.67 | 9.78 | 12.67 | 3.46 | 2.23 | −10.29 |
| −0.63 + 0.315 | 8.28 | 45.73 | 19.31 | 11.03 | 11.46 | 3.62 | 2.12 | −9.35 |
| −0.315 + 0.0 | 9.20 | 47.82 | 22.43 | 13.23 | 10.75 | 2.04 | 1.12 | −9.63 |
| Сумма | 40.75 | 44.27 | 91.99 | 51.24 | 59.25 | 2.65 | 8.01 | −51.25 |

При прессовой обработке сростки в большей степени разрушаются по поверхностям контакта минералов и в дальнейшем меньше подвергаются дополнительному разрушению. Как видно из данных табл. 3 и 4, различие механизмов дезинтеграции проявляется и в результатах флотационных опытов. Установлено, что флотация материала после прессового давления позволяет получить увеличение выхода пенного продукта с повышением извлечения полезных компонентов. При этом использование материала прессового дробления дает заметно больше пенного продукта при флотации за счет увеличения количества мелких зерен по сравнению с пенным продуктом флотации материала щековой дробилки. Также повышается качество продукта по цинку.

Рентгенофлюоресцентная спектроскопия концентрата и хвостов показала, что в коллективный пенный продукт выделяется основная часть сульфидов, причем вместе со сфалеритом и галенитом в пену попадает большое количество пирита, который при флотации не подавлялся известью. В результате, как следствие селективного раскрытия минералов, происходит разубо-

живание концентрата железными минералами. Поэтому при прессовом дроблении содержание цинка и свинца в коллективном концентрате и извлечение ценных минералов, как и всех сульфидов, несколько выше.

ТАБЛИЦА 4. Распределение Zn по классам крупности руды, %

| Исходный класс, мм | Флотоконцентрат | | | | Хвосты флотации | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Выход | Содержание | Извлечение | Селективность | Выход | Содержание | Извлечение | Селективность |
| Пресс | | | | | | | | |
| –5.0+2.5 | 6.82 | 6.24 | 4.60 | –2.22 | 12.78 | 4.85 | 6.70 | –6.08 |
| –2.5+1.60 | 6.94 | 7.63 | 5.72 | –1.22 | 12.39 | 6.89 | 9.22 | –3.17 |
| –1.60+0.63 | 7.84 | 8.07 | 6.84 | –1.00 | 11.56 | 7.86 | 9.82 | –1.74 |
| –0.63+0.315 | 9.08 | 10.34 | 10.14 | 1.06 | 10.15 | 11.83 | 12.97 | 2.82 |
| –0.315+0.0 | 13.48 | 13.96 | 20.33 | 6.85 | 8.96 | 14.12 | 13.67 | 4.71 |
| Сумма | 44.16 | 9.98 | 47.63 | 3.46 | 55.84 | 8.68 | 52.38 | –3.46 |
| Дробилка | | | | | | | | |
| –5.0+2.5 | 7.62 | 7.95 | 6.58 | –1.04 | 11.78 | 7.75 | 9.92 | –1.86 |
| –2.5+1.60 | 7.76 | 7.31 | 6.17 | –1.59 | 12.61 | 9.29 | 12.73 | –0.12 |
| –1.60+0.63 | 7.89 | 7.62 | 6.53 | –1.36 | 12.68 | 10.92 | 15.04 | 2.37 |
| –0.63+0.315 | 8.28 | 8.46 | 7.61 | –0.67 | 11.74 | 11.52 | 14.70 | 2.96 |
| –0.315+0.0 | 9.20 | 9.67 | 9.67 | –0.47 | 10.45 | 11.35 | 12.89 | 2.44 |
| Сумма | 40.75 | 8.26 | 36.56 | –5.17 | 59.25 | 9.85 | 63.44 | 5.17 |

Результаты расчета селективности флотационного разделения минералов проб руды –100 мкм, подготовленных из каждого класса дробленых материалов, представлены на рис. 4.

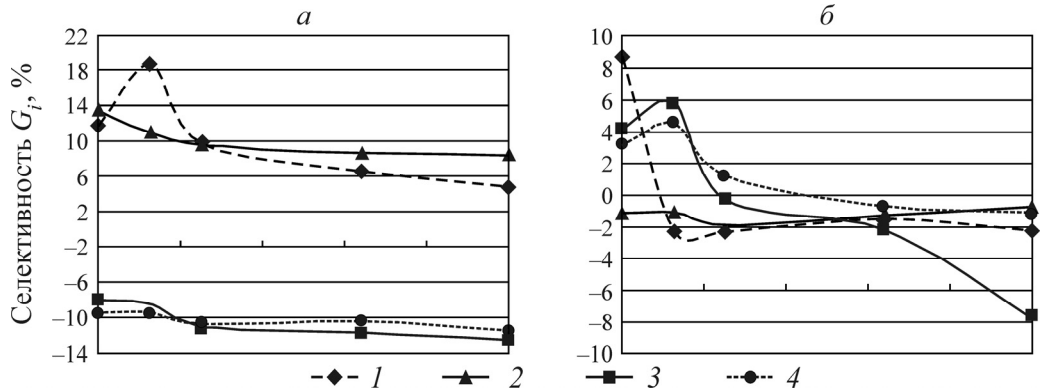


Рис. 4 Влияние метода дезинтеграции руды на результаты ее флотации: *а* — распределение Pb; *б* — распределение Zn: *1* — концентрат пресса; *2* — концентрат дробления; *3* — хвосты пресса; *4* — хвосты дробления

Таким образом, при проведении стандартного флотационного обогащения руды, подготовленной методом объемного сжатия, следует ожидать повышения эффективности процесса разделения минералов и получения селективных концентратов.

**ВЫВОДЫ**

Представлен механизм дезинтеграции полиметаллической руды, измельченной двумя методами: в дробилке и на гидравлическом прессе. Разрушение частиц руды в дробилке происходит практически неселективно, независимо от структурных особенностей минерального состава, трещиноватости, поверхностей срастания минералов. Более высокая селективность раскрытия сульфидных минералов при прессовом дроблении приводит к повышению извлечения минералов сфалерита и галенита в коллективный концентрат и соответствующему изменению его качества.

Установлено изменение состояния кристаллических частиц минеральных материалов и образование свободных зерен после дезинтеграции различными методами. Дано подтверждение полученных ранее сведений о высокой селективности прессового дробления. Доказано положительное влияние механизма объемного сжатия на эффективность последующего процесса обогащения, что помогает сравнить аппараты при выборе технологии и оборудования с точки зрения рудоподготовки и селективности раскрытия минералов.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. **Селективное разрушение** минералов / В. И. Ревнивцев, Г. В. Гапонов, Л. П. Зарогатский и др. — М.: Недра, 1988. — 286 с.
2. **Федотов П. К.** Разрушение руды в роллер-прессе. — М.: Геоинформмарк, 2006. — 128 с.
3. **Федотов П. К.** Моделирование процесса разрушения руды в слое частиц под давлением // ФТПРПИ. — 2014. — № 4. — С. 71 – 77.
4. **Хопунов Э. А.** Селективное разрушение минерального и техногенного сырья. — Екатеринбург: ООО “УИПЦ”-2013. — 429 с.
5. **Herbst J. A., Mular M. A., Pate W. T., and Qiu X.** Detalited modeling of an HPGR/HRC for prediction of plant scale unit performance, International Autogenous Grinding Semiautogenous Grinding and High Pressure Grinding Roll Technology, 2011. — P. 46 – 47.
6. **Kalala J. T., Dong H., and Hinde A. L.** Using piston-die press to predict the breakage behavior of HPGR, International Autogenous Grinding Semiautogenous Grinding and High Pressure Grinding Roll Technology, 2011. — P. 60 – 75.
7. **Краснов Г. Д., Чихладзе В. В.** Дробление рудных материалов методом объемного сжатия // Материалы 1-го Междунар. науч.-практ. семинара памяти В. А. Олевского “Проблемы дезинтеграции минерального и техногенного сырья в горной промышленности и строительной индустрии”. — Ставрополь, 2007. — С. 21 – 26.
8. **Краснов Г. Д., Подгаецкий А. В., Чихладзе В. В.** Опыт моделирования процесса дробления в роллер-прессе // ГИАБ. — 2009. — Т. 14. — № 12. — С. 89 – 102.
9. **Кузнецова И. Н., Лавриненко А. А., Чихладзе В. В.** О селективности разделения сфалеритовой руды при магнитном и флотационном обогащения полиметаллической руды // Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых. — М: ИПКОН РАН, 2015. — С. 282 – 288.
10. **Краснов Г. Д., Чихладзе В. В., Богданович А. В., Кузьмин И. В.** Технологическая характеристика геоматериалов, дезинтегрированных методом объемного сжатия // Горн. журн. — 2012. — № 8. — С. 102 – 107.

*Поступила в редакцию 7/VII 2016*