

ЛИТЕРАТУРА

1. *Буткевич Г.Р.* Возможности расширения минеральной базы и прогнозирование развития подотраслей промышленности строительных материалов. *Строительные материалы.* № 2. 2007. С.10-11.
2. А.с. 457680 СССР. МКИ. С04В 27/04. Керамическая масса / *И.Ф. Проскура, Н.П., Вакарчук* // Открытия. Изобретения. 1975. № 3. С.54.
3. А.с. 924010 СССР. МКИ. С04В 33/00; С04В 35/16. Шихта для изготовления химически стойких изделий. / *Т.В. Басалкевич, Л.П. Черняк* // Открытия. Изобретения. 1982. № 16. С. 106.
4. А.с.1211241. СССР. МКИ. С04В 33/00. Керамическая масса для изготовления облицовочных плиток / *Ф.М. Оруджев, М.А. Исмаилов, Э.В. Авалова, Т.М. Мамедов, М.Э. Эфендиев, Ф.М. Лисов* // Открытия. Изобретения. 1986. № 6. С. 116.
5. *Соколов В.И.* Талько-хлоритовые сланцы Карелии и пути их комплексного использования. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1995. 126 с.
6. Химическая технология керамики. Под ред. Проф. *И.Я. Гузмана.* ООО РИФ «Стройматериалы», 2003. 496 с.
7. *Ильина В.П., Лебедева Г.А., Озерова Г.П., Инина И.С.* Использование техногенного минерального сырья Карелии для получения керамической плитки. *Строительные материалы.* 2006. С.47-49.
8. *Августиник А.И.* Керамика. Л.: Стройиздат, 1975. 590 с.
9. *Дир У.А., Хауи Р.А., Зусман Дж.* Породообразующие минералы. Т. 2. Цепочечные силикаты. М., «Мир», 1965. 406 с.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МИНЕРАЛОГИИ СРЕДСТВАМИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ОПТИКО-ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Нурканов Е.Ю., Петров М.С., Козерчук А.Л., Кадушников Р.М.

УГТУ-УПИ, ООО "СИАМС", г. Екатеринбург

Оптико-геометрический анализ является одним из инструментов технологической минералогии и обычно реализуется двумя способами: ручным или автоматизированным с помощью аппаратных и программных средств.

При ручном способе минералог обычно использует микроскоп с окулярной сеткой и/или с окулярной линейкой (окуляр-микрометром). Соответственно применяется точечный метод Глаголева для подсчета доли минералов, и проводятся измерения линейных размеров зерен. При этом для получения статистически достоверных данных необходимо вручную выполнить измерение сотен и тысяч зерен и агрегатов с помощью окуляр-микрометра (рис. 1).

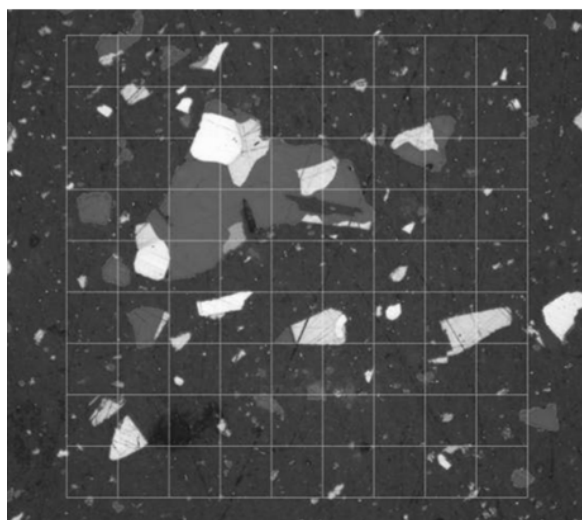


Рис. 1. Узлы сетки окуляр-микрометра.

Трудоемкость ручного метода оптико-геометрического анализа можно показать на следующем примере. Для окуляр-микрометра 10x10 количество узлов сетки составляет 100. При заполнении 10-25% поверхности аншлифа зернами минералов количество узлов сетки, пришедшихся на зерна, будет составлять от 10 до 25. При общем количестве измерений не менее 1000 для получения статистически достоверных результатов необходимо просмотреть от 40 (1000 измерений / 25 узлов сетки) до 100 (1000 измерений / 10 узлов сетки) полей зрения на одном аншлифе. Кроме того, на каждом поле зрения

необходимо дополнительно провести измерение размеров зерен и классификацию сростков и их составляющих. Таким образом, при ручном методе оптико-геометрического анализа технически очень сложно за приемлемое время получить структурные, структурно-технологические и режимно-технологические характеристики [1], такие как, например, доля свободных границ зерен, доли границ сростаний одного вида минерала с другими минералами, массовые доли минералов в сростках, соотношения минералов в сростках и т.д.

При автоматизации оптико-геометрического анализа с помощью аппаратных и программных средств встречаются разные подходы. Наиболее простой подход заключается в том, что на цифровом изображении аншлифа на отдельные выбранные зерна оператором вручную накладываются измерительные отрезки-линии «максимального размера» (рис. 2) или же контур зерна обводится вручную. Промежуточные данные наблюдений и измерений записываются в таблицы или в подготовленные заранее листы-шаблоны, после завершения измерений выполняется пересчет данных в готовые результаты.

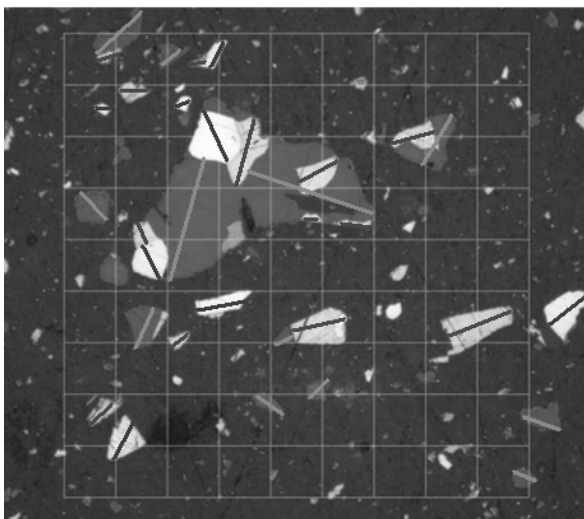


Рис. 2. Ручная обработка цифрового изображения аншлифа: линии «максимального размера» (хорды) на зерна минералов наносятся оператором вручную.

Ограничения такого подхода рассмотрим на следующем примере: оператором на нескольких изображениях вручную наносятся линии "максимального размера" для свободных зерен сначала одного минерала (№ 1), затем другого (№ 2) и далее (№ 3 – N, где N – количество присутствующих минералов). Затем таким же образом указываются зерна минералов в сростках. Количество вариантов сочетаний минералов в сростках есть сумма числа сочетаний из N по k, $2 \leq k \leq (N-1)$ плюс один сросток из N минералов:

$$\sum_{k=2}^{N-1} \frac{N!}{k!(N-k)!} + 1. \text{ При } N=3 \text{ количество возможных вариантов сростков составляет } 2 \cdot 3/2 + 1 = 4, \text{ при } N=4$$

количество возможных вариантов сростков 11, при N=5 вариантов сростков становится 26. При измерении зерен в сростках отдельный номер-индекс присваивается зерну в сростке – например, при количестве минералов N=3 в сростке минералов № 1+№ 2 зерно минерала № 1 будет иметь номер-индекс 4, зерно минерала №2 будет иметь номер-индекс 5. Таким образом, количество номеров-индексов зерен разных минералов в

сростках составляет: $\sum_{k=2}^{N-1} k \cdot \frac{N!}{k!(N-k)!} + N$. При количестве минералов N=3 оператору требуется запомнить

номера-индексы 9 вариантов сростков ($2 \cdot 2 \cdot 3/2 + 3 = 9$), при N=4 необходимо помнить индексы 28 вариантов, при N=5 – 75 вариантов. Очевидно, что в пробах с 4-мя минералами минералогу придется помнить номера-индексы 28-ми вариантов зерен-в-сростках и правильно записать результаты измерения в 28 столбцов таблицы (технологической карты). Такая задача не только трудоемка, но и становится источником существенных погрешностей следующего содержания:

1. выбор измеряемых зерен осуществляется минералогом – погрешность репрезентативности выборки;
2. неточное указание зёрен – линия на зерне проводится "на глаз";
3. при расчёте массовой доли минералов неизбежна ошибка, связанная с неучитываемой формой зерна – если зерно круглое, то объём считается по одной формуле, а если (практически всегда) имеет другую форму?
4. как следствия предыдущей ошибки – ошибки в вычислении степени раскрытия минерала (доли по массе свободных зерен к массе всех зерен), распределения по классам крупности, качеству сростков.

Кроме того, описанный выше метод не позволяет оперативно получить востребованные структурные, структурно-технологические и режимно-технологические характеристики [1] исходного рудного сырья и технологических продуктов.

Описанные выше проблемы реализации оптико-геометрического анализа и сопутствующие погрешности характерны для массовых универсальных систем анализа изображений, которыми комплектуются оптические микроскопы мировых производителей Carl Zeiss (Axiovision 4.0), Olympus (AnalySiS), Nikon (NIS-Elements, CL-Quant), Leica (QWin). Указанные системы не проектировались для решения задач минералогического анализа и технологической минералогии, поэтому все вопросы по их адаптации полностью зависят от системных функциональных возможностей программного обеспечения.

Для того чтобы оценить адекватность и применимость системы анализа изображений для оптико-геометрического анализа и технологической минералогии, требуется проверка соответствия функциональных возможностей программного обеспечения регламенту минералогического анализа и требуемым показателям. Программное обеспечение (ПО) можно назвать специализированным для задач оптико-геометрического минералогического анализа в том случае, если оно без дополнительной доработки со стороны производителя и пользователя обеспечивает следующие возможности:

1. Анализ представительной выборки технологического продукта; однотипная обработка неограниченного количества полей зрения для набора требуемой статистики по зернам, сросткам и включениям.
2. Анализ во всем диапазоне минерального состава технологического продукта; ПО самостоятельно автоматически диагностирует произвольное количество минеральных фаз.
3. Вмешательство и корректирующие воздействия эксперта могут быть позволены ПО на любой стадии.
4. ПО автоматически рассчитывает показатели и формирует отчеты с результатами оптико-геометрического анализа, в которых содержится:
 - 4.1. Для каждого минерала: массовая доля, степень раскрытия, доля свободной поверхности, доли поверхностей сростаний с другими минералами, распределение зерен по классам крупности, факторы формы зерен.
 - 4.2. Для каждого вида сростков (для всех возможных сочетаний минералов в сростках): массовая доля, распределение по классам крупности, массовые доли минералов, составляющих сросток, размеры зерен минералов, составляющих сросток, богатство/качество сростка по отношению к определенному "полезному" минералу.
5. Дополнительные измеряемые и вычисляемые характеристики могут быть добавлены при необходимости.

Из отечественных систем анализа изображений специалисты выделяют две системы, которые специализируются исключительно на задачах оптико-геометрического минералогического анализа и предоставляют указанный перечень возможностей: Видео-Мастер (ООО "НВП Центр-ЭСТАгео") и Минерал С7 (ООО «СИАМС»).

Адекватность и применимость системы анализа изображений для оптико-геометрического анализа и технологической минералогии предлагается рассмотреть на примере функциональных возможностей ПО Анализатора фрагментов микроструктуры твердых тел «Минерал С7»:

1. Анализ представительной выборки и однотипная обработка неограниченного количества полей зрения для набора требуемой статистики обеспечивается технологией электронных таблиц (рис. 3). В ячейки электронной таблицы ПО Минерал С7 автоматически записывается неограниченное количество полей зрения с одного или нескольких шлифов, которые затем анализируются единообразно, одновременно и автоматически.
2. Анализ производится во всем диапазоне минерального состава технологического продукта. Минеральный состав определяется с помощью методов кластерного анализа по совокупности оптических характеристик, образующих для каждого минерала характеристический кластер. Характеристические кластера запоминаются и записываются ПО Минерал С7 в обучаемый справочник-классификатор минералов (рис. 4), с помощью которого производится автоматическая диагностика минерального состава.
3. Вмешательство и корректирующие воздействия эксперта могут быть позволены ПО Минерал С7 на любой стадии путем двойного клика на ячейке электронной таблицы и автоматического вызова ручного редактора (рис. 5).
4. ПО Минерал С7 автоматически рассчитывает показатели по результатам автоматической классификации и кодирования свободных зерен и сростков. Отдельно выделяется связующая компонента (смола заливки, шеллак и т.д.) и вычитается фон. Далее производится анализ каждого выделенного зерна на предмет сложности его минерального состава, оценивается связность границ каждой минеральной фазы внутри зерна, контакты фаз внутри зерна и т.д. В результате автоматических операций формируется карта свободных зерен и сростков с цветовой маской минерального состава (рис. 6).
 - 4.1. Карта зерен и минерального состава используется ПО Минерал С7 для автоматического расчета массовой доли минералов, степени раскрытия, доли свободной поверхности, доли поверхностей сростаний с другими минералами, распределение зерен по классам крупности, размеров и факторов формы зерен и т.д. (табл. 1).

- 4.2. Карта сростков используется ПО Минерал С7 для автоматического расчета распределения зерен в сростках по классам крупности, массовых долей минералов, составляющих сросток, размеров зерен минералов, составляющих сросток, богатство/качество сростка по отношению к определенному "полезному" минералу и т.д. (табл. 2)
5. ПО Минерал С7 позволяет показать в результатах измерений и в итоговом отчете любой структурный, структурно-технологический и режимно-технологический параметр рудного сырья.

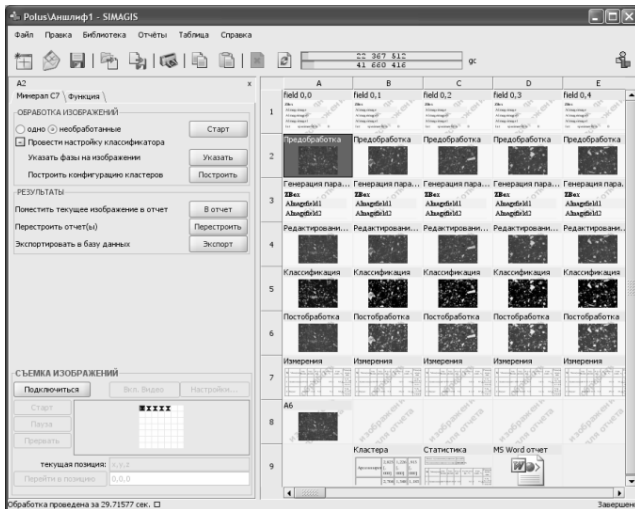


Рис. 3. Интерфейс электронных таблиц ПО Анализатора «Минерал С7»

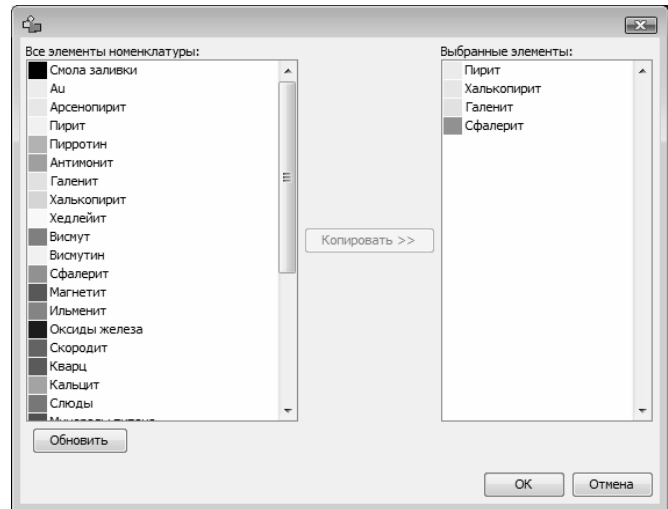


Рис. 4. Обучаемый справочник-классификатор минералов

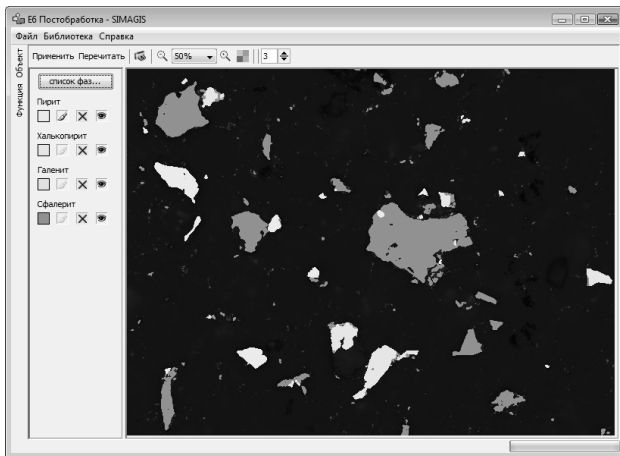


Рис. 5. Ручной редактор минерального состава, связанный с обучаемым справочником-классификатором минералов

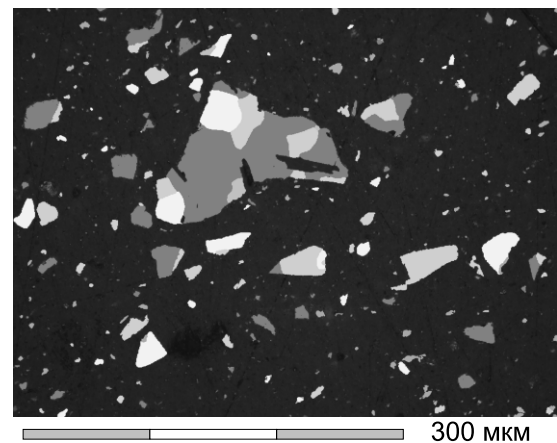


Рис. 6. Карта свободных зерен и сростков с цветовой маской минерального состава

Таблица 1. Пример результатов расчета ПО Минерал С7 минерального состава и показателей раскрытия минералов в рудном сырье

Минерал	Масс. доля, %	Раскрытие, %	Все зёрна		Свободные зёрна	
			Кол-во	Размеры, мкм	Кол-во	Размеры, мкм
Пирит	19,2	47,4	1137	1x1 – 41x87, 45-60=30,5%, 30-45=26,7%, 60-90=23,0%, 20-30=13,2%, 10-20=6,2%, 3-10=0,5%, 0-3=0,0%	634	1x1 – 41x87, 45-60=29,0%, 30-45=25,5%, 60-90=19,8%, 20-30=16,5%, 10-20=8,5%, 3-10=0,7%, 0-3=0,0%
Галенит	13,4	43,7	2402	1x1 – 25x66, 1 0-20=28,8%, 20-30=25,8%, 30-45=18,5%, 60-90=11,2%, 3-10=10,4%, 45-60=5,4%, 0-3=0,0%	1249	1x1 – 41x63 10-20=40,6%, 20-30=19,4%, 3-10=18,1%, 30-45=11,3%, 60-90=10,6%, 0-3=0,0%
Халькопирит	25,3	34,8	6416	1x1 – 62x181 90-∞=25,0%, 60-90=23,0%, 45-60=16,5%, 30-45=15,7%, 20-30=9,7%, 10-20=7,0%, 3-10=3,2%, 0-3=0,0%	4059	1x1 – 87x134 90-∞=23,6%, 60-90=16,1%, 10-20=14,1%, 20-30=13,8%, 45-60=11,7%, 30-45=11,7%, 3-10=9,0%, 0-3=0,0%
Сфалерит	42,1	60,8	14201	1x1 – 32x131 30-45=28,0%, 45-60=23,1%, 60-90=16,1%, 20-30=14,9%, 10-20=8,3%, 90-∞=7,0%, 3-10=2,5%, 0-3=0,1%	11615	1x1 – 32x131 30-45=27,9%, 45-60=20,2%, 20-30=17,4%, 10-20=11,7%, 90-∞=9,7%, 60-90=9,1%, 3-10=3,7%, 0-3=0,2%

Таблица 2. Пример результатов расчета ПО Минерал С7 характеристик сростков в рудном сырье

Состав сростков	Масс. доля %	Сростки		Составляющие			
		Кол-во	Размеры, мкм	Минерал	%	Кол-во	Размеры, мкм
Галенит + Сфалерит	2,9	162	6x6 – 39x98 30-45=33,1%, 20-30=18,9%, 10-20=17,7%, 45-60=14,8%, 90-∞=9,6%, 60-90=4,4%, 3-10=1,3%	Галенит	41,2	170	4x5 – 30x37 10-20=34,9%, 20-30=32,0%, 30-45=23,9%, 3-10=9,2%
				Сфалерит	58,8	183	1x1 – 39x98 45-60=29,3%, 90-∞=24,6%, 30-45=23,5%, 20-30=12,5%, 60-90=6,4%, 10-20=3,1%, 3-10=0,6%, 0-3=0,0%
Галенит + Халькопирит	3,6	194	6x6 – 62x181 45-60=22,8%, 20-30=20,6%, 10-20=18,5%, 30-45=15,9%, 90-∞=9,7%, 60-90=8,3%, 3-10=4,3%	Галенит	55,2	209	3x4 – 37x66 20-30=29,6%, 45-60=24,1%, 60-90=17,0%, 30-45=14,3%, 10-20=10,9%, 3-10=4,2%
				Халькопирит	44,8	221	1x1 – 62x181 90-∞=57,3%, 45-60=19,3%, 60-90=12,5%, 30-45=8,2%, 10-20=1,2%, 20-30=0,9%, 3-10=0,6%, 0-3=0,0%

ЛИТЕРАТУРА

1. Технологические аспекты рационального недропользования: роль технологической оценки в развитии и управлении минерально-сырьевой базой страны // Т.В.Башлыкова, Г.А. Пахомова, Б.С.Лагов и др. Под науч. Ред. Ю.С. Карабасова. М.:МИСИС, 2005. 576 стр.