

УДК 622.53

**А. В. КУПЦОВА, О. П. МЕЗЕНЦЕВА** (ЗАО «НПО «РИВС»)**А. Н. ХРАМОВ** (ЗабГУ)

## ПРИМЕНЕНИЕ МИНЕРАЛОГО-АНАЛИТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ РАСКРЫТИЯ МИНЕРАЛОВ



**А. В. КУПЦОВА,**  
минералог



**О. П. МЕЗЕНЦЕВА,**  
минералог,  
канд. геол.-минерал. наук



**А. Н. ХРАМОВ,**  
доцент,  
канд. техн. наук

*В статье приведены результаты применения минералого-аналитических методов определения параметров раскрытия минералов на примере полиметаллического месторождения Корбалихинское. Проведено детальное изучение текстурно-структурных особенностей, выполнен анализ раскрываемости ценных минералов, а также расчет порционной контрастности по данным минералогического анализа с применением специализированной программы автоматического анализа изображений «Минерал С7».*

**Ключевые слова:** полиметаллические руды, структура, текстура, раскрываемость минералов, порционная контрастность, автоматический анализ изображения.

Эффективность любой технологии обогащения полезных ископаемых определяется двумя основными факторами: степенью раскрытия ценных минералов в поступающем на обогащение сырье и совершенством техники и технологии непосредственно процесса обогащения.

При подготовке исходного материала для флотационного обогащения определяется область оптимальных параметров процесса измельчения руды, характеризующаяся максимальной степенью раскрытия и минимальной степенью перехода ценного минерала в труднообогатимый класс крупности (шламы). Это наиболее актуально при исследовании измельчаемости и раскрываемости полиметаллических руд, которые, помимо многокомпонентного состава полезных минералов, отличаются неравномерным взаимопорастанием минералов, характером вкрапленности и различной крупностью полезных минералов.

В практике работы технологических лабораторий оптимальную конечную или промежуточную крупность измельченного по-

лезного ископаемого выбирают на основании полученных опытных технологических показателей.

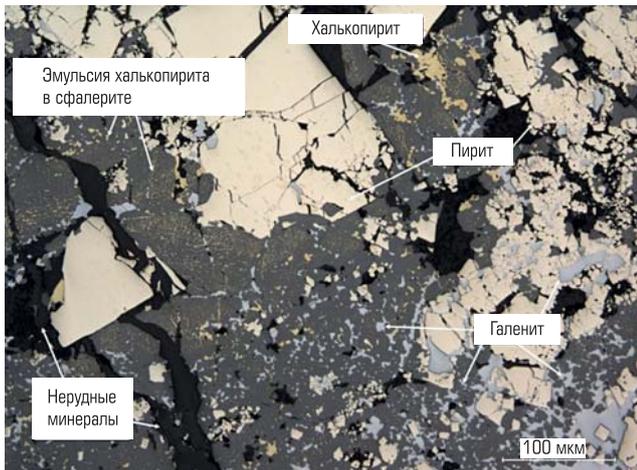
Область оптимальных параметров процесса измельчения руды можно спрогнозировать при обработке данных, полученных в результате минералогического анализа с применением современных систем анализа микроизображений.

В минералогической лаборатории ЗАО «НПО «РИВС» были проведены исследования вещественного состава полиметаллической руды Корбалихинского месторождения. Минераграфическое изучение руды выполнено с помощью бинокля Leica MZ 16, микроскопа Olympus BX51, снабженного цифровой камерой SIMAGIS 2P-3C и микроскопа Leica DM4500P, оснащенного цифровой камерой Leica DFC490. Для получения статистически достоверной информации при исследовании продуктов измельчения применяли специализированную программу автоматического анализа изображений «Минерал С7». Это позволяет получать на базе имеющегося широкого выбора геометрических и морфологических параметров информацию о минеральном и гранулометрическом составе: размер зерен, распределение минералов в сростках, их качественно-количественное соотношение, долю раскрытых зерен минералов.

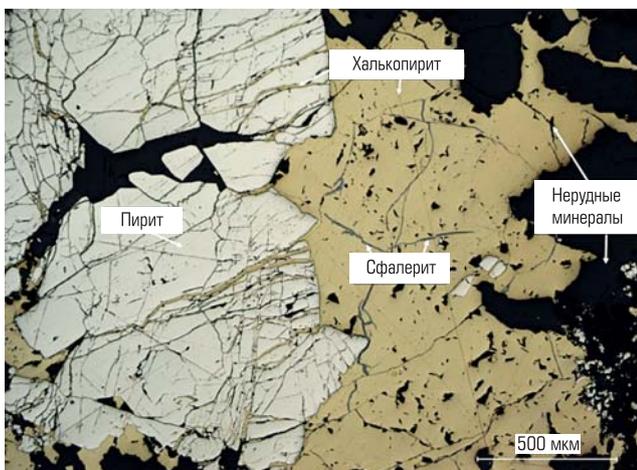
Руда Корбалихинского месторождения представлена крепкими породами, иногда трещиноватыми, имеющими сплошные вкрапленные, гнездово-вкрапленные (пятнистые), прожилковые, прожилково-вкрапленные и брекчиевые текстуры.

Структуры руд отличаются большим разнообразием, взаимодействием и наложением друг на друга. Широко проявлены структуры, неблагоприятные для флотационного обогащения, — катакластические, коррозионные, коллоидные, распада твердых растворов. Границы сростаний минералов в этих структурах неровные, что затрудняет высвобождение последних при измельчении руды (рис. 1–5).

Главные рудные минералы представлены пиритом (17,5 %), сфалеритом (9,6 %), галенитом (2,8 %), халькопиритом (2,5 %). На массовую долю вторичных минералов меди (ковеллина, халькозина, борнита) приходится 0,15 %. Из нерудных минералов (67,3 %) основную массу составляют доломит, кальцит, магнизи-



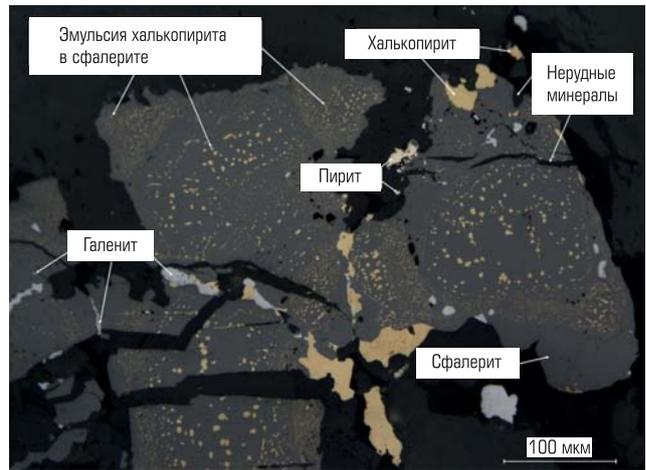
**Рис. 1. Характерные сростания сульфидных минералов руды Корбалихинского месторождения. Отраженный свет, николи параллельны**



**Рис. 2. Сочетание структур катаклизическое, замещения (катаклазированные агрегаты пирита замещаются по трещинам халькопиритом, по трещинам халькопирита развиваются вторичные минералы меди — халькозин и ковеллин) и разведения (агрегат халькопирита «разъедается» нерудным минералом). Отраженный свет, николи параллельны**

альные силикаты и кварц. В небольшом количестве присутствуют алюмосиликаты магния, слюды; отмечены альбит, плагиоклазы, барит, акцессорные минералы (титанит, рутил и др.) и гидроксиды.

Руда Корбалихинского месторождения характеризуется сложным, тонким взаимным сростанием зерен минералов. Для нее свойственно тесное сростание сульфидов цинка и меди. Это выражено в широком распространении структуры распада твердого раствора халькопирита в сфалерите, при этом халькопирит имеет субмикроскопические размеры (см. рис. 3). Это проявляется также в тонких прорастаниях сфалерита в виде нитеобразных выделений в агрегатах халькопирита (см. рис. 2, 4). Для галенита характерны тонкозернистые пойкилитовые выделения, имеющие размер от сотых долей до единиц микрометра (см. рис. 1, 5). Часть пирита имеет неоднородное строение. Он на-



**Рис. 3. Структура распада твердого раствора (эмульсия халькопирита в сфалерите), коррозионная микротекстура (агрегат сфалерита «разъедается» нерудным минералом). Отраженный свет, николи параллельны**



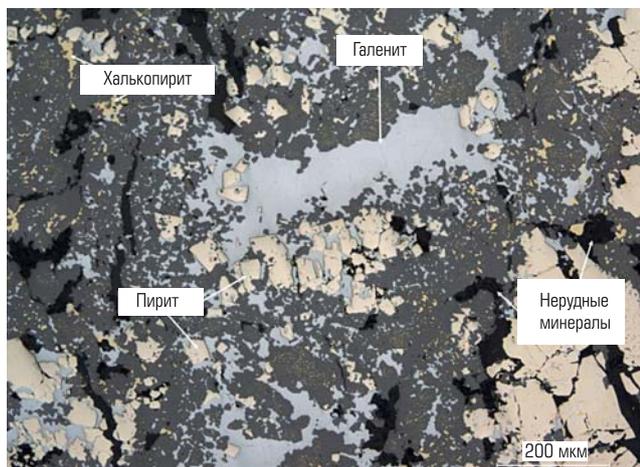
**Рис. 4. Коррозионные структуры: халькопирит развивается по трещинам в сфалерите и замещается вторичными минералами меди — халькозином и ковеллином. Отраженный свет, николи параллельны**

блюдается в коллоидных структурах в тонких сростках с галенитом и сфалеритом.

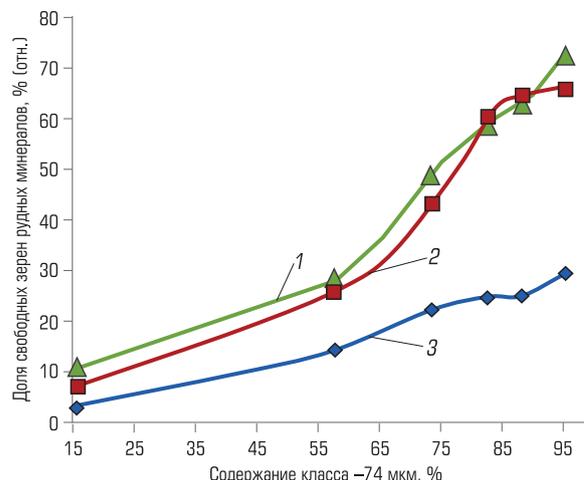
Подобные особенности руды Корбалихинского месторождения, неблагоприятные для обогащения, будут осложнять получение чистых концентратов, и поэтому требуют внимательного подхода к выбору оптимальной крупности измельченной руды.

В **таблице** приведен результат исследования исходной руды, дробленной до крупности –2 мм (15,7 % класса –0,074 мм) на оптическом микроскопе Olympus BX51 с применением программы автоматического анализа изображений «Минерал С7». Как видно, в исходной руде указанной крупности, рудные минералы раскрыты не более чем на 11% (отн.).

В ходе измельчения исходной руды Корбалихинского месторождения изучена динамика раскрытия минеральных сростков.



**Рис. 5.** Коррозионная структура. Галенит «разъедает» агрегаты пирита и сфалерита. Отраженный свет, николи параллельны

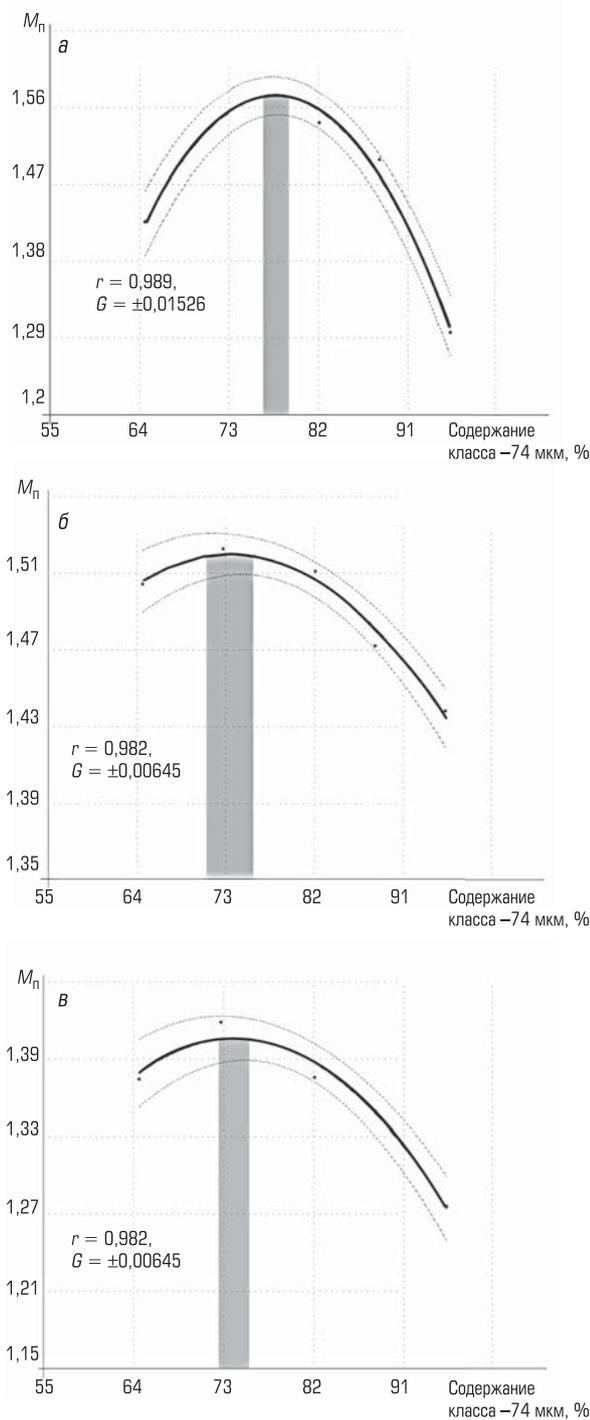


**Рис. 6.** Доля свободных зерен рудных минералов (% отн.) в руде в зависимости от содержания класса -74 мкм, %:

1 — халькопирит; 2 — галенит; 3 — сфалерит

**Количественное соотношение и степень раскрытия главных рудных минералов в пробе руды Корбалихинского месторождения**

Минерал	Содержание, %		Распределение минералов по классам крупности (мкм), %				
	абс.	отн.	<10	10-40	40-74	74-100	>100
<i>Сфалерит</i>	9,65	100					
Свободные зерна	0,27	2,75	25,2	32,6	42,2	0	0
В сростках с:							
пиритом	0,03	0,3	31	69	0	0	0
галенитом	0,14	1,46	4,7	9,6	1,9	83,8	0
халькопиритом	0,6	6,17	3,8	9,7	2,7	5,6	78,2
нерудными минералами	0,14	1,49	9,2	41,9	48,9	0	0
Полиминеральные сростки	8,48	87,83	2,2	14	13,2	4,2	66,4
<i>Галенит</i>	2,82	100					
Свободные зерна	0,2	7,14	29	17,8	3	27,3	22,9
В сростках с:							
пиритом	0,18	6,32	8,7	3,7	87,6	0	0
сфалеритом	0,12	4,39	7,8	11,2	0	81	0
нерудными минералами	0,05	1,87	35	65	0	0	0
Полиминеральные сростки	2,26	80,27	12	31,3	11,2	4	41,5
<i>Халькопирит</i>	2,45	100					
Свободные зерна	0,27	10,92	1,3	81,8	2,3	4,8	9,8
В сростках с:							
пиритом	0,01	0,46	1,9	98,1	0	0	0
сфалеритом	0,4	16,3	18,3	9	0	0	72,7
ковеллином (халькозином, борнитом)	0,65	26,38	0	0	4,3	0	95,7
нерудными минералами	0,04	1,7	8,9	77,7	0	13,4	0
Полиминеральные сростки	1,08	44,24	8,2	21,8	8,3	0,6	61,1
Пирит	17,5						
Нерудные минералы	67,34						



**Рис. 7. Изменение показателя порционной контрастности халькопирита (а), галенита (б) и сфалерита (в) от содержания класса –74 мкм (штриховые линии — доверительные границы (по Стьюденту с вероятностью P = 0,95))**

Зависимость степени раскрытия полезных минералов от содержания класса –74 мкм в руде приведена на **рис. 6**.

Существенно меньшая степень раскрытия сфалерита объясняется тем, что часть его зерен «пропитана» халькопиритом

эмульсионной вкрапленности (структура распада твердого раствора) (см. рис. 1, 3). Отметим, что рис. 6 показывает только динамику раскрытия минералов, но не отражает распределение зерен по крупности и не учитывает выход шламовой фракции.

Как известно, для каждого метода обогащения или обогатительного аппарата существует свой оптимальный диапазон крупности исходного питания [1]. В частности, при обогащении руд в пневмомеханических флотационных машинах нижней границей крупности принимается 10 мкм.

Представляется, что одним из перспективных подходов при поиске оптимальных параметров подготовительных процессов является метод количественного контроля перехода ценного минерала за нижнюю границу технологического или машинного класса крупности с использованием в качестве критерия раскрываемости минерала — показателя контрастности.

Показатель контрастности отражает различие кусков или частиц по содержанию в них ценного компонента. Количественной характеристикой контрастности пробы является средневзвешенное отклонение содержания ценного компонента во фракциях (кусках) от среднего содержания в пробе. Показатель контрастности в зависимости от степени раскрытия ценного компонента изменяется в пределах от 0 до 2 [2]. Чем больше степень измельчения, тем выше степень раскрытия ценного компонента и, соответственно, показатель контрастности. Данная зависимость определяет динамику процесса и категорию (класс) измельчаемости или раскрываемости, но по причине отсутствия экстремумов не определяет численные оптимальные параметры процесса измельчения.

В работе [3] показано, что если при расчете показателя контрастности объединить зерна ценных минералов и вмещающих пород крупностью, меньшей нижней границы диапазона крупности исходного питания обогатительного аппарата (10 мкм) в шламовую фракцию, выход и содержание ценного компонента в которой по мере измельчения увеличиваются, то на графике зависимости показателя порционной контрастности  $M_n$  от продолжительности измельчения (или выхода класса –74 мкм) появится экстремум, который определяет численные оптимальные параметры процесса измельчения руды. Расчет в этом случае производится по формуле

$$M_n = \frac{\sum_1^n |(\beta_i - \alpha)\gamma_i|}{100 \cdot \alpha} + \frac{|\beta_{шл} - \alpha| \gamma_{шл}}{100 \cdot \alpha},$$

где  $n$  — число кусков (фракций), составляющих пробу без шламовых составляющих;  $\alpha$ ,  $\beta_i$ ,  $\beta_{шл}$  — содержание ценного компонента в исходной пробе, во фракции и в объединенной шламовой фракции соответственно, %;  $\gamma_{шл}$  — выход объединенной шламовой фракции от общей массы изучаемой пробы, %.

Зависимость показателя порционной контрастности частиц халькопирита, галенита и сфалерита от содержания класса –74 мкм в измельченной руде приведена на **рис. 7**.

Проведенные исследования показали, что оптимальная степень раскрытия минералов происходит при содержании класса –74 мкм: для халькопирита — 76–80 %; галенита — 72–75 %; сфалерита — 73–75 %. Эти данные согласуются с выбранными параметрами измельчения при разработке эффективной технологии обогащения руды Корбалихинского месторождения.

### Выводы

Руда Корбалихинского полиметаллического месторождения характеризуется тонким взаимопроращением зерен сульфидных минералов между собой и породообразующими минералами. Широкое распространение неблагоприятных структур, а также недостаточное раскрытие ценных минералов в исходной руде предопределяет необходимость ее тонкого измельчения перед флотацией.

С целью определения оптимального соотношения «максимальная степень раскрытия — минимальная степень переизмельчения частиц» рассчитан показатель порционной контрастности — впервые с применением оптических методов минералогического анализа для полиметаллического месторождения. Это позволило количественно определить критическую границу перехода ценных минералов в труднообогатимые шламы и выявить оптимальные параметры измельчения.

Таким образом, комплексное минералогическое исследование, включающее изучение текстурно-структурных особенностей,

изучение кинетики раскрытия ценных минералов с помощью компьютеризованных систем анализа микроизображения, а также математическую обработку данных минералогического анализа по расчету порционной контрастности позволяет, по мнению авторов, дать аргументированную оценку параметров измельчения исходной руды полиметаллического Корбалихинского месторождения.

### Библиографический список

1. Козин В. З. Закономерности раскрытия минеральных фаз и формы их представления и использования // Материалы междунар. совещания «Плаксинские чтения-2010». — Казань — Москва, 2010. С. 117–120.
2. Мокроусов В. А., Лилеев В. А. Радиометрическое обогащение нерадиоактивных руд. — М.: Недра, 1979.
3. Храмов А. Н. Алгоритм исследования раскрываемости ценных компонентов и его технологические возможности применения при измельчении руд // Вестник ЧитГУ. 2012. № 2 (81). С. 36–41. [ГЖ](#)

Купцова Адиля Владимировна,  
Мезенцева Оксана Петровна:  
e-mail: rivs@rivs.ru  
Храмов Анатолий Николаевич,  
тел.: +7-914-365-69-70

### "GORNYI ZHURNAL"/"MINING JOURNAL", 2014, № 11, pp. 35–39

Title	Application of mineralogical-analytical methods of definition of mineral exposure parameters
Author 1	Name & Surname: <b>Kuptsova A. V.</b>
	Company: <b>RIVS Science and Production Association (Saint-Petersburg, Russia)</b>
	Work Position: <b>Mineralogist</b>
	Contacts: <b>e-mail: rivs@rivs.ru</b>
Author 2	Name & Surname: <b>Mezentseva O. P.</b>
	Company: <b>RIVS Science and Production Association (Saint-Petersburg, Russia)</b>
	Work Position: <b>Mineralogist</b>
	Scientific Degree: <b>Candidate of Geological and Mineralogical Sciences</b>
Author 3	Name & Surname: <b>Khramov A. N.</b>
	Company: <b>Transbaikal State University (Chita, Russia)</b>
	Work Position: <b>Assistant Professor</b>
	Scientific Degree: <b>Candidate of Engineering Sciences</b>
Abstract	<p>Efficiency of any technology in mineral beneficiation is mainly governed by two factors: level of dissociation of valued mineral components in feedstock and sophistication of dressing technology and equipment.</p> <p>Preparation of flotation feedstock includes estimation of optimality region of grinding process parameters, that is characterized by the maximum transition of commercial mineral to the difficult-to-process size category (slurry). This is the most topical in the analysis of grindability and dissociation property of complex ores that, aside from the multi-element composition of valuable minerals, feature nonuniform intergrowth of minerals, heterogeneous dissemination and various grain sizes.</p> <p>From experience, production laboratories select optimal final and intermediate size of a ground mineral based on actual production data. The optimality range for ore grinding parameters can be forecasted during processing of mineralogical analysis data obtained using advanced micro-imaging analysis systems.</p> <p>The mineralogical laboratory, RIVS, analyzed material constitution of Korbalikhinsky deposit complex ore. The mineralogical analysis used binocular microscope Leica MZ 16, microscope Olympus BX51 equipped with digital camera SIMAGIS 2P-3C and microscope Leica DM4500P with digital camera Leica DFC490. For the sake of statistical confidence, the analysis of the grinding product involved the dedicated automated image analysis program Mineral S7. As a result, based on a wide range of geometrical and morphological parameters, the data on mineral composition and grain-size composition of the studied ore samples were obtained: size of grains, mineral distribution in intergrown pieces, their qualitative/quantitative ratio, share of dissociated grains.</p>
Keywords	Complex ore, structure, texture, mineral dissociation ability, sample signature, automated image analysis.
References	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Kozin V. Z. Zakonomernosti raskrytiya mineralnykh faz i formy ikh predstavleniya i ispolzovaniya (Regularities of release of mineral phases and types of their presentation and use). Materialy mezhdunarodnogo soveshchaniya «Plaksinskie chteniya-2010» (Materials of international meeting "Plaksin readings-2010"). Kazan – Moscow, 2010. pp. 117–120.</li> <li>2. Mokrousov V. A., Lileev V. A. Radiometricheskoe obogashchenie neradioaktivnykh rud (Radiation separation of nonradioactive ores). Moscow : Nedra, 1979.</li> <li>3. Khramov A. N. Algoritm issledovaniya raskryvaemosti tsennykh komponentov i ego tekhnologicheskie vozmozhnosti primeneniya pri izmelchenii rud (Algorithm of research of release of valuable components and its technological possibilities of application in ore grinding time). Vestnik Chitinskogo Gosudarstvennogo Universiteta = Bulletin of Chita State University. 2012. No. 2 (81). pp. 36–41.</li> </ol>