

# Содержание

<b>Предисловие к русскому изданию</b> .....	11
<b>Предисловие</b> .....	13
<b>Предисловие автора</b> .....	15
<b>Благодарности</b> .....	16
<b>Глава 1</b>	
<b>Введение</b> .....	17
1.1. Рентгеноспектральный микроанализ .....	17
1.2. Растровая электронная микроскопия .....	17
1.2.1. Применение РЭМ для анализа .....	18
1.3. Применение РЭМ и РСМА в геологии .....	18
1.4. Родственные методы .....	20
1.4.1. Аналитическая электронная микроскопия (АЭМ) .....	20
1.4.2. РСМА с протонным зондом .....	21
1.4.3. Рентгенофлуоресцентный анализ .....	21
1.4.4. Оже-спектроскопия .....	22
1.4.5. Микроанализ с ионным зондом .....	23
1.4.6. Методы анализа с лазерным микрозондом .....	23
<b>Глава 2</b>	
<b>Взаимодействие электронов с мишенью</b> .....	25
2.1. Введение .....	25
2.2. Неупругое взаимодействие .....	25
2.2.1. Пробег электрона .....	26
2.3. Упругое рассеяние .....	26
2.3.1. Обратное рассеяние .....	28
2.4. Эмиссия вторичных электронов .....	29
2.5. Возбуждение рентгеновского излучения .....	29
2.5.1. Непрерывный рентгеновский спектр .....	30
2.5.2. Характеристические рентгеновские спектры .....	31
2.6. Поглощение рентгеновского излучения .....	34
2.7. Оже-эффект и выход флуоресценции .....	35
2.8. Катодолюминесценция .....	36
2.9. Нагрев образца .....	39



## Глава 3

<b>Оборудование</b> .....	40
3.1. Введение .....	40
3.2. Электронная пушка .....	40
3.2.1. Источники электронов высокой яркости.....	42
3.3. Электронные линзы.....	42
3.3.1. Аберрации .....	44
3.3.2. Апертуры .....	46
3.4. Диаметр и ток пучка.....	46
3.5. Юстировка колонны.....	46
3.6. Регулировка тока пучка .....	47
3.7. Развертка пучка в растр.....	48
3.8. Столик образца .....	50
3.9. Оптический микроскоп .....	51
3.10. Вакуумная система.....	52
3.10.1. Загрязнение электронно-оптической системы.....	53
3.10.2. Низковакуумный РЭМ, или РЭМ для исследования окружающей среды .....	54
3.11. Детекторы электронов .....	54
3.11.1. Детектор вторичных электронов.....	55
3.11.2. Детекторы обратно рассеянных электронов (BSE).....	56
3.12. Регистрация других типов сигналов .....	57
3.12.1. Оже-электроны .....	57
3.12.2. Католюминесценция .....	58
3.12.3. Дифракция обратно рассеянных электронов .....	59

## Глава 4

<b>Растровая электронная микроскопия</b> .....	61
4.1. Введение .....	61
4.2. Увеличение и разрешающая способность .....	61
4.3. Фокусировка .....	62
4.3.1. Рабочее расстояние .....	63
4.4. Изображение топографии образцов .....	63
4.4.1. Изображения во вторичных электронах .....	63
4.4.2. Топографический контраст в обратно рассеянных электронах .....	65
4.4.3. Пространственное разрешение .....	70
4.4.4. Глубина фокуса.....	72
4.4.5. Стереоскопические изображения.....	73
4.4.6. Низковакуумный РЭМ .....	74

4.5.	Изображения, отражающие фазовый состав.....	75
4.5.1.	Разделение BSE-изображений по атомным номерам.....	75
4.5.2.	Пространственное разрешение в обратно рассеянных электронах.....	80
4.5.3.	Применение выщелачивания.....	81
4.6.	Дефекты изображений.....	81
4.6.1.	Шумы на изображениях РЭМ.....	81
4.6.2.	Артефакты при скоплении заряда.....	82
4.6.3.	Блуждающие поля и вибрация.....	83
4.6.4.	Астигматизм.....	83
4.6.5.	Артефакты, связанные с напылением.....	84
4.7.	Способы улучшения изображений.....	84
4.7.1.	Цифровые изображения.....	86
4.7.2.	«Ложные» цвета.....	88
4.8.	Другие типы изображений.....	88
4.8.1.	Изображения в поглощенном токе.....	88
4.8.2.	Магнитный контраст.....	88
4.8.3.	Изображение дифракции обратно рассеянных электронов....	89
4.8.4.	Катодолуминесцентные изображения.....	92
4.8.5.	Изображение в зарядовом контрасте.....	94
4.8.6.	Растровая Оже-микроскопия.....	95

## Глава 5

<b>Рентгеновские спектрометры.....</b>	<b>97</b>	
5.1.	Введение.....	97
5.2.	Спектрометры с энергетической дисперсией.....	97
5.2.1.	Полупроводниковые детекторы рентгеновского излучения ...	97
5.2.2.	Энергетическое разрешение.....	99
5.2.3.	Эффективность регистрации детектора.....	100
5.2.4.	Обработка импульсов и мертвое время.....	102
5.2.5.	Отображение спектра.....	103
5.2.6.	Артефакты в энергодисперсионных спектрах.....	105
5.3.	Спектрометры с волновой дисперсией.....	107
5.3.1.	Брэгговское отражение.....	108
5.3.2.	Спектрометры с фокусирующей геометрией.....	110
5.3.3.	Конструкция спектрометра с волновой дисперсией.....	113
5.3.4.	Пропорциональные счетчики.....	114
5.3.5.	Набор импульсов и мертвое время.....	117
5.4.	Сравнение ЭД и ВД спектрометров.....	117

**Глава 6**

<b>Карты распределения элементов</b> .....	119
6.1. Введение .....	119
6.2. Цифровое картирование.....	119
6.3. Картирование с помощью спектрометров с энергетической дисперсией .....	121
6.4. Картирование с помощью спектрометров с волновой дисперсией ...	122
6.5. Картирование по данным количественного РСМА.....	123
6.6. Статистика и шумы в картировании .....	124
6.7. Цветные карты.....	125
6.8. Модальный анализ .....	125
6.9. Линейное сканирование.....	127
6.10. Карты трехмерного распределения .....	127

**Глава 7**

<b>Рентгеноспектральный анализ (1)</b> .....	130
7.1. Введение .....	130
7.2. Рентгеновские спектры чистых элементов .....	130
7.3. Идентификация элементов.....	133
7.4. Идентификация минералов .....	135
7.5. Количественный анализ с использованием кристалл-дифракционных спектрометров .....	135
7.5.1. Учет фона .....	137
7.5.2. Учет наложений мешающих линий .....	138
7.5.3. Неисправленные содержания .....	139
7.6. Количественный анализ с использованием энерго-дисперсионных спектрометров .....	140
7.6.1. Учет фона в ЭД анализе .....	140
7.6.2. Интенсивности измеряемых пиков в ЭД анализе .....	141
7.6.3. Сопоставление данных микроанализа с волновой и энергетической дисперсией.....	141
7.7. Учет матричных эффектов.....	142
7.7.1. Поправка на атомный номер.....	142
7.7.2. Поправка на поглощение .....	143
7.7.3. Поправка на характеристическую флуоресценцию.....	145
7.7.4. Альфа коэффициенты .....	147
7.7.5. Точность учета матричных эффектов .....	147
7.8. Программы расчета .....	147
7.8.1. Неопределяемые элементы .....	148
7.9. Обработка результатов.....	148

7.9.1.	Валентное состояние.....	150
7.9.2.	Формула минерала .....	151
7.9.3.	Представление результатов .....	152
7.10.	Стандарты.....	153
7.10.1.	Бесстандартный анализ .....	156

## Глава 8

### Рентгеноспектральный анализ (2) .....

8.1.	Анализ легких элементов.....	157
8.1.1.	Влияние химической связи.....	158
8.1.2.	Поправки на поглощение для легких элементов .....	159
8.1.3.	Применение многослойных псевдокристаллов.....	159
8.2.	Анализ при низких напряжениях .....	160
8.3.	Выбор условий для количественного анализа .....	160
8.4.	Счетная статистика .....	161
8.4.1.	Гомогенность .....	163
8.5.	Предел обнаружения.....	163
8.6.	Влияние проводящего покрытия.....	164
8.7.	Разрушение образца под действием зонда .....	165
8.7.1.	Нагрев.....	165
8.7.2.	Миграция щелочных металлов и другие артефакты.....	165
8.8.	Краевые эффекты .....	167
8.9.	Особые случаи количественного анализа .....	168
8.9.1.	Наклонные образцы.....	168
8.9.2.	Анализ расфокусированным пучком .....	169
8.9.3.	Анализ мелких частиц .....	170
8.9.4.	Анализ неровных и пористых образцов .....	171
8.9.5.	Анализ тонкослойных образцов.....	172
8.9.6.	Флюидные включения.....	173
8.9.7.	Анализ при низком вакууме.....	173

## Глава 9

### Подготовка образцов .....

9.1.	Предварительная подготовка образцов.....	174
9.1.1.	Чистка .....	174
9.1.2.	Сушка .....	174
9.1.3.	Пропитка .....	175
9.1.4.	Изготовление реплик и оттисков .....	176
9.1.5.	Резка образцов пород .....	176
9.2.	Монтаж образца .....	177



9.2.1.	«Стойка» для изучения образцов в РЭМ .....	177
9.2.2.	Заливка образцов .....	178
9.2.3.	Шлифы .....	178
9.2.4.	Установка отдельных зерен .....	178
9.2.5.	Стандарты .....	179
9.3.	Полировка .....	180
9.4.	Травление .....	182
9.5.	Напыление .....	182
9.5.1.	Углеродное напыление .....	183
9.5.2.	Термовакuumная металлизация .....	184
9.5.3.	Ионное напыление металлов в вакууме .....	184
9.5.4.	Удаление покрытия .....	185
9.6.	Маркировка образцов .....	186
9.6.1.	«Карта» образца .....	186
9.7.	Хранение и уход за образцами .....	187
<b>Приложение</b> .....		188
<b>Литература</b> .....		205
<b>Предметный указатель</b> .....		216
<b>Дополнение</b> .....		220