

С. И. ЛЕБЕДЕВА

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МИКРОТВЕРДОСТИ  
ДЛЯ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ТИПОМОРФНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ РУДНЫХ МИНЕРАЛОВ**

При изучении вещественного состава руд сульфидных и некоторых других месторождений минералог часто не может исследовать полный химический состав рудных минералов, так как они находятся в тесных взаимных сростаниях или микровыделениях. По этой же причине почти невозможно индивидуализировать и их физические свойства, кроме оптических. Поэтому при выделении на месторождении различных генераций или разновидностей одного и того же минерала минералог-рудник до сих пор пользуется в основном лишь текстурно-структурным анализом, не имея возможности подтвердить это различием в физических свойствах.

В настоящее время для этих целей в минераграфии может быть использован относительно простой и методически достаточно разработанный метод микротвердости, который позволяет количественно измерить твердость любого минерала в предельно малых размерах (до 0,01 мм).

Детальные исследования последних лет (Бочарова, 1960; Лебедева, Разенкова, 1961; Лебедева, 1963, 1965) показали, что твердость минералов, измеренная этим методом, является функцией химического состава и структурных особенностей их, которые в совокупности отражают условия образования данного типа руд и месторождений. Так, известно, что состав некоторых минеральных рядов и серий (сфалериты, вольфрамиты, блеклые руды и др.), имеющих широкие вариации в содержании основных компонентов, зависит от состава рудообразующих растворов и от условий формирования месторождения. Поэтому количественно измеренная на приборе твердость (иначе микротвердость) минеральных видов может рассматриваться как надежный типоморфный признак этих минералов.

Кроме того, в последнее время устанавливается, что на твердость некоторых минералов влияют даже весьма незначительные примеси какого-либо элемента (или суммы примесей некоторых элементов), как, например: серебро и висмут — в галенитах (Лебедева, 1965, Мозгова, 1966), тантал и ниобий — в касситеритах (Максимюк, Лебедева, 1968). Построены различные диаграммы зависимости «состав — твердость» как для этих минералов, так и для изоморфных серий минералов, отмеченных выше.

Однако часто невозможно точно установить, какая именно причина (изменение основного химического состава, влияние ли изоморфных или мельчайших механических примесей, дефекты в структуре минерала и т. д.) обусловила изменение твердости в данном минерале или его генерации. Очевидно, что совокупность многих причин, действуя взаимозависимо, и обуславливает изменение величины твердости одного и того же минерала, образовавшегося в различных условиях.

Таким образом, систематическое исследование микротвердости минералов в конкретных месторождениях может дать в совокупности с другими

данными интересный материал для косвенного суждения об условиях образования определенного типа руд и месторождений.

Для примера можно привести проведенные нами исследования по изучению микротвердости сфалеритов и галенитов из различных генетических типов некоторых забайкальских полиметаллических месторождений, сфалеритов и галенитов из месторождений Туранглы в Средней Азии, а также пирротинов из Вавилонского месторождения Рудного Алтая.

Микротвердость измеряли в аншлифах или полированных брикетах из мелких дробленых зерен на приборе ПМТ-3.

Свинцово-цинковые месторождения Кличкинского рудного района интересны тем, что, являясь генетически едиными образованиями, они довольно существенно различны по структуре, вещественному составу руд и околорудным изменениям вмещающих пород. Основная причина этого, по данным Г. М. Мейтува, — различный состав вмещающих пород (гранитоиды, сланцы, карбонатные породы). Его исследования показали, что в зависимости от типа вмещающих пород меняются не только качественный состав парагенетических ассоциаций и количественные соотношения слагающих их минералов, но и их химический состав, а также физические свойства отдельных минералов, как рудных, так и жильных.

Наиболее показательными с этой точки зрения оказались главные рудные минералы — сфалерит и галенит, которые и были исследованы нами наиболее детально методом микротвердости. Основную массу цинковых руд в районе представляют сфалериты II генерации (или разновидности), которые характеризуются довольно высокими и крайне невыдержанными содержаниями железа (от 3 до 15%), кадмия (от 0,1 до 0,6%) и другими примесями (Кузнецов, Мейтув, 1967). Проведенные измерения их микротвердости показали (табл. 1, рис. 1), что микротвердость сфалеритов этой разновидности находится в обратной зависимости от содержания железа; это еще ранее отмечалось нами для забайкальских руд иного типа (Лебедева, 1963), а Г. И. Бочаровой (1960) и И. А. Пудовкиной (1957) — для сфалеритов из других районов. Кроме того, для этих сфалеритов выявлено, что их микротвердость находится в прямой зависимости от содержания кадмия<sup>1</sup> и цинка (рис. 2). Далее из табл. 1 и рис. 3 видно, что весь комплекс свойств — химических и физических (микротвердости) для сфалеритов и микротвердости — для галенитов отражает геологические условия образования месторождений.

Для сфалеритов II разновидности (по Г. М. Мейтуву) из месторождений, залегающих в сланцах (Почекуевское, Савинское 5, Чупинское), характерны самые высокие содержания железа (7,5—14,9%), самые низкие содержания кадмия (~0,1—0,2%), а соответственно, и самые низкие средние значения микротвердости ( $H_{\text{ср}} = 163—180 \text{ кг/мм}^2$ ). Для галенитов из главной стадии этих же месторождений характерны самые высокие средние значения микротвердости ( $78—82 \text{ кг/мм}^2$ ).

Для сфалеритов той же ассоциации из месторождений, залегающих в доломитах (Кличкинское, Мельниковско-Хоркиринское и Мелентьевское), характерны самые низкие содержания железа (2,5—5,5%), самые высокие содержания кадмия ( $\approx 0,3—0,5\%$ ) и самые высокие значения микротвердости ( $H_{\text{ср}} = 195—200 \text{ кг/мм}^2$ ); галенитам же, наоборот, присущи самые низкие значения микротвердости ( $H_{\text{ср}} = 67—72 \text{ кг/мм}^2$ ).

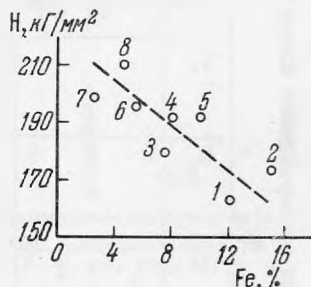


Рис. 1. Обратная зависимость микротвердости  $H_{\text{ср}}$  сфалеритов от содержания в них железа

1 — 8 — средние данные по месторождениям (см. табл. 1)

<sup>1</sup> График по кадмию приведен в работе К. Ф. Кузнецова и Г. М. Мейтува (1967).

Микротвердость сфалеритов и галенитов из различных свинцово-цинковых месторождений Кличкинского рудного района  
(Восточное Забайкалье)

Вмещающие породы	Месторождение (1—8)	Сфалериты						Галениты (главной стадии)		Примечание	
		парагенетическая ассоциация, по данным Г. М. Мейтуфа	цвет	микротвердость $H$ , $\mu\Gamma/\text{мм}^2$ (нагрузка 30—50 г)		содержание * (вес. %)		микротвердость $H$ , $\mu\Gamma/\text{мм}^2$ (нагрузка 15—20 г)			
				пределы изменения	среднее значение ( $H_{\text{ср}}$ )	Zn	Fe **	примечание	пределы изменения		среднее значение ( $H_{\text{ср}}$ )
Сланцы	Почекуевское (1)	Существенно сфалеритовая	Бурый до темно-бурого и черного	161—165	163	53,0	12,0	Широко проявлена эмульсионная вкрапленность пирротина и халькопирита	80—85	82	Присутствует и галенит II генерации; $H = 84—89$ ; $H_{\text{ср}} = 87 \mu\Gamma/\text{мм}^2$
	Савинское 5 (2)	То же	Черный до темно-бурого	161—183	171	49,4	14,9	То же	75—84	73	
	Чупинское (3)	»	Черный	165—194	180	45,6	7,5	»	—	—	
	Савинское	—	—	—	—	—	—	—	75—88	80	
Граниты	Северная Шахта (4)	Существенно сфалеритовая	Темно-бурый	178—201	191	53,3	8,2	Эмульсия пирротина и халькопирита, встречается достаточно часто	—	—	Присутствует и галенит II генерации; $H = 82—92$ ; $H_{\text{ср}} = 86 \mu\Gamma/\text{мм}^2$
	Каминское (5)	То же	То же	185—199	192	55,7	9,9	То же	71—81	76	
Доломиты	Кличкинское (6)	»	Черный с коричневатым оттенком	187—210	195	58,1	5,5	Эмульсия пирротина и халькопирита, встречается достаточно часто	60—74	67	—
	Мельниковско-Хоркиришское (7)	»	Темно-серый до черного	194—210	199	65,7	2,5	Редкая эмульсионная вкрапленность халькопирита и пирротина	63—77	72	—
	Мелентьевское (8)	»	Темно-коричневый и бурый	192—210	200	61,9	4,6	То же	—	—	—

\* Данные Г. М. Мейтуфа.

\*\* Железо — общее, без вычитания некоторой части Fe, которая связана с эмульсионной вкрапленностью халькопирита и пирротина.

Для месторождений, залегающих в гранитах (Каменское, Северная Шахта), характерны промежуточные значения микротвердости ( $H_{ср}$ ) как для сфалеритов (191—192  $\kappaГ/мм^2$ ), так и для галенитов (76  $\kappaГ/мм^2$ ).

Следует заметить, что если для сфалеритов мы можем достаточно уверенно связывать микротвердость и химизм как между собой, так и в зависимости от вмещающей породы (см. рис. 1—3), то для галенитов мы этого сделать не смогли, так как по составу они довольно однотонны: имеют небольшой размах варьирования

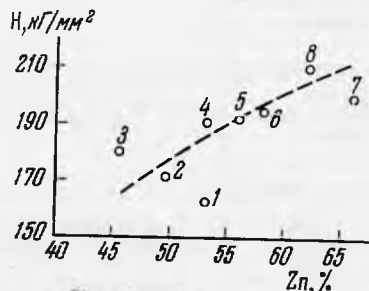


Рис. 2. Прямая зависимость микротвердости  $H_{ср}$  сфалеритов от содержания в них цинка (1—8, см. рис. 1)

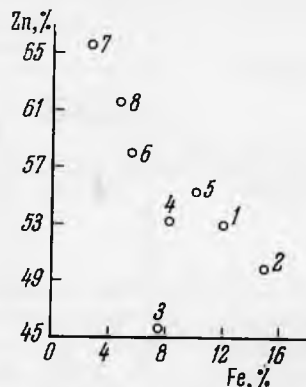


Рис. 3. Взаимозависимости содержания цинка и железа в сфалеритах (1—8, см. рис. 1)

элементов-примесей (Bi, Ag и др.) — от тысячных до первых десятых долей процента. По-видимому, на микротвердость галенитов влияет сумма факторов, физических и химических, отражающих различные условия их образования: разная плотность дислокаций, обусловленная различной степенью дефектов в структуре, и др.

На скарново-полиметаллическом месторождении Туранглы (Карамазар, Средняя Азия) галенит является главным рудным минералом. Проведенные нами минералогические исследования позволили по ряду признаков установить две его генерации. Первая генерация представлена мелкокристаллическим галенитом в ассоциации с пироксеновым и частично с гранат-пироксеновым скарном. Вторая генерация галенита имеет более ограниченное распространение и представлена крупнокристаллическими агрегатами, распределенными в эпидот-кальцитовых образованиях. Последние размещаются в виде гнезд и жилообразных тел по трещинам в пироксеновых и гранат-пироксеновых скарнах. В аншлифах под микроскопом видно, как крупнокристаллический галенит II генерации замещает тонкозернистую пироксен-галенитовую массу (галенит I генерации).

Выявленный спектральным анализом комплекс элементов-примесей в этих галенитах также различен: для галенита I генерации характерны кобальт, медь, серебро, висмут, цинк, кадмий — в тысячных и сотых долях процента; для галенита II генерации — серебро, висмут в сотых долях, а титан и медь — в тысячных долях процента. Измеренная при нагрузке 20 Г микротвердость существенно различалась для обеих генераций галенита: для I генерации она равнялась 60—68  $\kappaГ/мм^2$ , а для II генерации — 75—82  $\kappaГ/мм^2$ .

На Вавилонском медно-пирротиновом месторождении (Алтай) проведено детальное исследование моносulfидов железа ряда пирротин — троилит (Зленко, 1965). Установлено, что на этом месторождении в процессе рудообразования происходили переотложение и перекристаллизация моносulfидов железа, в которых постепенно возрастало содержание серы. Одновременно с изменением состава в них обнаружено и постепенное изменение оптических и других физических свойств. Выделены две разно-

видности пирротинов и троилит. В результате проведенных нами на этих образцах исследований микротвердости установлены характерные интервалы значений  $H$  для каждого типа пирротинов и троилита (табл. 2).

Таблица 2

Характеристика микротвердости сульфидов железа (группа пирротина) из Вавилонского месторождения (Алтай)

Минерал	Микротвердость $H$ , кг/мм <sup>2</sup> (нагрузка 30—50 Г)		Примечание
	пределы изменения	среднее арифметическое ( $H_{\text{ср}}$ )	
Троилит	192—277	$H_{\text{ср}} = 197$ (параллельно удлинению) $H_{\text{ср}} = 256$ (перпендикулярно удлинению)	Анизотропия I рода; коэффициент анизотропии $K_H = 1,30$
Пирротин I (тонко- и мелкозернистый)	240—307	$H_{\text{ср}1} = 226$ $H_{\text{ср}2} = 285$	Анизотропия II рода; коэффициент анизотропии $K_H = 1,46$
Пирротин II (средне- и крупнозернистый)	269—367	$H_{\text{ср}1} = 287$ $H_{\text{ср}2} = 340$	Анизотропия II рода; коэффициент анизотропии $K_H = 1,23$

#### ВЫВОДЫ

1. Метод микротвердости при микроскопических исследованиях может быть успешно использован для исследования типоморфных особенностей минералов — для выявления или подтверждения различных генераций либо разновидностей минералов, особенно рудных, когда последние находятся в тесных взаимных сростаниях или микровыделениях.
2. При анализе и сопоставлении различных генетических типов месторождений данные о микротвердости для некоторых групп минералов могут служить косвенным признаком для суждения о физико-химических условиях формирования руд.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Бочарова Г. И. О цинковых обманках Эльбрусского рудного поля (Кавказ). — Вестник МГУ, 1960, № 5.
- Зленко Б. Ф. Детальное исследование моносульфидов железа ряда троилит — пирротин на примере руд Вавилонского месторождения Алтая. — Сб. «Экспериментально-методические исследования рудных минералов». Изд-во «Наука», 1965.
- Ильинский Г. А. Определение микротвердости минералов методом вдавливания. Изд-во ЛГУ, 1963.
- Кузнецов К. Ф., Мейтув Г. М. Геохимия редких элементов в свинцово-цинковых месторождениях Восточного Забайкалья. Изд-во «Наука», 1967.
- Лебедева С. И., Разенкова Н. И. Закономерности изменения микротвердости минералов ряда колумбит — танталит в связи с их химическим составом. — Труды ИМГРЭ АН СССР, 1961, вып. 7.
- Лебедева С. И. Определение микротвердости минералов. Изд-во АН СССР, 1963.
- Лебедева С. И. О возможностях применения метода микровдавливания при минералогических исследованиях. — Труды ИМГРЭ АН СССР, 1963, вып. 18.
- Лебедева С. И. Применение метода микровдавливания (микротвердости) для исследования зависимости твердости от химического состава минералов. — Сб. «Минеральные микровключения». Изд-во «Наука», 1965.
- Мозгова Н. Н. Об отражательной способности, микротвердости и термо-э. д. с. висмут- и серебросодержащего галенита в связи с изоморфными примесями серебра и висмута. — Геология рудных месторождений, 1966, № 3.
- Максимюк И. Е., Лебедева С. И. Изучение физических свойств касситеритов с целью выяснения формы нахождения в них Та и Nb — Сб. «Физические свойства редкометаллических минералов и методы исследования». Изд-во «Наука», 1968.
- Пудовкина И. А. Точные методы определения отражательной способности и твердости рудных минералов. — В кн.: «Современные методы минералогического исследования горных пород, руд и минералов». Госгеолтехиздат, 1957.