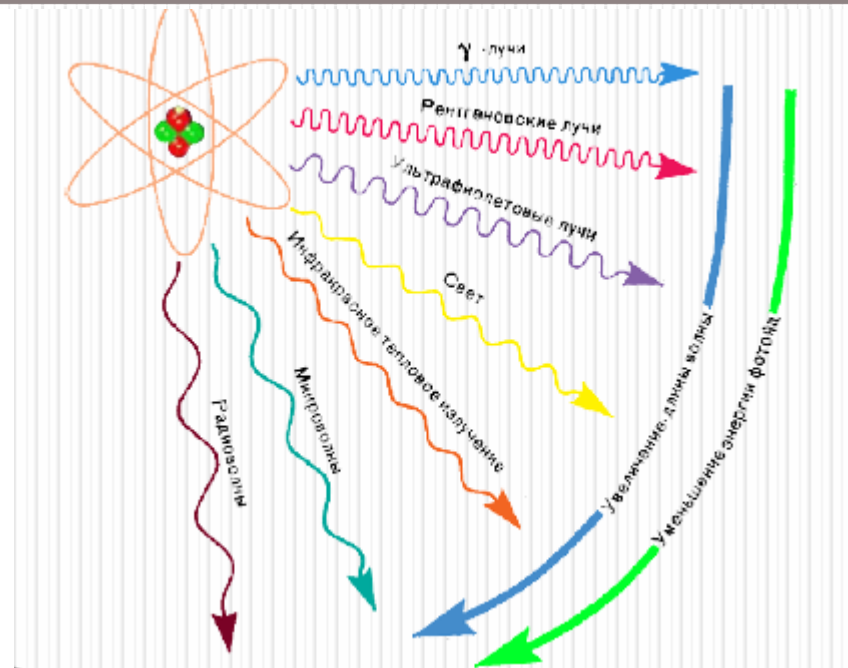


*Физико-  
химические  
методы  
анализа*

# Рентгенофлуоресцентная спектроскопия





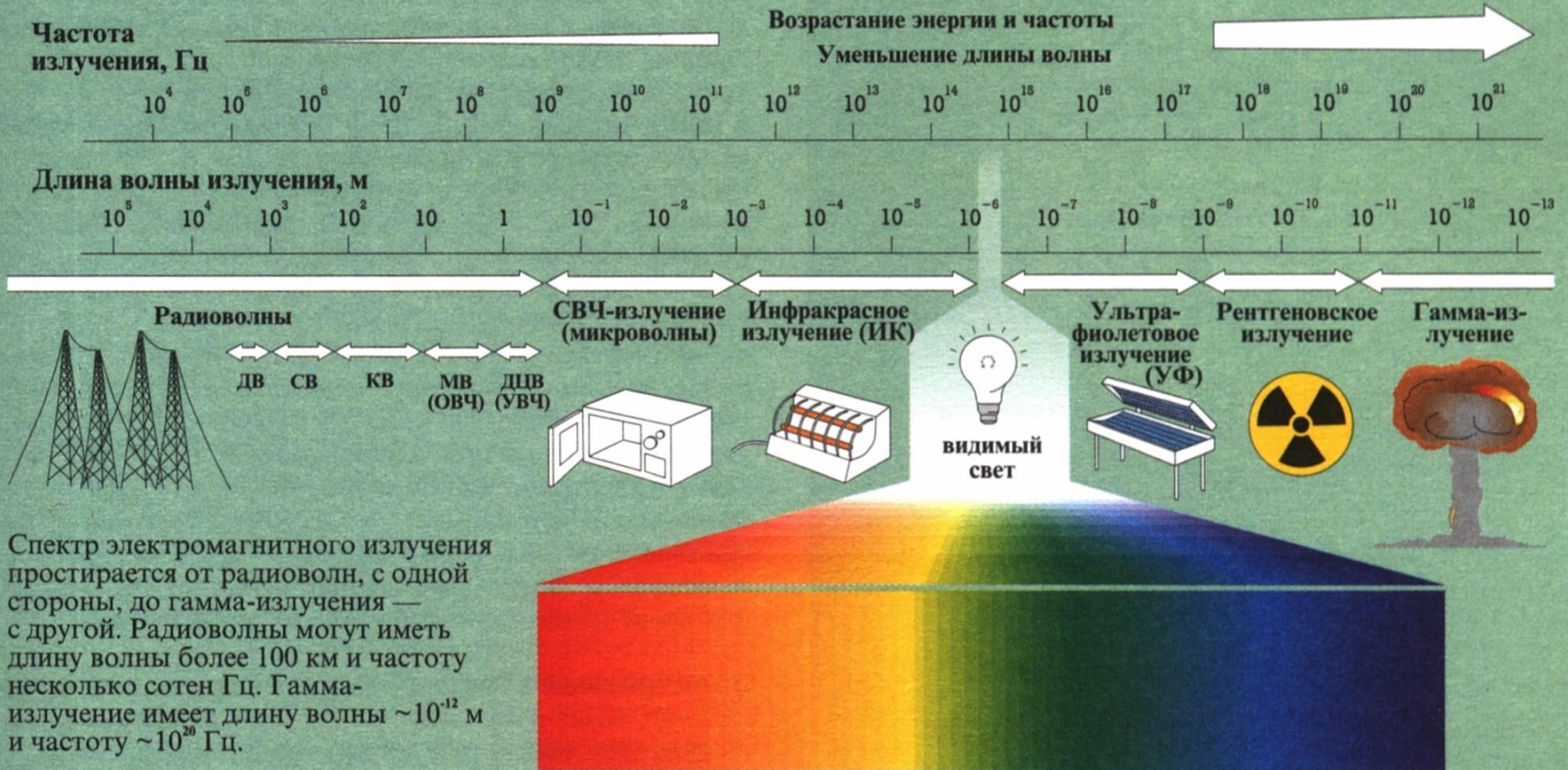
1895 г: Вильям Конрад Рентген, открытие X-лучей

- **Рентгеновская спектроскопия** - раздел спектроскопии, изучающий спектры испускания (эмиссионные) и поглощения (абсорбционные) рентгеновского излучения (электромагнитное излучение в области длин волн  **$10^{-2}$ - $10^2$**  нм)
- Рентгеновскую спектроскопию используют для изучения природы химических связей и количественного анализа веществ (рентгеновский спектральный анализ)
- С помощью рентгеновской спектроскопии можно определять все элементы, начиная с **В(бор)**

Интересный факт:

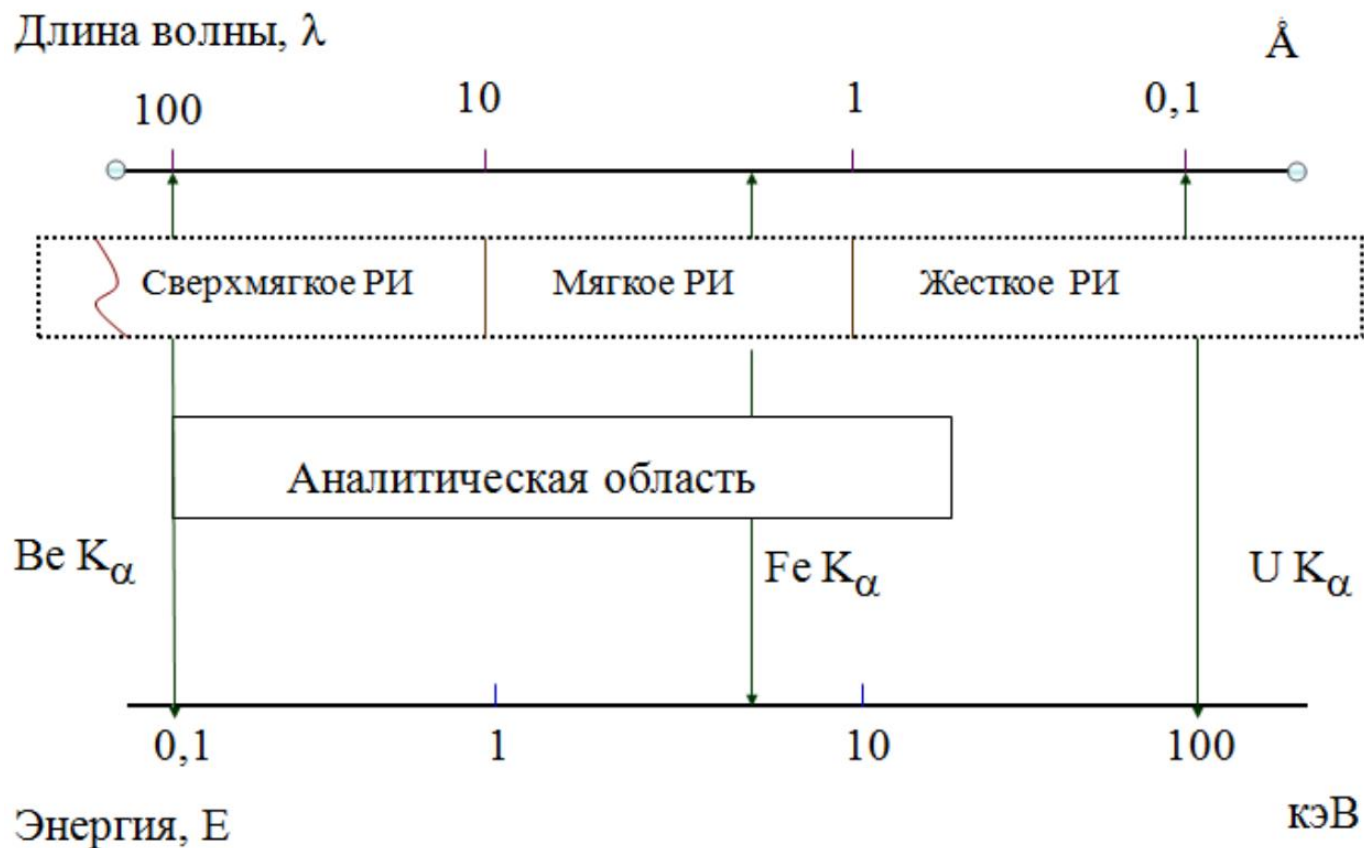
!! Церковь не приветствовала открытие рентгеновских лучей, т.к. при облучении человека не была обнаружена душа.

# Спектр электромагнитного излучения



Только небольшая часть электромагнитного спектра видна невооруженным глазом.

# Спектр электромагнитного излучения

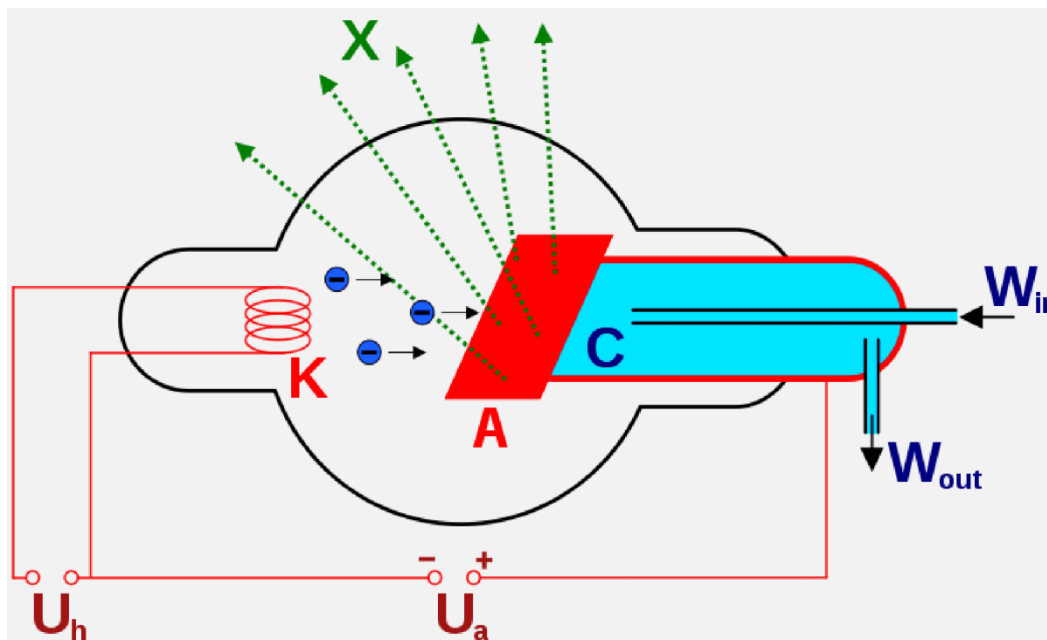


**Рентгеновская часть электромагнитного спектра  
(РИ – рентгеновское излучение)**

- **Рентгенофлуоресцентная спектрометрия** (общепринятое обозначение - XRF, РФА, РФС, РФЛА)
- Метод основан на регистрации **характеристического флуоресцентного излучения** атомов, возникающего при облучении образца потоком излучения рентгеновской трубки
- В РФЛА обычно используют излучение в диапазоне длин волн от 0.05 до 10 нм, что соответствует диапазону энергий от 0.100 до 25 кэВ
- Наиболее распространенным источником рентгеновского излучения в настоящее время является рентгеновская трубка
- В зависимости от природы возникновения рентгеновских лучей различают **тормозное** и **характеристическое** излучение

# Устройство рентгеновской трубки

- Трубка состоит из анода (А) и катода (К), которые помещены в металлический или стеклянный корпус с окном для выхода рентгеновского излучения; внутри трубки высокий вакуум. Электроды трубки подключаются к источнику высокого напряжения – в несколько тысяч ВОЛЬТ



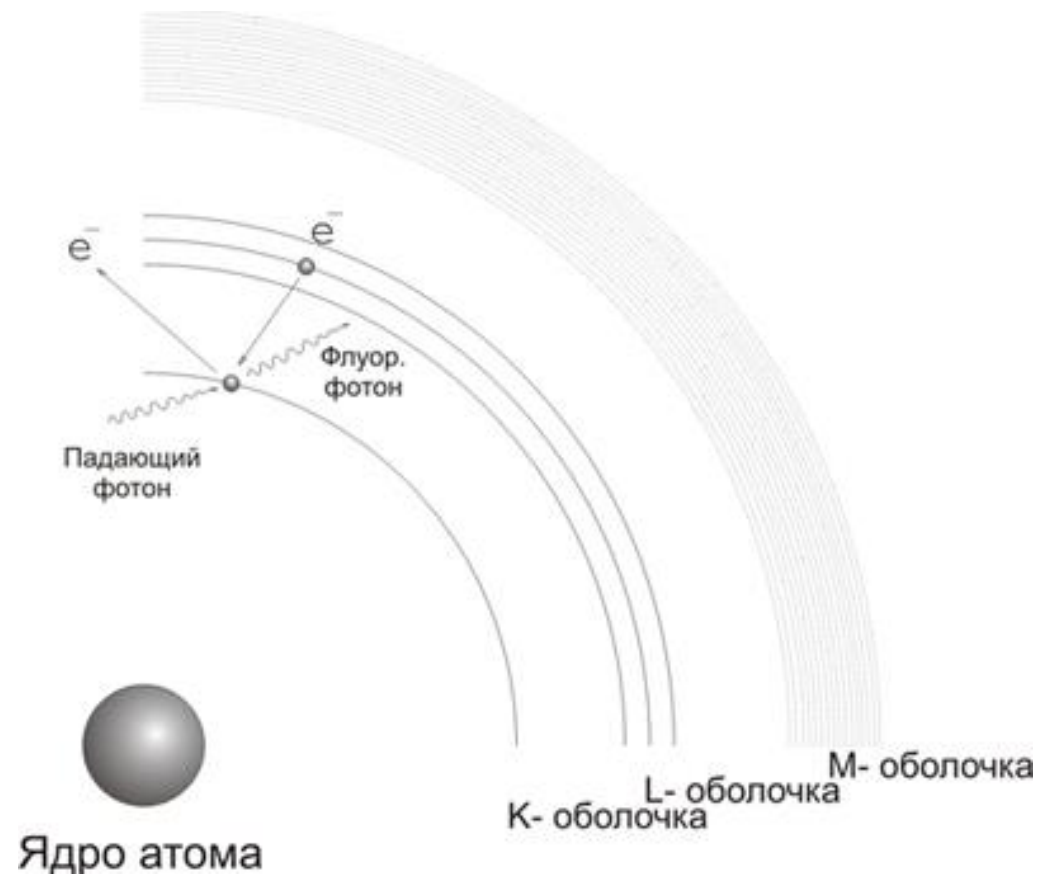
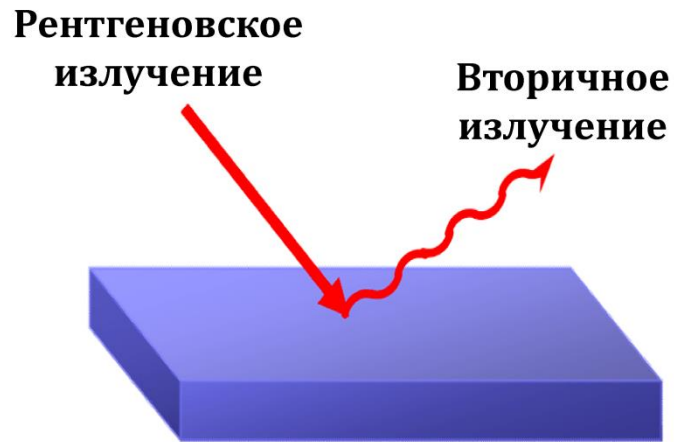
# Возникновение рентгеновского излучения

- **Тормозное рентгеновское излучение**
- Под действием высокого напряжения раскаленный катод испускает электроны, которые ускоряются до большой энергии и попадают на анод
- При прохождении через материал анода происходит торможение в результате взаимодействия электрических полей электронов и ядер атомов анода. При этом утраченная кинетическая энергия испускается в виде рентгеновских фотонов и дает непрерывный спектр
- непрерывный спектр рентгеновских лучей образуется благодаря излучению множества электронов, каждый из которых испускает один квант рентгеновского излучения строго определенной величины, отвечающей сохранившейся к моменту излучения кинетической энергии
- Спектральная интенсивность тормозного излучения возрастает с ростом заряда ядра, поэтому для ее увеличения используются мишени из материалов с высоким атомным номером, например вольфрам, рений, платину, золото

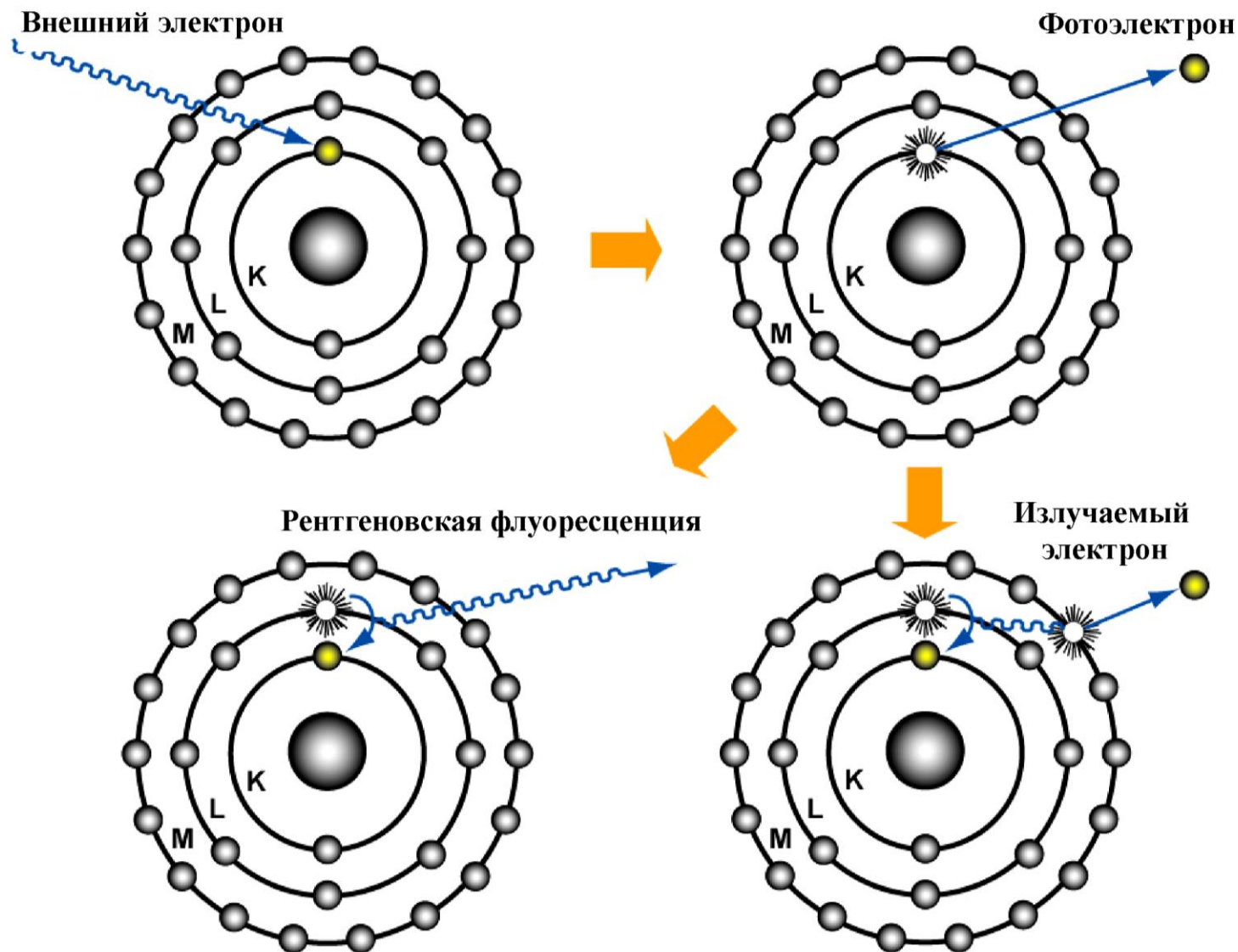


- **Характеристическое излучение**
- При облучении анода электронами наряду со сплошным рентгеновским спектром возникает излучение, которое специфично для материала анода
- Характеристическое излучение испускают атомы мишени при столкновении с электронами (первичное излучение) или с рентгеновскими фотонами (вторичное, или флуоресцентное излучение)

# Рентгеновская флуоресценция



# Природа рентгеновского излучения



При поглощении фотона первичного излучения в одной из внутренних оболочек выбивается электрон, образуется вакансия, а на освободившееся место переходит электрон с более удаленной от ядра оболочки атома.

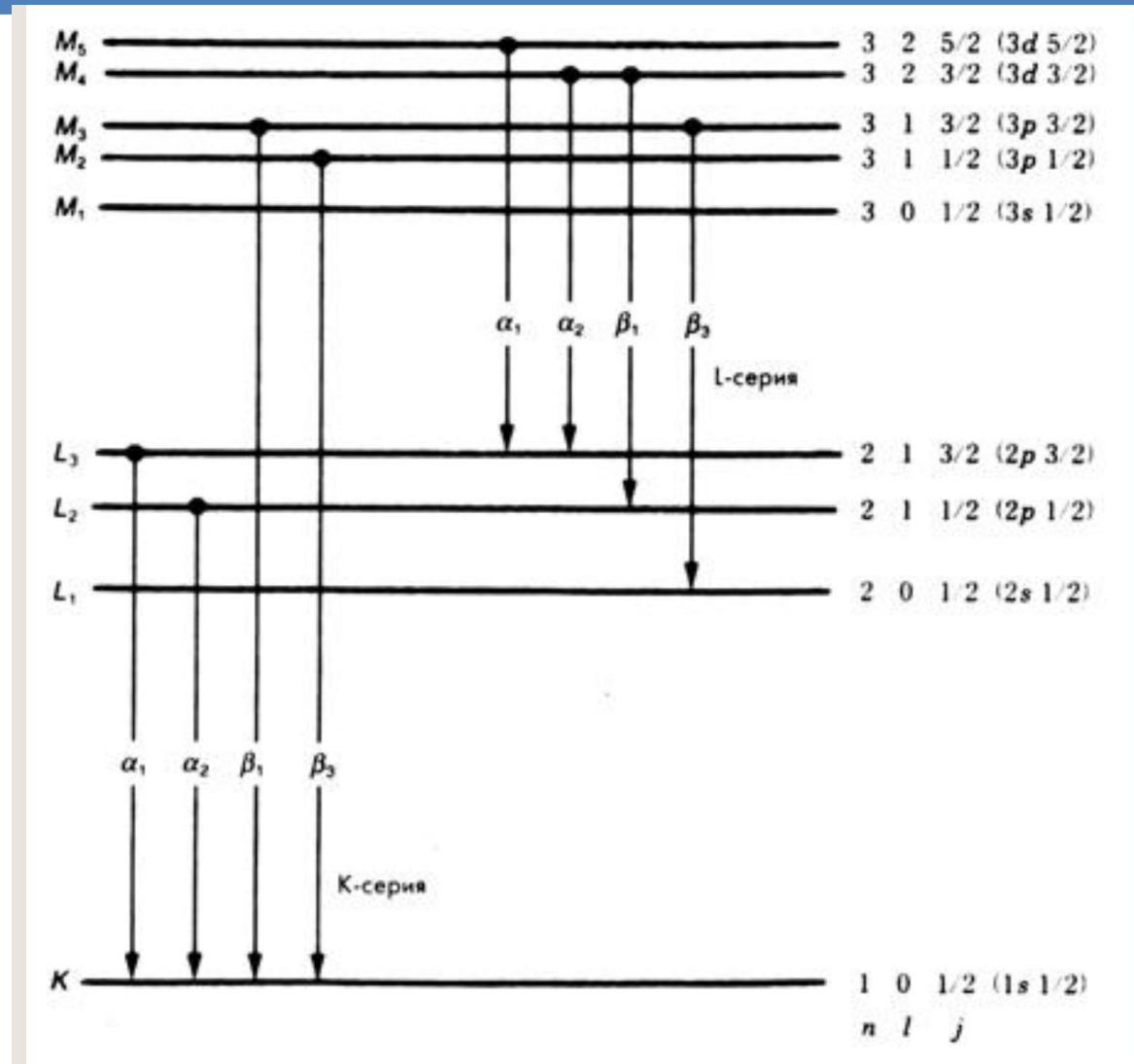
При этом возможны два пути:

- электроны с внешних оболочек либо заполняют образовавшиеся вакантные места, а излишек энергии испускается в виде фотона (рентгеновская флуоресценция),
- энергия передается другому электрону из внешних оболочек (оже-электрон)

- Теория характеристического излучения создана на основе **модели атома Бора**, согласно которой электроны атома находятся на ***K, L, M, N*** и т.д. оболочках - уровнях энергии с главными квантовыми числами  **$n = 1, 2, 3, 4...$**
- Каждая оболочка может содержать только определенное число электронов: ближайшая к ядру *K*-оболочка – 2 электрона, *L* – 8, *M* – 18 и т.д.

- Первая оболочка (**K**) состоит из одного подуровня  $1s$ .  
Вторая оболочка (**L**) состоит из двух подуровней  $2s$  и  $2p$ .  
Третья оболочка (**M**) - из подуровней  $3s$ ,  $3p$  и  $3d$
- подуровням энергии приписывают последовательно числовые индексы в порядке возрастания энергии, например,  $M_I$ ,  $M_{II}$ ,  $M_{III}$ ,  $M_{IV}$ ,  $M_V$
- Все переходы на K, L или M-уровни называют **K, L или M-сериями** (K, L или M-переходами) и обозначают греческими буквами ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ...) с числовыми индексами
- Существует целый набор возможных переходов на электронную вакансию со внешних электронных оболочек
- к примеру, на вакансию в K-оболочке могут перейти электроны с различных подуровней L, M и т.д. оболочек, если они имеются у атома элемента

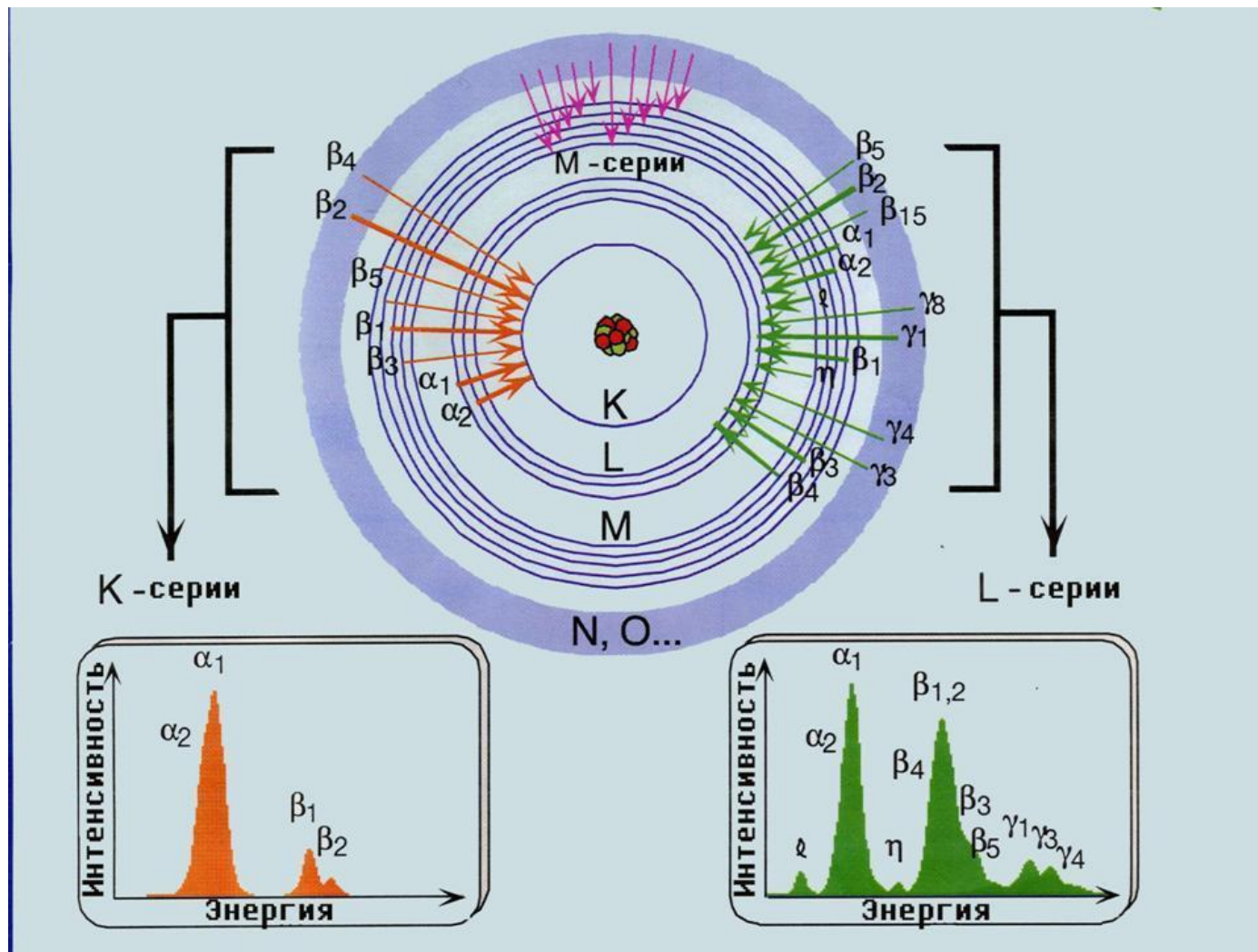
# Схема электронных переходов



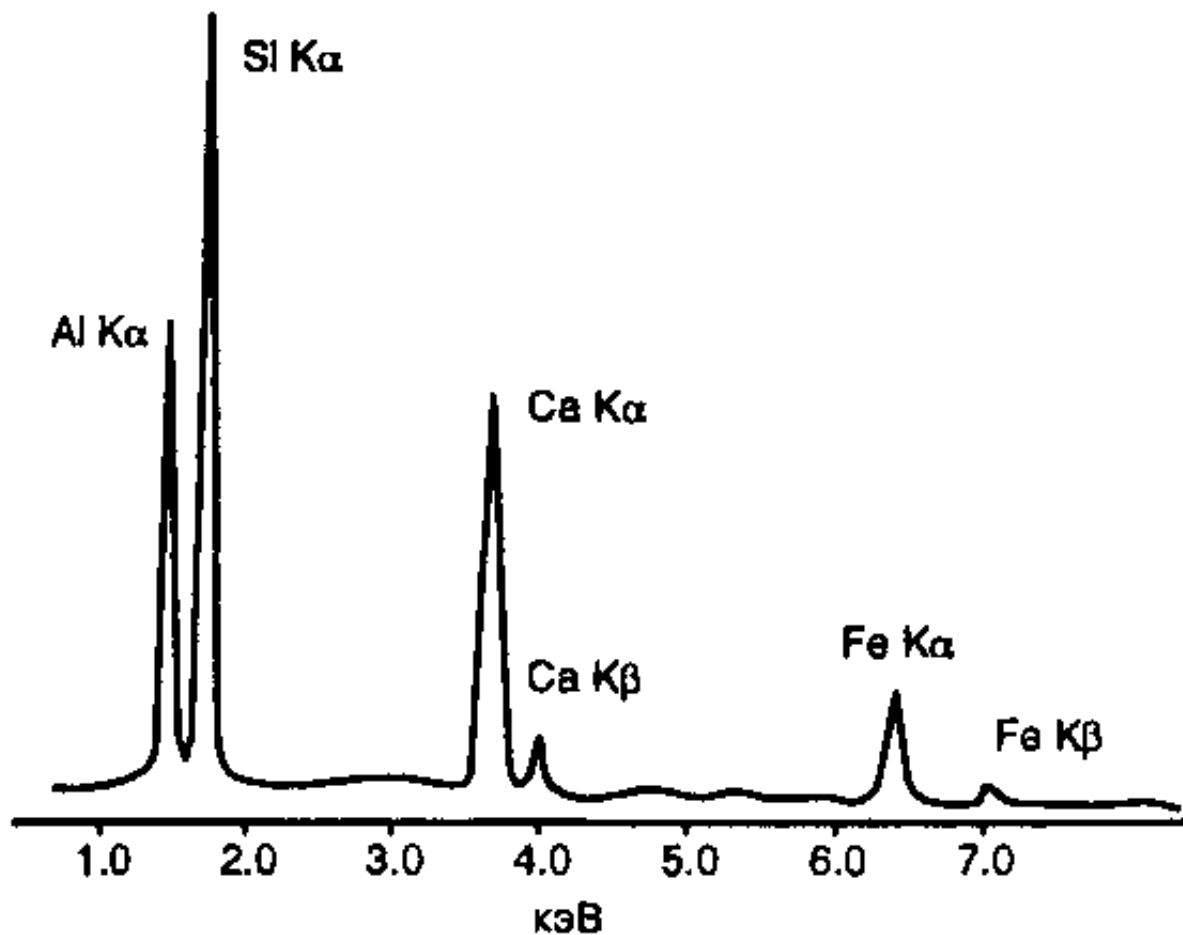
- В результате, спектр рентгеновской флуоресценции атомов одного элемента будет состоять из нескольких сигналов.  
Характеристический рентгеновский спектр имеет линейчатый характер; каждая линия соответствует определенному переходу
- В спектрах рентгеновской флуоресценции **наибольшей интенсивностью** обладают излучательные переходы на электронные вакансии в К-оболочке (**К-линии спектра**)
- для достаточно «тяжелых» элементов также проявляются переходы на вакансии в L-оболочке (L-линии спектра)



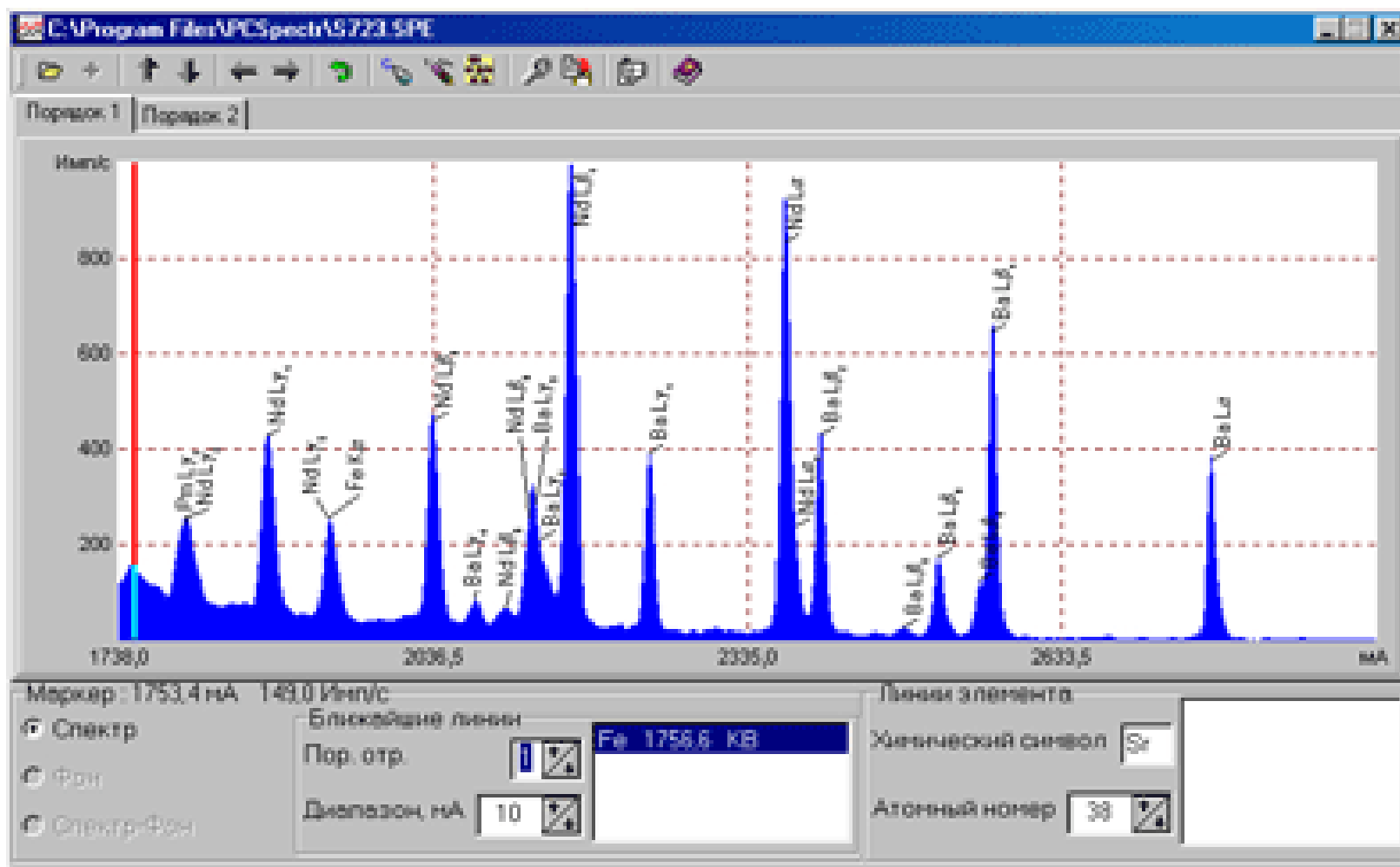
# Схема электронных переходов



# Рентгеновский спектр (пример)



# Рентгеновский спектр (пример)

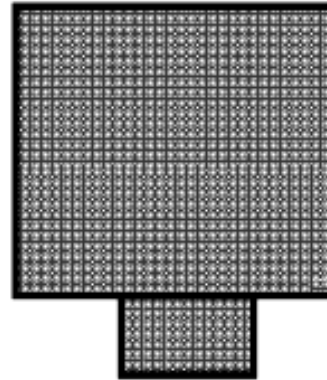
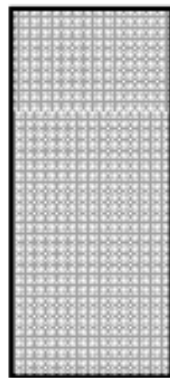


# РФ-спектрометры

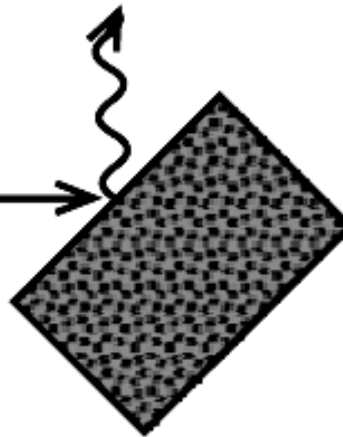
- Приборы РФС состоят из рентгеновского источника, держателя пробы и спектрометра
- Спектрометр измеряет длину волны ( $l$ ) или энергию ( $E$ ) и интенсивность флуоресцентного излучения, испускаемого пробой
- В зависимости от параметра, непосредственно измеряемого спектрометром ( $l$  или  $E$ ), различают приборы с
  - **волновой** (ВД) (измеряет длину волны)
  - и **энергетической дисперсией** (ЭД) (измеряет энергию волны),
  - устройство которых принципиально различно

# Схема рентгеновского спектрометра

**Источник  
рентгеновского  
излучения**



**Детектор**



**Образец**

# Источники излучения

- Рентгеновские источники, используемые для возбуждения атомов в пробе, как правило, не имеют принципиальных отличий в приборах с **волновой дисперсией**(ВД) и **энергетической дисперсией** (ЭД)
- Наиболее широко используемым источником первичного рентгеновского излучения в РФЛА являются **рентгеновские трубки**
- В приборах с энергетической дисперсией возможно использование **радиоизотопных источников**

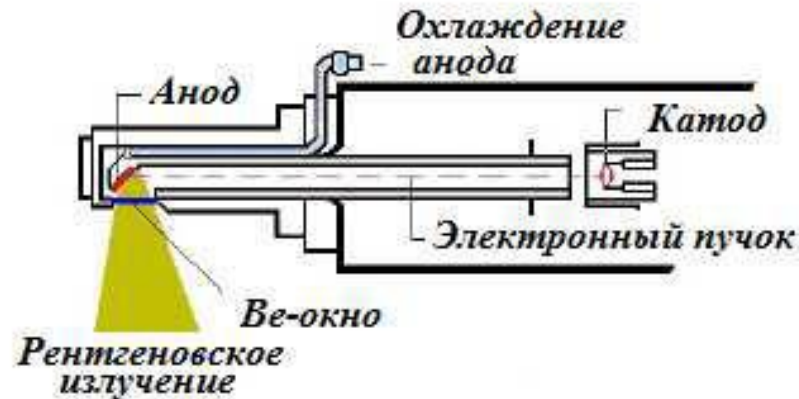
- Все **рентгеновские трубки** работают по одинаковому принципу:

*Ускорение электронов в электрическом поле и их торможение в подходящем материале анода*

Чтобы избежать столкновения электронов с газовыми молекулами, внутри корпуса создается вакуум

- Выход рентгеновского излучения из корпуса осуществляется через тонкое **бериллиевое** окно, пронизаемое для этого излучения
- Основные различия между типами трубок заключаются в полярности анода и катода, а также в расположении выходных окон. Два наиболее важных типа:
- **трубка с боковым окном**
- **трубка с торцевым окном**

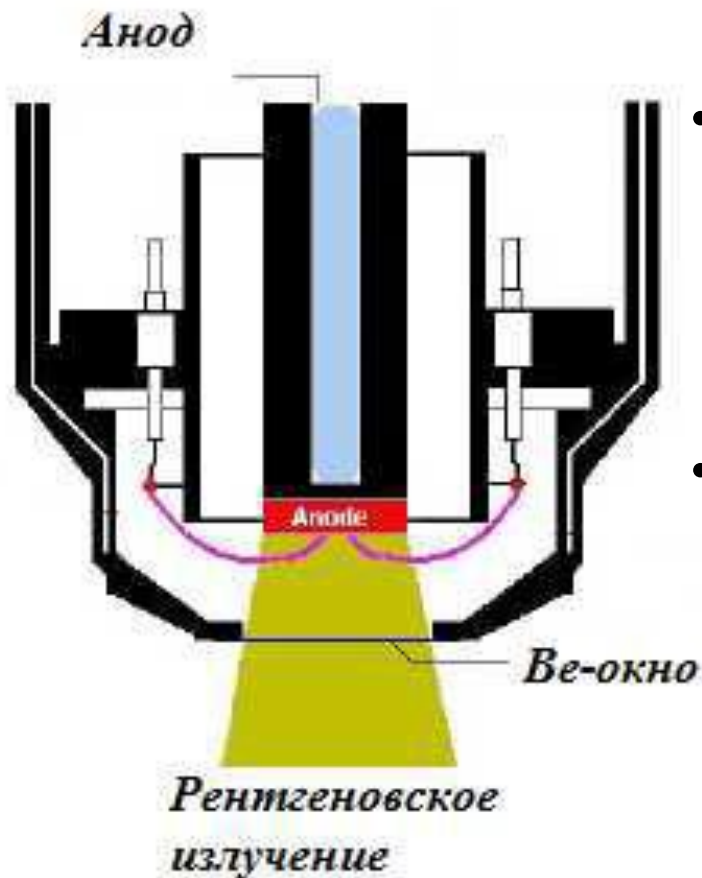
## Схема рентгеновской трубки с боковым окном



- В трубке с боковым окном к катоду приложено отрицательное напряжение, анод находится под нулевым потенциалом, разность потенциалов между анодом и материалом корпуса отсутствует
- Электроны испускаются нагретым катодом и ускоряются в направлении анода, часть электронов рассеивается на поверхности анода и способствует нагреву корпуса и, особенно бокового окна
- Чтобы исключить нагрев, используют окна толщиной не менее 300 мкм. Это приводит к слишком высокому поглощению низкоэнергетического характеристического *L-излучения* материала анода в выходном окне, что ограничивает возбуждение более легких элементов в пробе



# Схема рентгеновской трубки с торцевым катодом



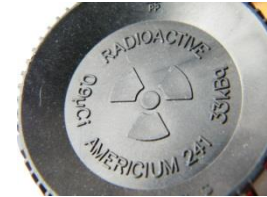
- В трубке с торцевым окном к аноду приложено положительное высокое напряжение, а кольцевой катод располагается вокруг анода и находится под нулевым потенциалом
- Благодаря тому, что между положительно заряженным анодом и корпусом, включая бериллиевое окно, имеется разность потенциалов, обратно рассеянные электроны будут направляться обратно к аноду
- При этом выходное окно не будет нагреваться, поэтому может быть значительно более тонким (125 и 75 мкм) по сравнению с трубкой с боковым окном
  - Это условие выполняется для того, чтобы легкие элементы возбуждались характеристическим  $L$ -излучением материала анода

- С начала 80-х годов всеми известными производителями волнодисперсионных спектрометров используются трубки с **торцевым** окном.
- Мощность этих трубок достигает 100 мА при 30 кВт. Анод трубки охлаждается деионизованной водой

- Трубки могут быть как с родиевым так и с медным, молибденовым, серебряным или другим анодом
  - Анод трубки, в некоторых случаях, выбирается в зависимости от типа задачи (элементов, требующих анализа), для решения которой будет использоваться данный прибор
- Для разных групп элементов используются различные значения силы тока и напряжения на трубке
  - Для исследования лёгких элементов вполне достаточно установить напряжение **10 кВ**,
  - для средних **20-30 кВ**,
  - для тяжелых **40-50 кВ**

# Использование источников рентгеновских лучей

- При выборе **радиоактивного изотопа** как возбуждающего источника для рентгеноспектрального анализа определяющее значение имеют следующие характеристики:
  - 1) энергия испускаемых квантов и чистота спектра
  - 2) период полураспада изотопа
  - 3) удельная активность
  - 4) доступность и стоимость изотопа



## Недостатки:

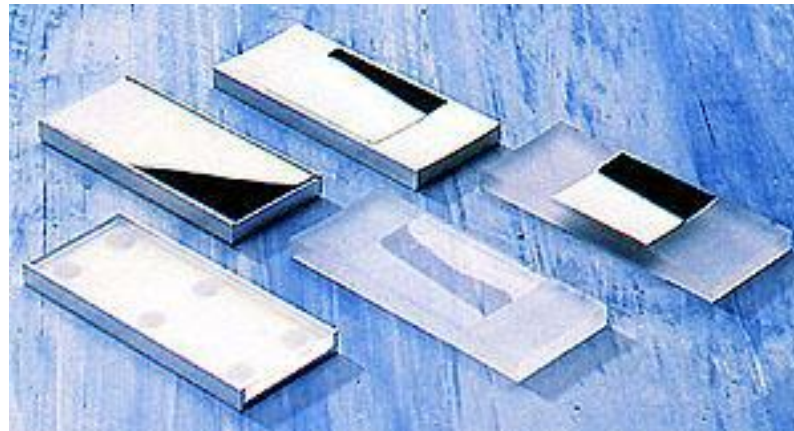
- Набор используемых радиоактивных источников невелик и не всегда может обеспечить оптимальные источники возбуждения; часто используются, например  **$Fe^{55}$ ,  $Am^{241}$ ,  $Cd^{109}$**
- Любой радиоактивный изотоп, взятый в разумных количествах, является относительно маломощным источником возбуждающего излучения по сравнению с рентгеновской трубкой

# Использование источников рентгеновских лучей

## **Достоинства:**

- Радиоизотопные источники отличаются своей стабильностью, надежностью и портативностью, легко обеспечивают выход излучения порядка  $10^7$ - $10^8$  квант/с и выше, достаточный для решения широкого круга аналитических задач
- Все же, поскольку каждая страна имеет свои требования к ввозу и вывозу излучающих изотопов, в производстве рентгенофлуоресцентной техники в последнее время стараются использовать, как правило, рентгеновскую трубку

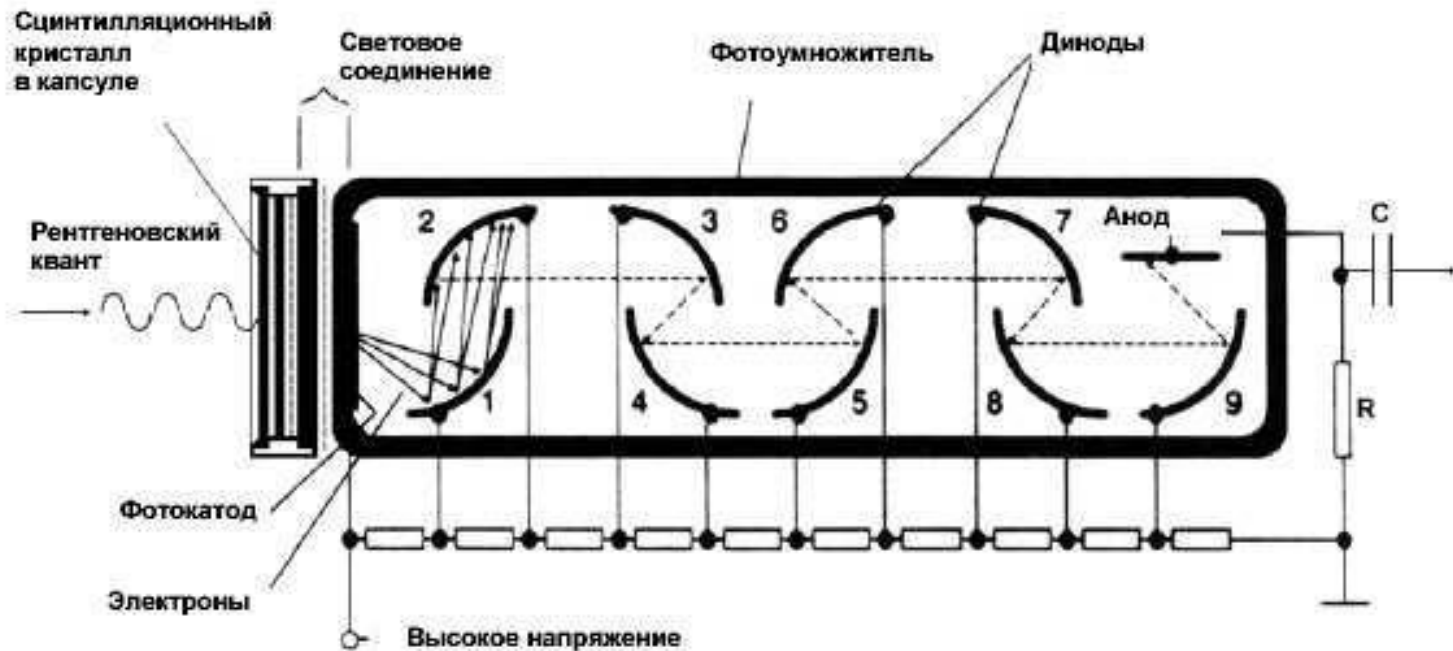
- для увеличения селективности и чувствительности аппаратуры, измерение спектра исследуемой пробы в широком диапазоне энергий производят с помощью нескольких кристаллов-монохроматоров из различных материалов
- Монокристаллы, такие как германий ( $\text{Ge}^{111}$ ), фторид лития являются идеальными анализаторами для излучения многих элементов
- Многослойные синтетические покрытия используются для увеличения чувствительности при анализе легких элементов (монохроматоры серии РХ, РЕ и т.д.)



# Детекторы

- **Детектирование рентгеновского излучения** основано на преобразовании энергии лучей в импульсы напряжения определенной амплитуды
- **Типы детекторов**
- Для относительно больших длин волн при анализе легких элементов используются **газонаполненные** детекторы. Их действие основано на ионизации инертного газа излучением и измерении числа электрических импульсов, прошедших через ионизированный газ. Величина возникающего импульса тока пропорциональна интенсивности излучения ( ионизац. камера, счетчик Гейгера, пропорциональные счетчики)

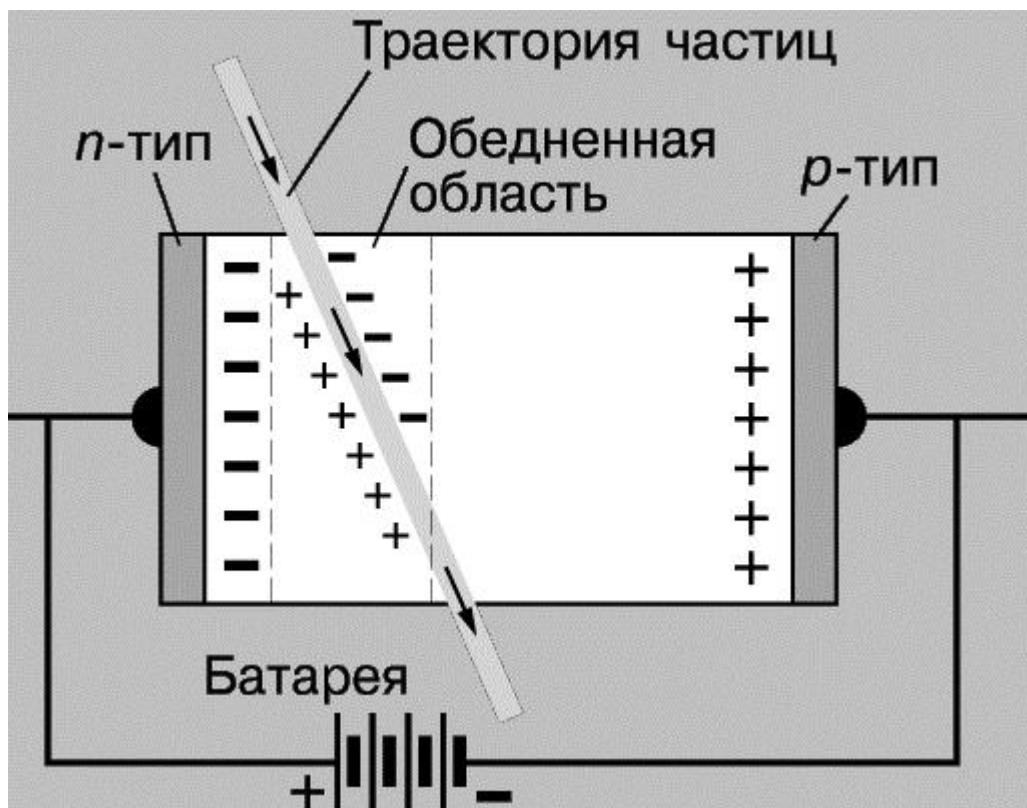
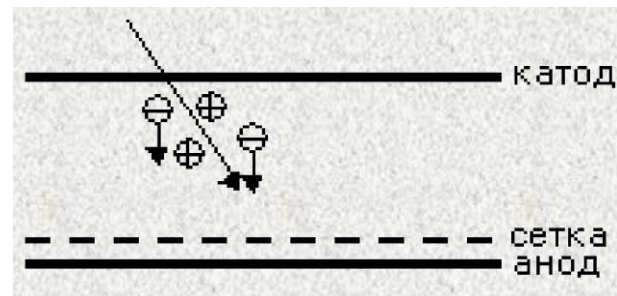
- Для коротких длин волн применяются **сцинтилляционные детекторы**, в которых измеряется ток фотоэлемента, чувствительного к излучению специального вещества (сцинтиллятора, кристаллов NaI) при попадании на него рентгеновского излучения. Количество регистрируемых импульсов пропорционально количеству атомов элемента в пробе





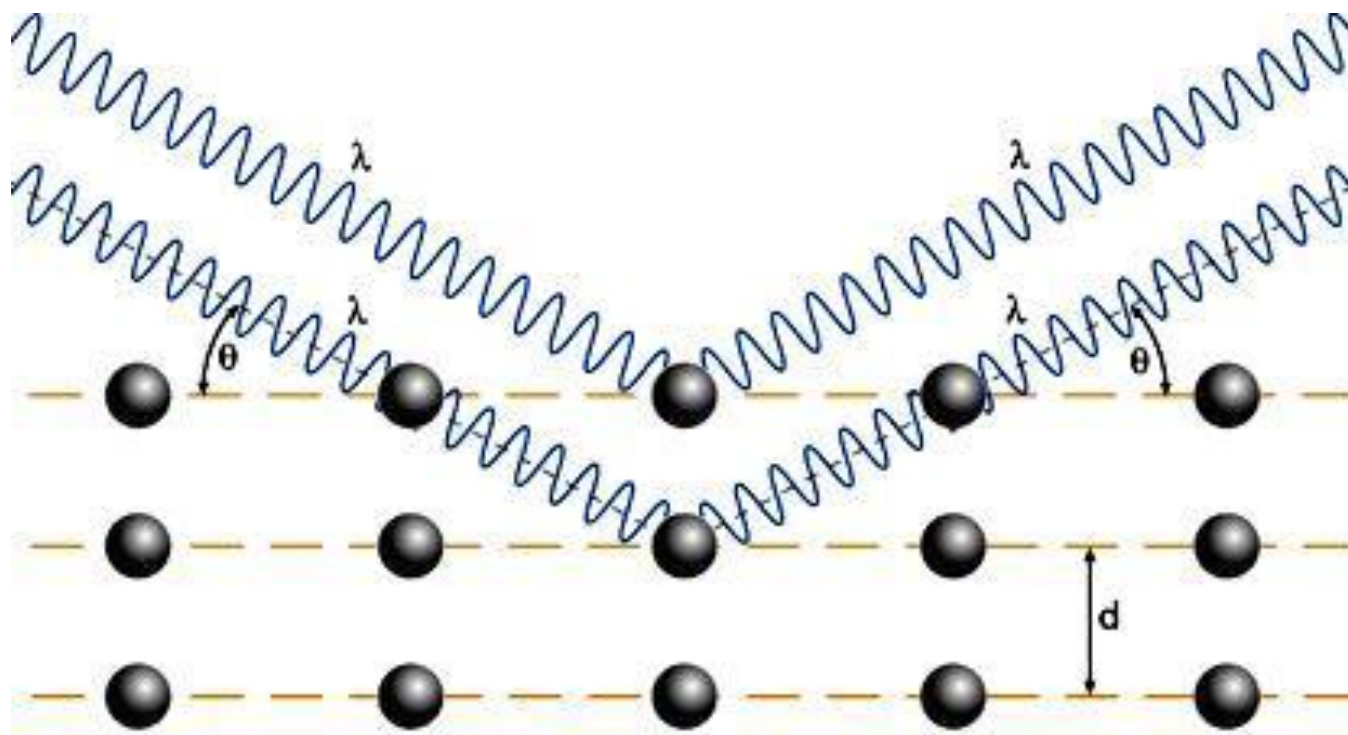
- Для детектирования вторичного излучения в спектрометрах с ЭД используются **полупроводниковые твердотельные детекторы**, действие которых основано на ионизации полупроводника. Полупроводниковые детекторы изготавливают из кристаллов Si или Ge, активированных, например литием, причем необходимо охлаждение детектора во время анализа жидким азотом
- Современные усилители и анализаторы импульсов позволяют получить удовлетворительную статистическую погрешность измерений за время менее 2 сек
- Анализ и обработка результатов измерений проводится автоматически. Результаты анализа накапливаются в базе данных для дальнейшей обработки

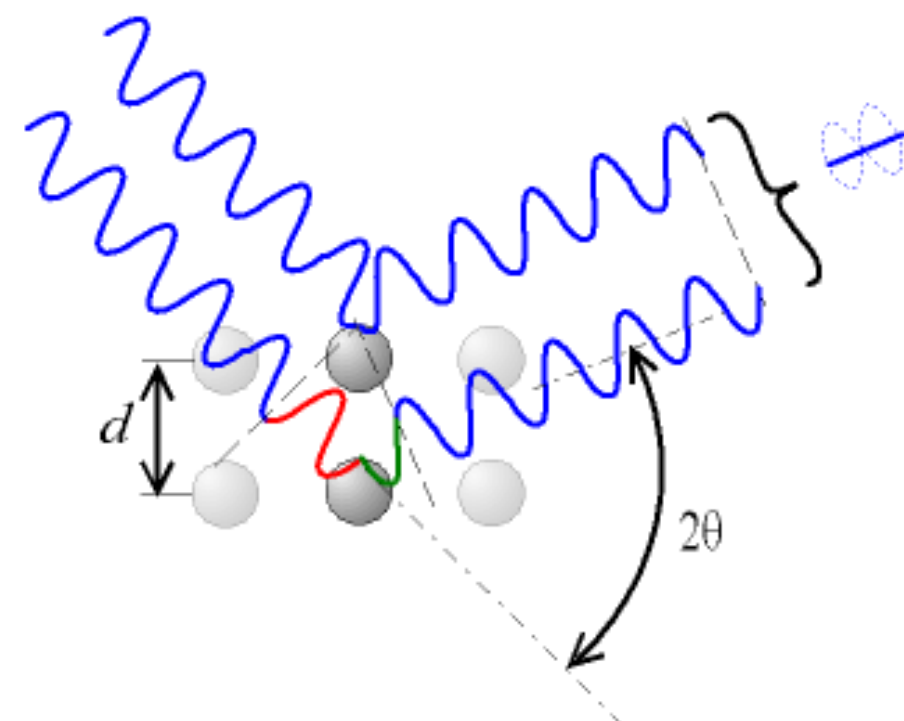
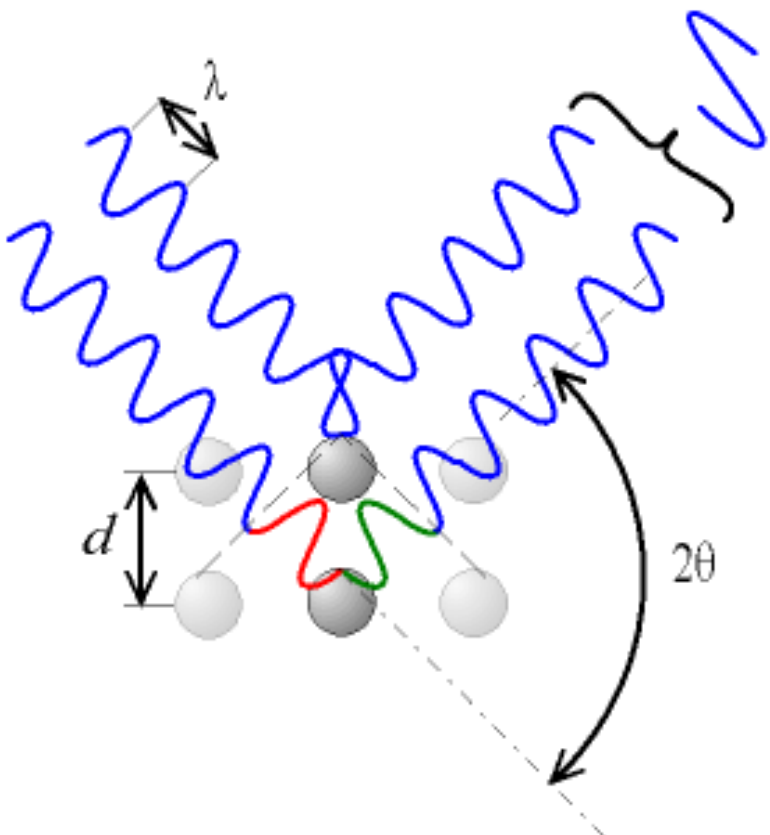
## Схема газонаполненного детектора



Полупроводниковый  
твёрдый  
детектор

Угловое положение кристалла задается в зависимости от длины волны, которую нужно выделить из спектра. Идеальными анализаторами являются **монокристаллы Ge** и **LiF**





где  $d$  — межплоскостное расстояние,  $\theta$  — угол скольжения (брегговский угол),  $n$  — порядок дифракционного максимума,  $\lambda$  — длина волны.

$$n\lambda = 2d \cdot \sin\theta$$

# Типы кристаллов

Кристалл		Диапазон элементов	Значение $2d$ , нм
LiF (420)	фторид лития	$\geq \text{Co } K\beta$	0.1801
LiF (220)	фторид лития	$\geq \text{V } K\alpha 1$	0.2848
LiF (200)	фторид лития	$\geq \text{K } K\alpha 1$	0.4028
Ge	германий	P, S, Cl	0.653
InSb	антимонид индия	Si	0.7481
PET	пентаэритрит	Al-Ti	0.874
AdP	дигидрофосфат аммония	Mg	1.0648
TlAP	гидрофталат таллия	F, Na	2.5760
OVO-55	многослойная структура [W/Si]	Si	5.5
OVO-160	[Ni/C]	B, C	16
OVO-N	[Ni/BN]	N	11
OVO-C	[V/C]	C	12
OVO-B	[Mo/B <sub>4</sub> C]	B (Be)	20

# Блок-схемы рентгеновских спектрометров

- **Волнодисперсионный спектрометр**

- Аналогично устроены спектрометры в ИК-, УФ- и видимой области

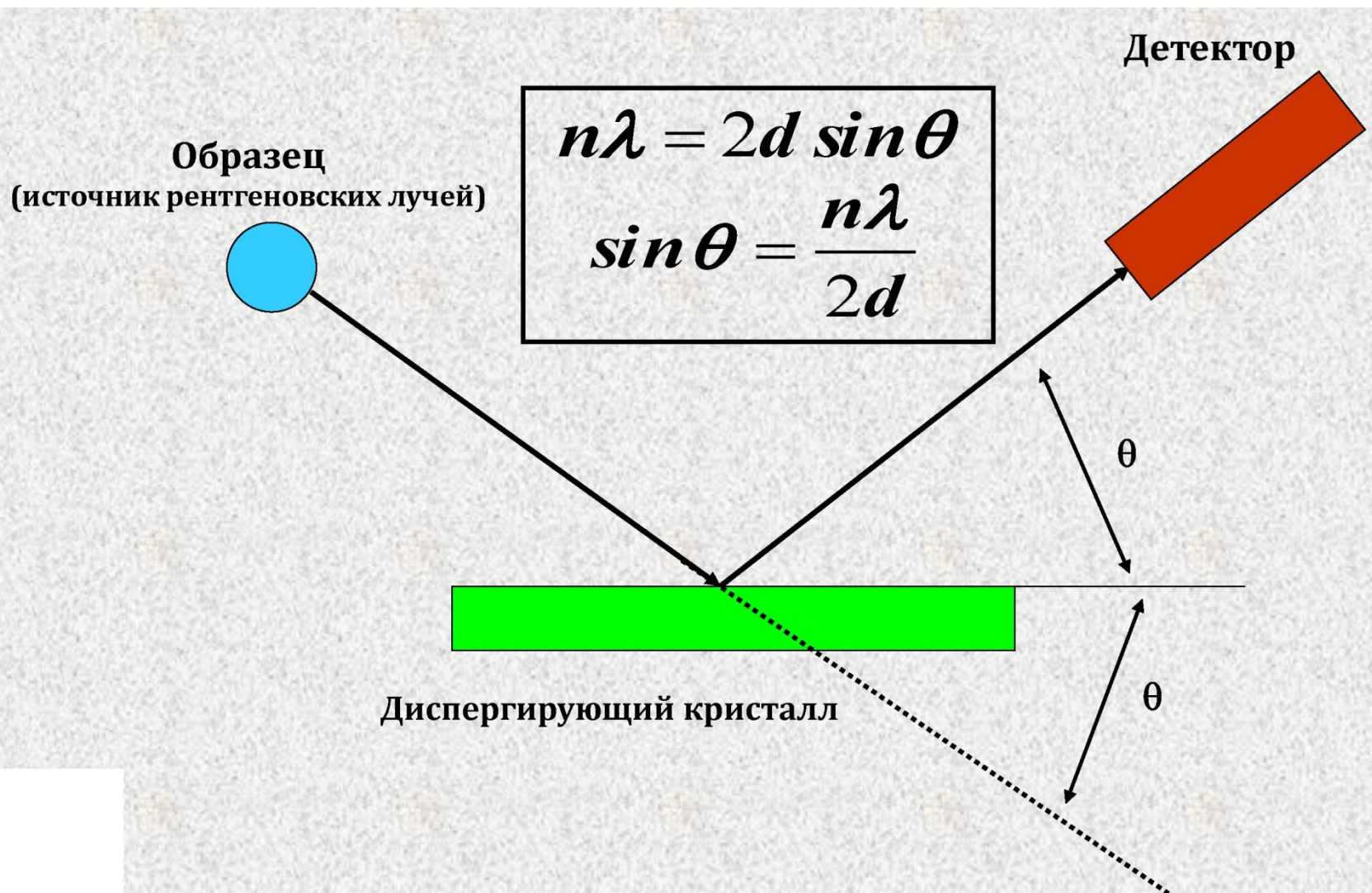


- **Энергодисперсионный спектрометр**

- Нет аналогов в дисперсионной спектрометрии
- Регистрируются только энергетические спектры



# Волнодисперсионный анализатор

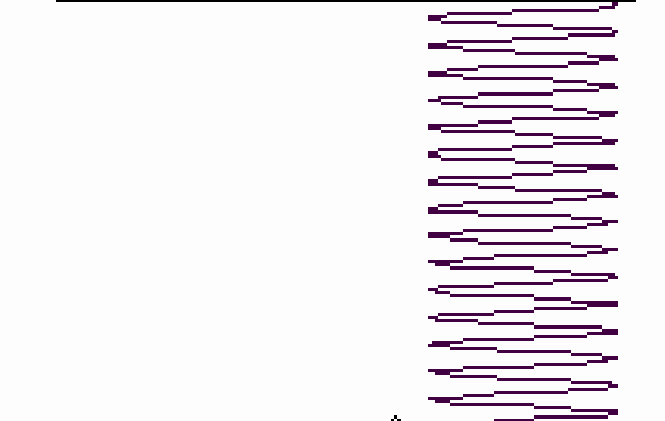
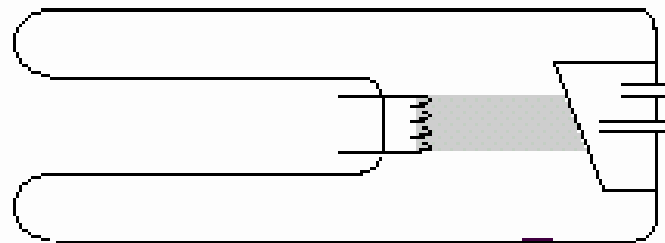


- Современные рентгенофлуоресцентные **спектрометры с волновой дисперсией** (РФСВД) представляют собой тонкие устройства очень сложной конфигурации
- Механические функции включают вращение детектора (гониометра), выбор одного из имеющихся дифракционных кристаллов, детектора, коллиматоров, фильтра между трубкой и пробой
- Все эти функции, а также высоковольтный генератор и система детектирования рентгеновского излучения, управляются с помощью компьютера
- В компьютере заложена также программа для качественного и количественного анализа
- Различают **волновые последовательные** и **волновые одновременные** приборы РФСВД

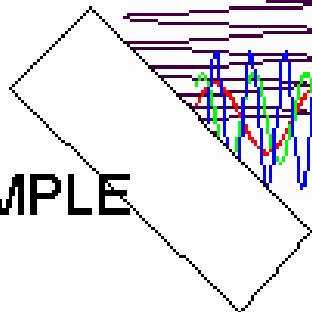


# Устройство волнодисперсионного последовательного рентгенофлуоресцентного спектрометра

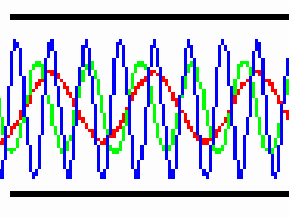
X-RAY TUBE



SAMPLE



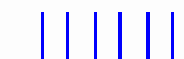
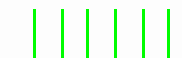
COLLIMATOR



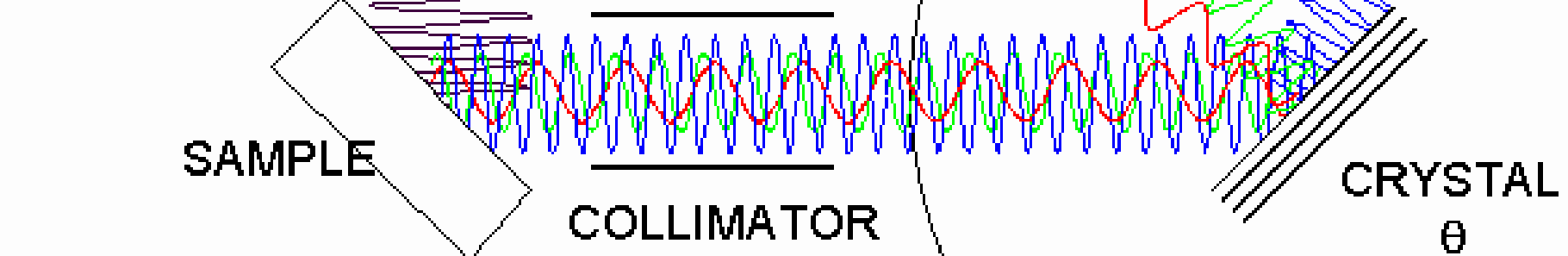
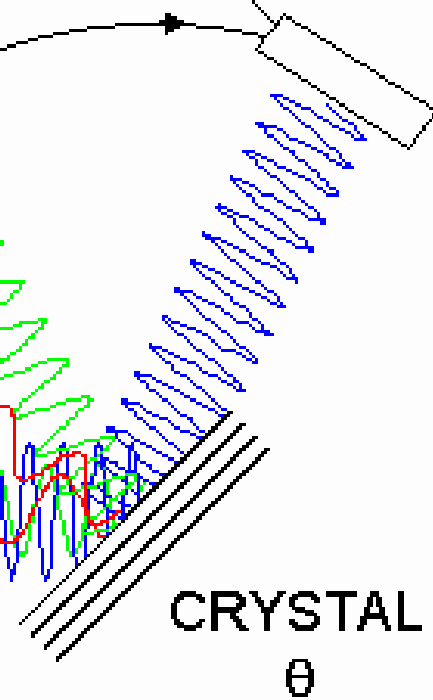
DETECTOR  
2θ



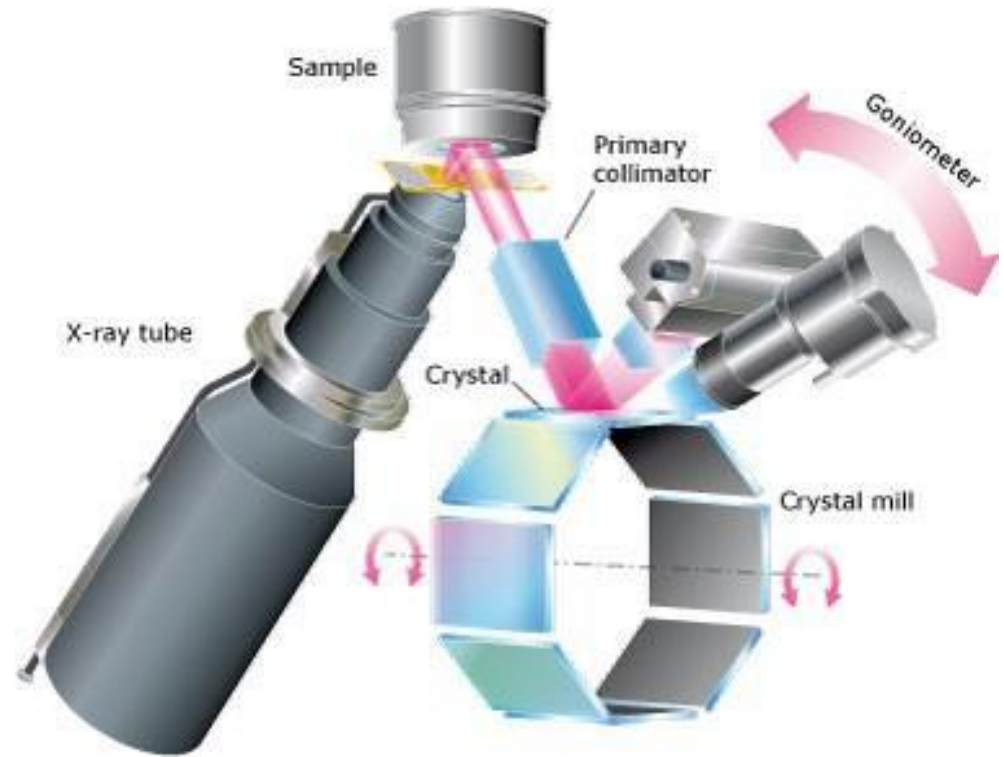
PULSE  
COUNTING



CRYSTAL  
θ



- **Последовательный** или **одноканальный** прибор имеет один кристалл
- осуществляется последовательное выделение каждой характеристической линии рентгеновского излучения любого числа элементов с помощью **движущегося кристалла-монокроматора** и высокоточного гониометра (прибора для измерения углов), сопряженного с устройством вращения, управляемого компьютером

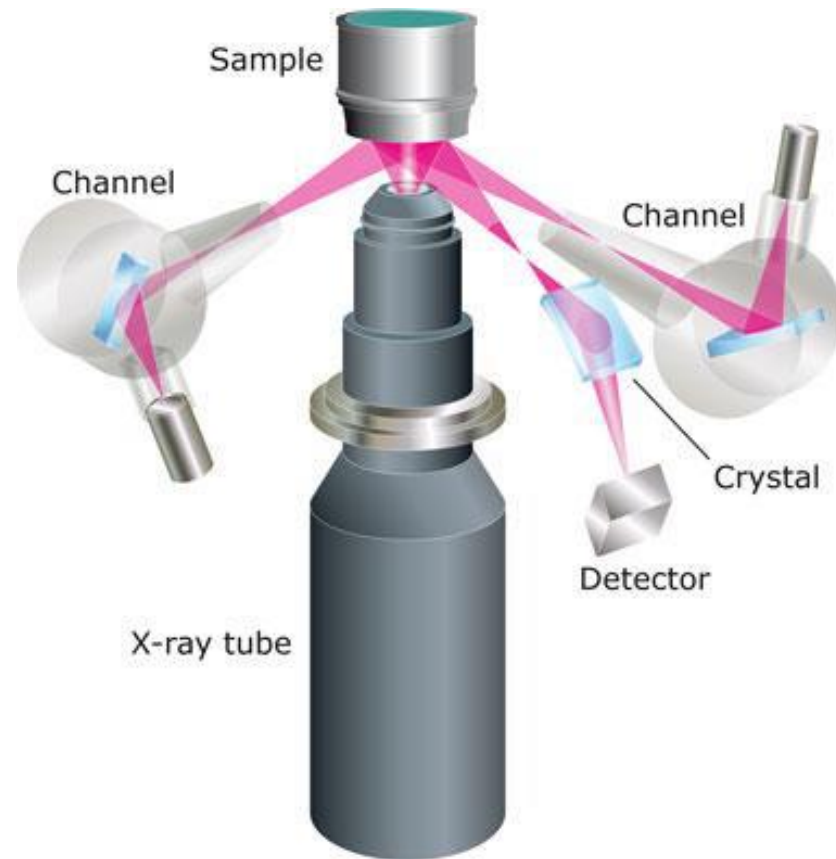


- Концентрацию различных элементов определяют, перемещая кристалл на нужный угол  $2d$  и измеряя интенсивность флуоресценции в течение времени интегрирования от 1 до 100 с. Следовательно, полное измерение может занимать до 30 минут

## Преимущества ВД-спектрометров последовательного действия:

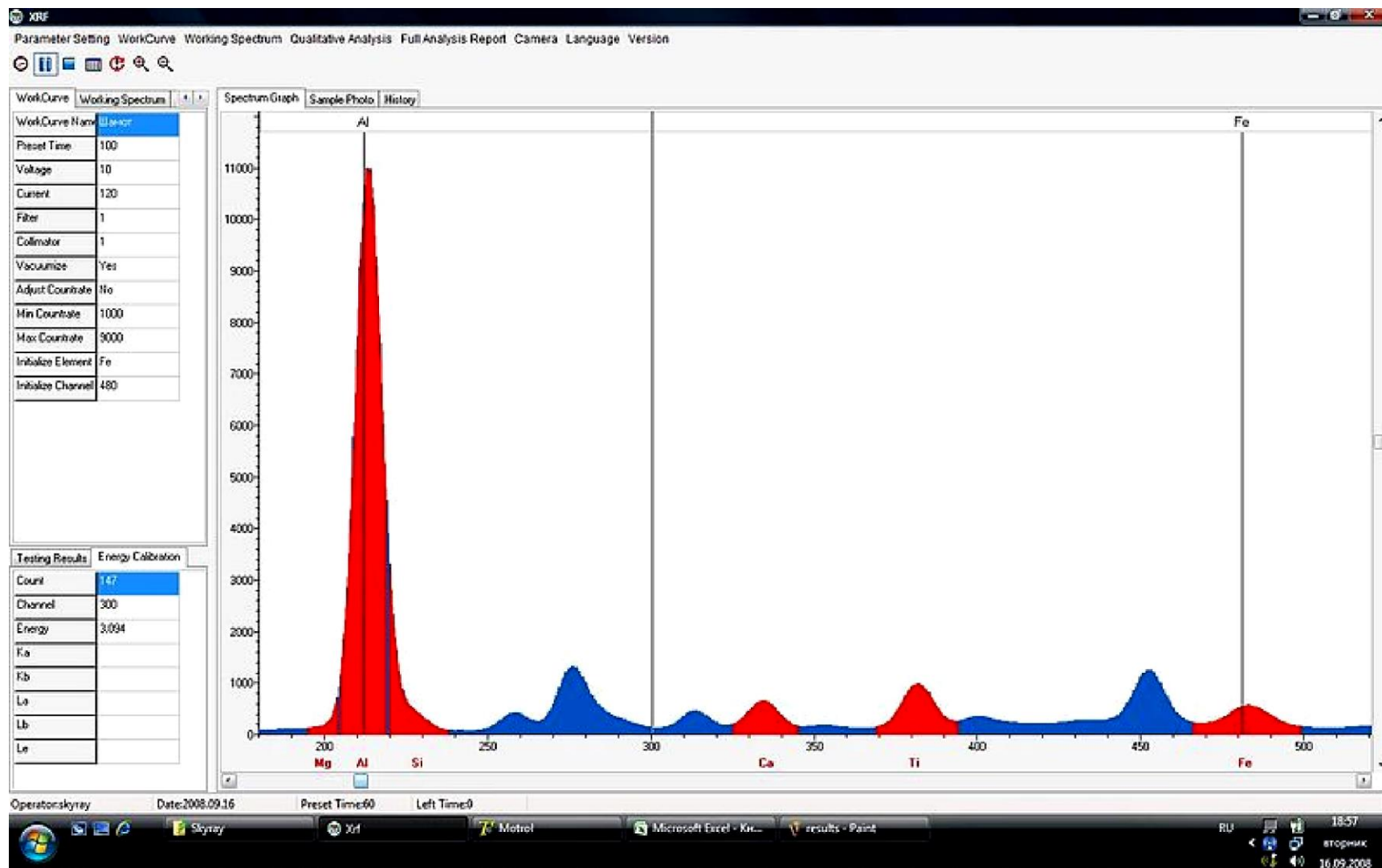
- Универсальность - определение любого числа элементов
- Оптимальные условия измерения программируются для каждого элемента
- Очень высокая чувствительность, низкие уровни детектирования
- Меньшая стоимость относительно параллельных спектрометров

- В **ВОЛНОВОМ** **одновременном** или **многоканальном** приборе размещают несколько комбинаций кристалл – детектор с фиксированными углами  $2\theta$  вокруг пробы
- **Фактически каждый из каналов является отдельным спектрометром с кристаллом-монохроматором** и детектором, настроенными на прием определенной длины волны одного элемента



- Многоэлементный анализ для фиксированного набора элементов можно выполнить за время от нескольких секунд до нескольких минут
- **Преимущества волновых** параллельных спектрометров:
- Высочайшая скорость анализа при использовании для поточного контроля качества в индустрии - экспресс-анализ технологического процесса
- Малое количество движущихся частей, прекрасная надежность в условиях промышленного предприятия

# Волнодисперсионный рентгенофлуоресцентный спектр



# Волнодисперсионный рентгенофлуоресцентный спектрометр СПЕКТРОКАН МАКС-GF2E

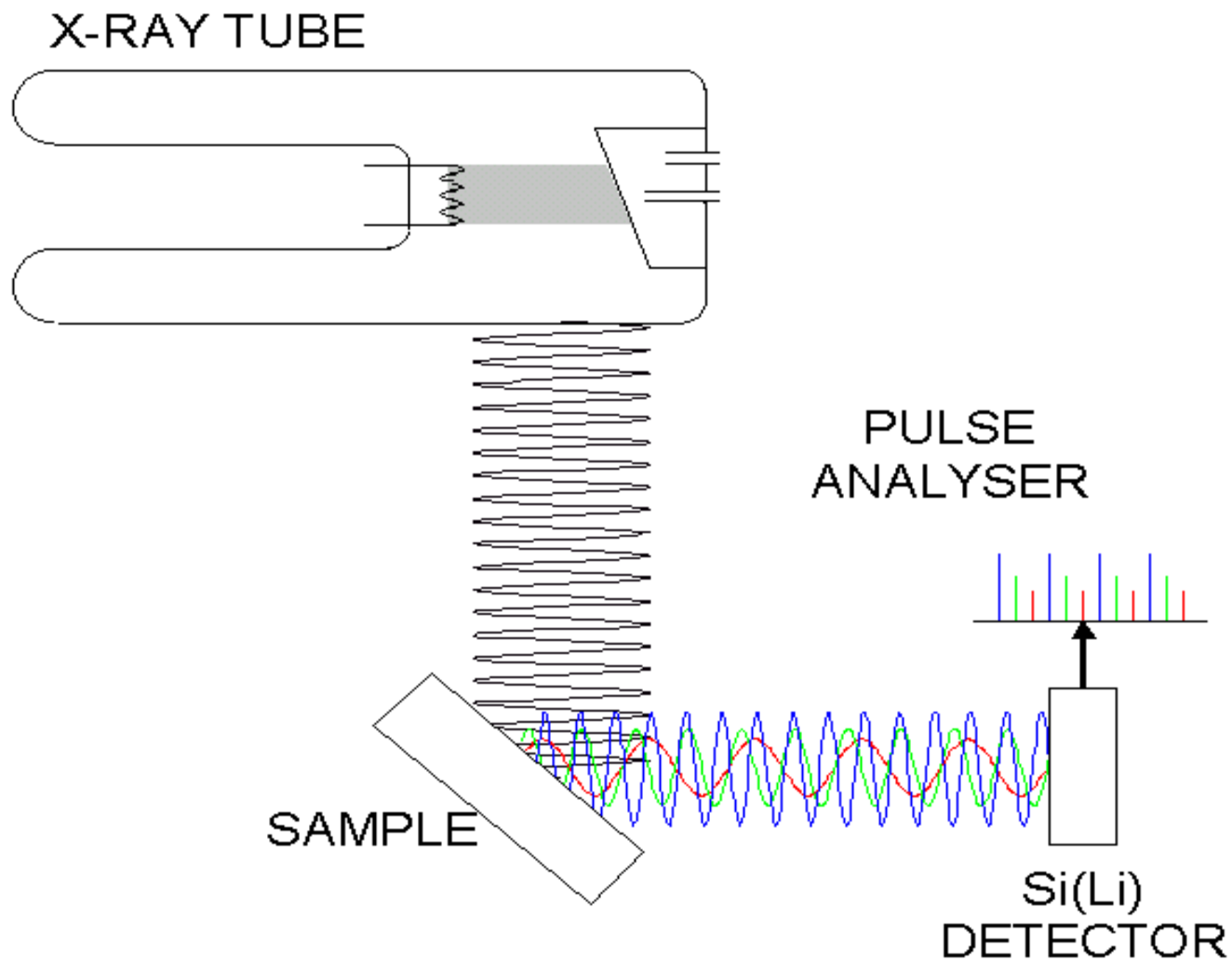


# Спектрометры с энергетической дисперсией

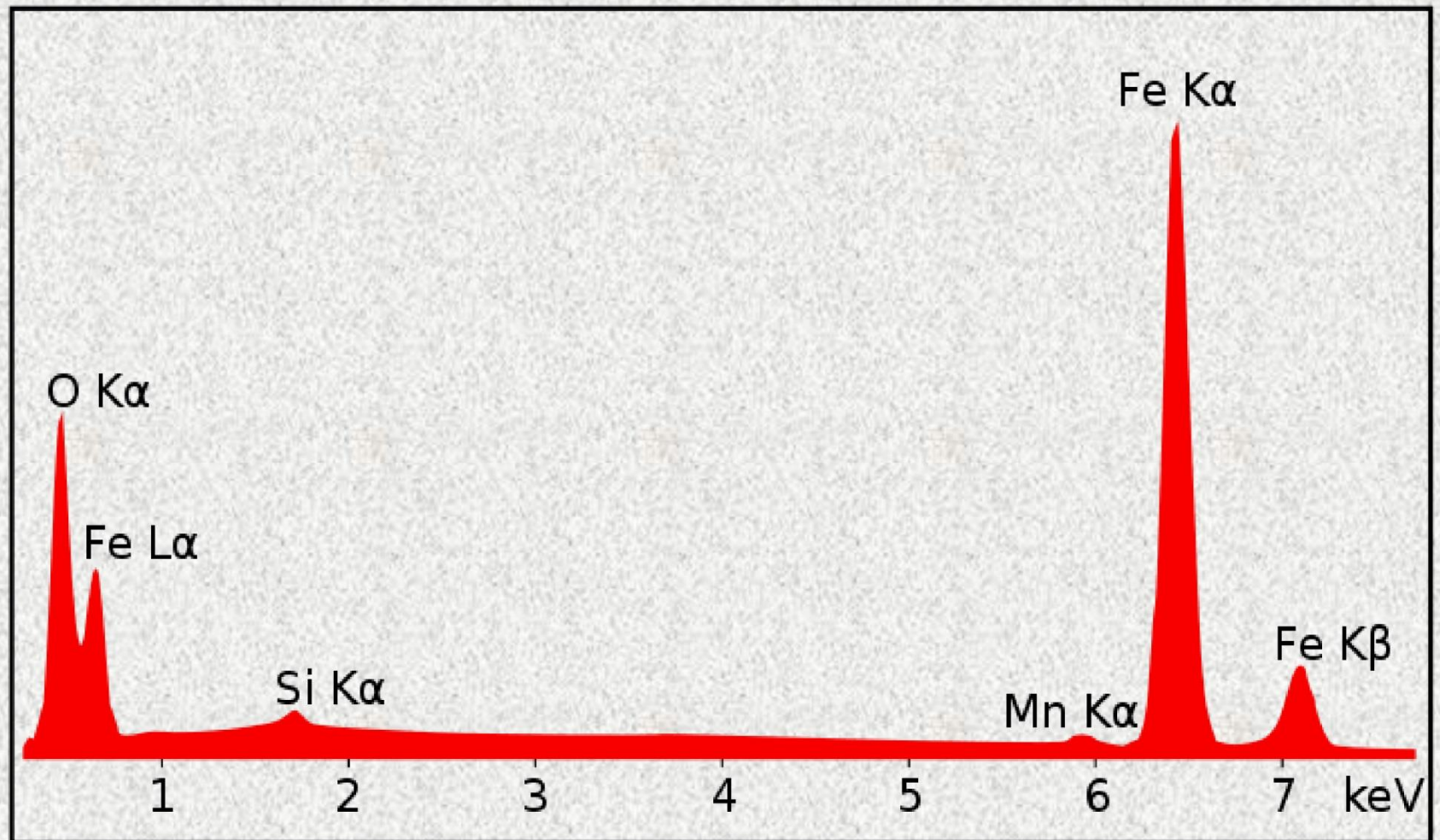
- Спектрометры с **энергетической дисперсией** имеют простую механическую конструкцию, значительно дешевле, но используют сложную электронику для обработки очень слабых сигналов от детектора
- Основная система включает рентгеновскую трубку низкой мощности и Si(Li)-детектор, оба расположенные под углом  $45^\circ$  к пробе . Для ограничения возбуждающего и флуоресцентного пучков в области образца применяют коллиматоры
- В отличие от ВД метода, при ЭД определении регистрируется одновременно весь диапазон энергий вторичного (характеристического) излучения от пробы. Таким образом, спектр представляет из себя зависимость интенсивности от энергий излучения элементов



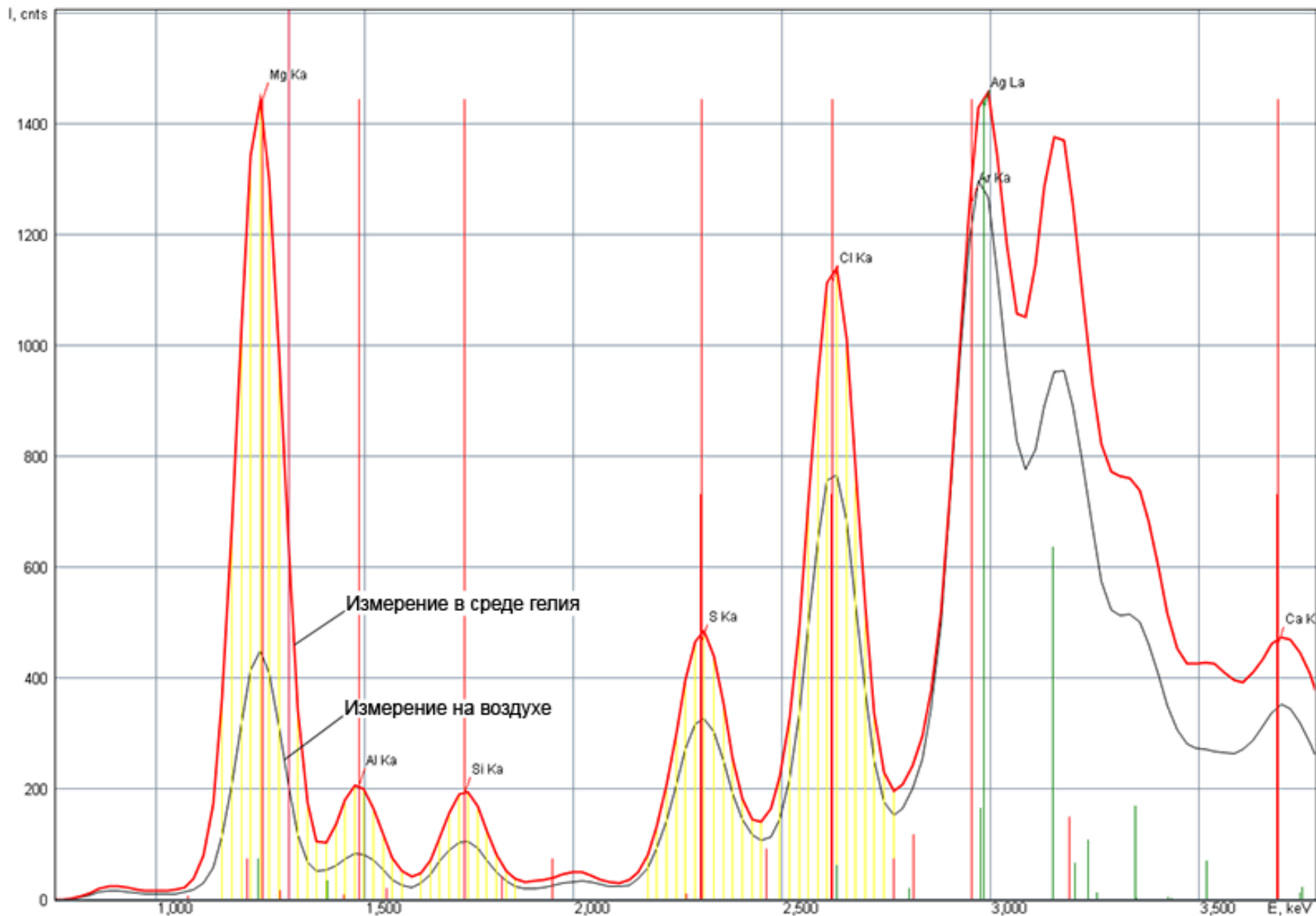
# Устройство энергодисперсионного рентгенофлуоресцентного спектрометра



# Энергодисперсионный рентгенофлуоресцентный спектр



- Чтобы улучшить определение элементов с низким атомным номером  $Z$ , всю систему заполняют гелием или вакуумируют
- Более усовершенствованная система включает использование вторичной мишени. В этом случае устраняется тормозное излучение трубки, что приводит к снижению фона в спектре и лучшим пределам обнаружения

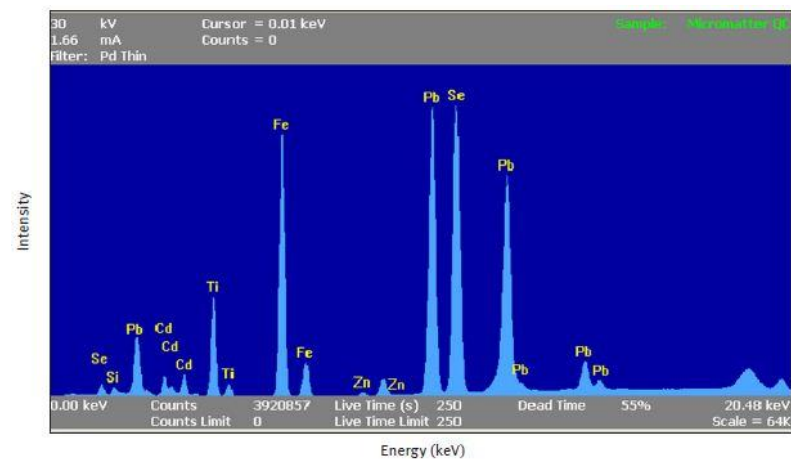


Спектры одного и того же образца, содержащего легкие элементы (Mg, Al, Si, Cl, S) полученные в атмосфере воздуха и гелия на приборе X-Art M.

# Энергодисперсионный рентгенофлуоресцентный спектрометр Shimadzu EDX-720 / 800HS



# Энергодисперсионный рентгенофлуоресцентный спектрометр QUANT'X



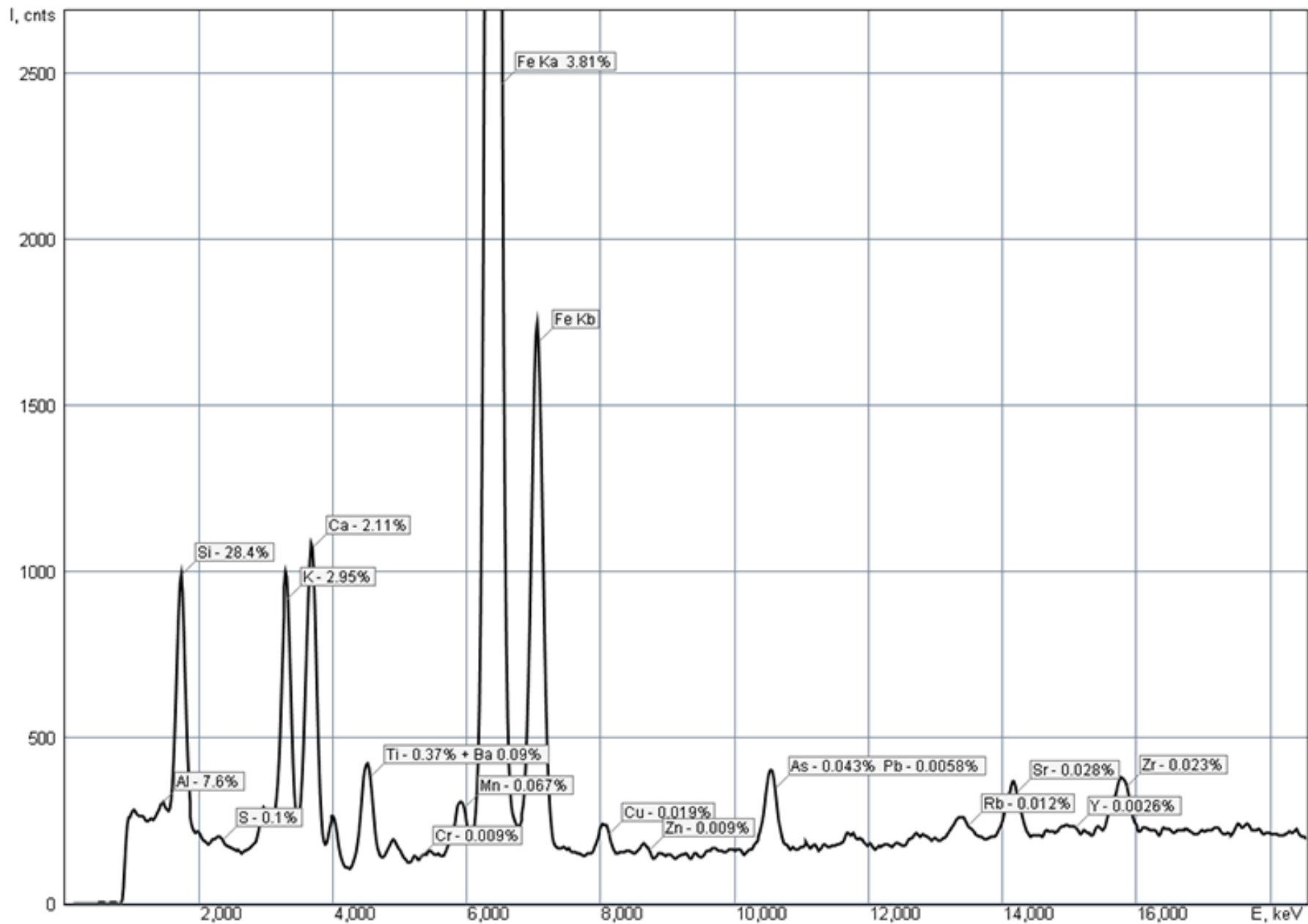
# Ручные рентгеновские анализаторы металлов



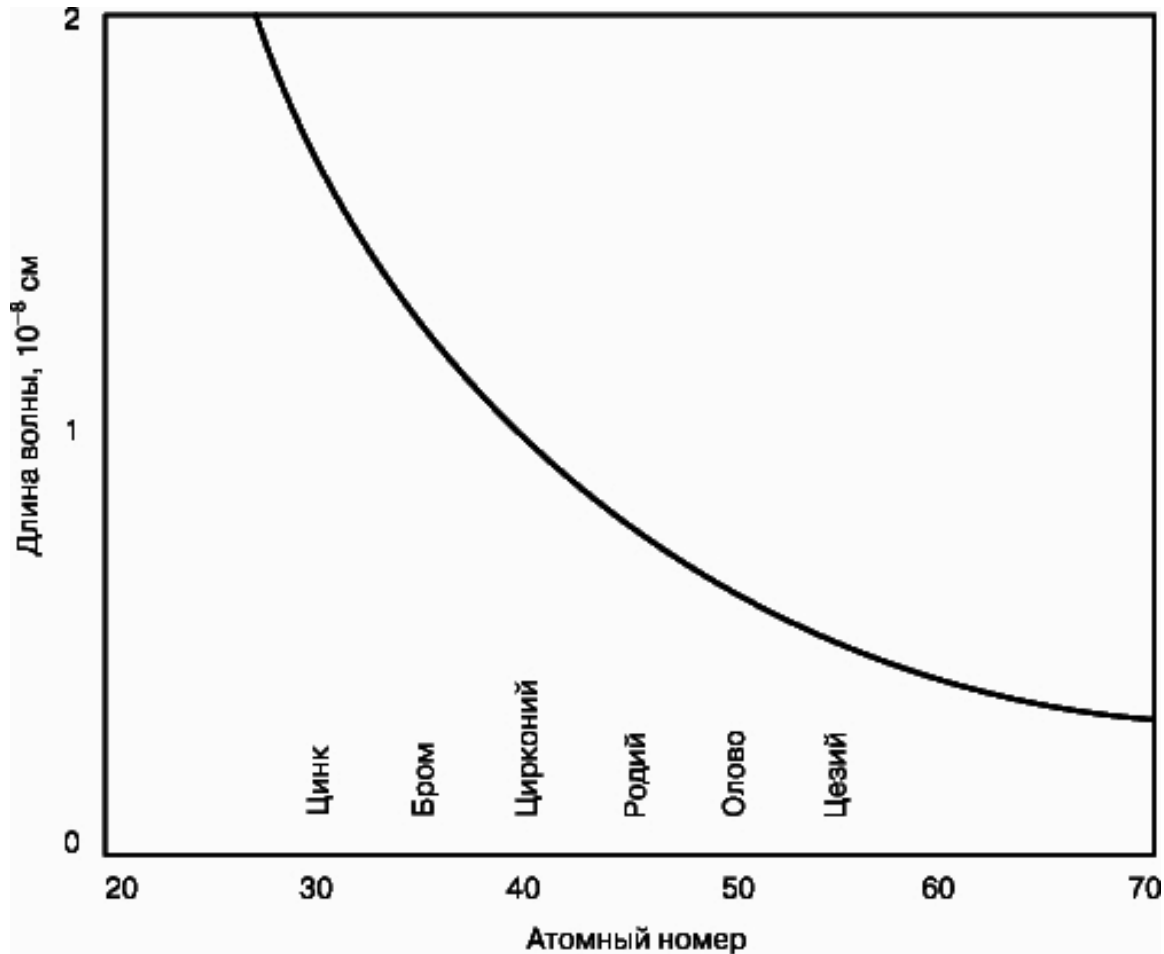
# Качественный анализ

- **Для качественного анализа** предпочтительнее использовать приборы с волновой дисперсией, т.к. разрешающая способность их выше
- **По пикам полученного спектра** можно качественно определить, какие элементы присутствуют в образце
- Для идентификации элемента руководствуются положением его линии в спектре





# Закон Мозли



**Зависимость длин волн рентгеновского излучения, испускаемого химическими элементами от атомного номера**

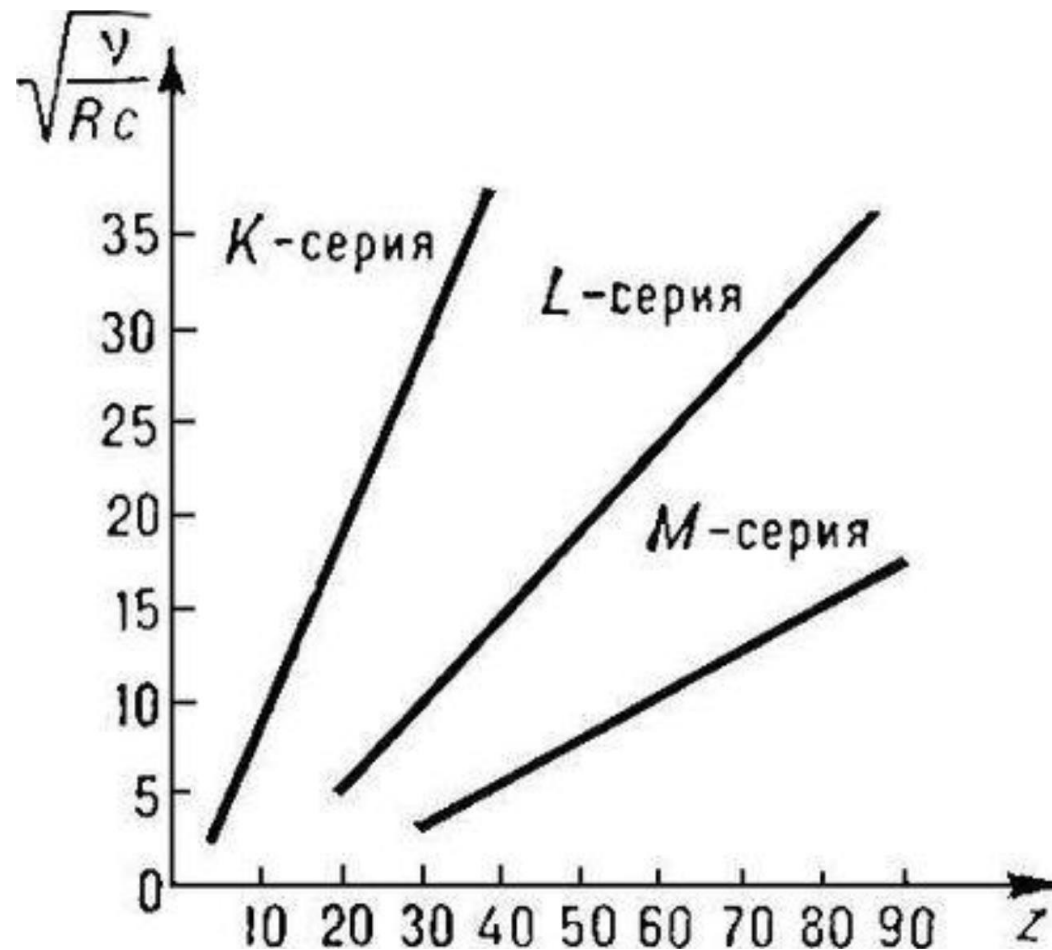
# Закон Мозли

$$\nu = A(z - \sigma)^2$$

$z$  – атомный номер элемента,  
 $A$ ,  $\sigma$  – константы для всех  
элементов в пределах одной  
серии линий

**Квадратный корень из частоты  
характеристического излучения  
есть линейная функция  
порядкового номера элемента**

- Установленная Мозли  
зависимость позволяет по  
измеренной длине волны или  
частоте рентгеновской линии  
точно узнать атомный номер  
исследуемого элемента



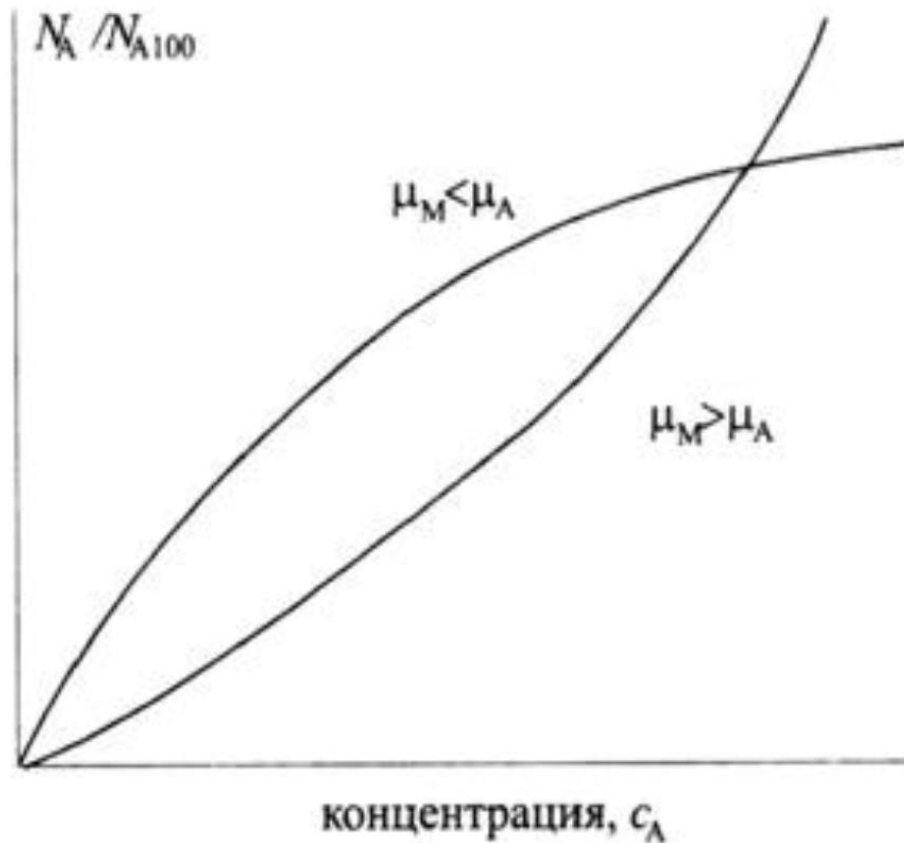
# Количественный анализ

- Важная особенность метода РФА – наличие **матричных эффектов**, вызванных физическими причинами
- Помимо непосредственного возбуждения атомов определяемого элемента первичным рентгеновским излучением, могут наблюдаться и другие взаимодействия излучения с веществом:
- Возбуждение атомов определяемого элемента под действием **вторичного излучения от атомов** элементов матрицы, что приводит к завышению аналитического сигнала
- **Поглощение первичного излучения** атомами матрицы, при этом АС оказывается заниженным
- **Поглощение вторичного излучения**, испускаемого атомами определяемого элемента, атомами матрицы (вторичное поглощение), что тоже приводит к занижению АС

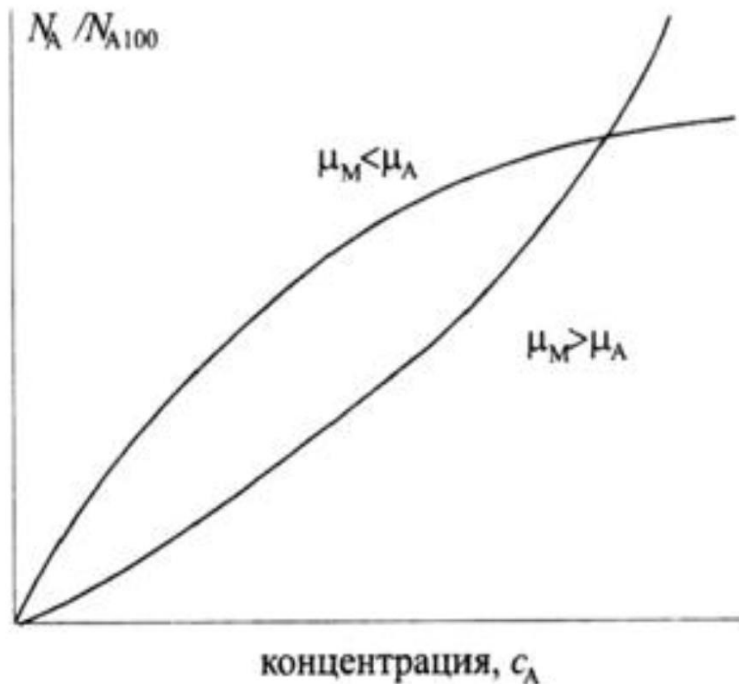
- В РФА детекторы регистрируют число импульсов в единицу времени – так называемую **скорость счета**, пропорциональную концентрации определяемого элемента **A**
- В условиях матричных эффектов **M** имеет место соотношение:

$$\frac{N_A}{N_{A100}} = \frac{\mu_A c_A}{\mu_A c_A + \mu_M c_M}$$

- $N_A$  - скорость счета, измеренная для пробы
- $N_{A100}$  - скорость счета для чистого вещества A
- $\mu_{A,M}$  - массовые коэффициенты поглощения (ослабления) для элементов A, M
- $c_{A,M}$  - концентрация элементов A, M



**Зависимость относительной скорости счета от концентрации определяемого элемента при различных соотношениях коэф. ослабления**



Зависимость относительной скорости счета от концентрации определяемого элемента при различных соотношениях коэф. ослабления

- Зависимость скорости счета от концентрации  $A$  линейна, если коэф-ты ослабления  $\mu_{A,M}$  равны
- В любом другом случае градуировочный график будет нелинейным
- В настоящее время разработано много способов коррекции матричных эффектов
- Важнейшие из них следующие

# Коррекция матричных эффектов

- **1. Метод внешнего стандарта** (метод градуировочного графика)

- График зависимости  $I = f(c_A)$  строят для стандартных образцов, соответствующих по составу анализируемой пробе
- при этом матричные эффекты в равной степени сказываются на скорости счета и для СО, и для пробы

$$c_A = c_{cm} \frac{I_A}{I_{cm}}$$

- $I_A, I_{cm}$  - интенсивности пробы и стандарта
- $c_A, c_{cm}$  - концентрация элемента в пробе и стандарте



# Коррекция матричных эффектов

- **2. Метод внутреннего стандарта**

В анализируемую пробу добавляют известное количество не содержащегося в ней элемента  $B$ , который называют внутренним стандартом или элементом сравнения

- Концентрацию  $A$  определяют с помощью соотношения :

$$c_A = c_B \frac{I_A}{I_B}$$

- Элемент сравнения должен отвечать ряду требований, чтобы избежать появления мешающих эффектов

- 3. Матричные эффекты можно уменьшить с помощью специальной пробоподготовки. Например, пробу можно **сильно разбавить** слабо поглощающим материалом – **сахарозой или целлюлозой**
- 4. Возможна коррекция **расчетным путем** – с использованием теоретических представлений о взаимодействии вещества с излучением (учитываются коэф-ты ослабления, выход флуоресценции, угол облучения поверхности образца, положение краев поглощения и т.д.)
- 5. **эмпирический математический подход** – создается формальная матем. модель, описывающая зависимость интенсивности линий от концентрации в виде функции (обычно полинома), учитывающей взаимные влияния элементов
- Используются и некоторые другие варианты

# Практическое применение РФЛА

- Традиционно методом РФЛА **определяют главные компоненты** – при анализе материалов металлургической, строительной, стекольной, керамической, топливной промышленности, в геологии
- В последнее время наблюдается расширение сферы применения метода в медицине и научно-исследовательских целях
- Методом РФЛА принципиально возможно определить 87 элементов от бора до урана
- **Определение легких элементов, однако, вызывает трудности,** поскольку для элементов с малым порядковым номером **выход флуоресценции невелик.** Кроме того, излучение легких элементов лежит в длинноволновой области. Такое излучение характеризуется малой проникающей способностью лишь около 1 мкм, поэтому регистрируемая интенсивность излучения мала
- В силу этих причин даже натрий можно определять лишь в некоторых типах приборов

# Практическое применение РФЛА

- Методом РФЛА анализируют главным образом **твердые образцы** - порошкообразные, стеклообразные, металлические
- Порошки должны иметь **размер зерен менее 300 мкм** для того, чтобы эффекты, связанные с рассеянием излучения, были воспроизводимыми. Образцы предварительно прессуют в таблетки без наполнителя или в смеси с целлюлозой, графитом либо поливиниловым спиртом.
- Для гомогенизации пробы можно использовать и метод **плавления**. В этом случае образец сплавляют с боратом натрия или лития в однородную стеклообразную массу. Этот способ пробоподготовки первоначально применяли при рентгенофлуоресцентном анализе продуктов стекольного производства.
- Металлические образцы анализируют непосредственно

# Практическое применение РФЛА

- Важная особенность РФС состоит в том, что это **неразрушающий метод анализа**
- Он исключительно удобен для анализа приповерхностного слоя материалов и произведений искусства
- незаменимым благодаря наличию портативных спектрометров с радиоактивными источниками излучения и детекторов с энергетической дисперсией
- Такие приборы можно легко доставить непосредственно к анализируемому объекту.

# Практическое применение РФЛА

- Наряду с главными компонентами, метод РФС позволяет определять и **сопутствующие**, а также – после концентрирования – **следовые** компоненты
- Однако для определения следов лучше использовать не традиционный, а один из современных вариантов РФС с энергетической дисперсией, называемый РФС с полным отражением
- Абсолютные пределы обнаружения в этом методе достигают нескольких нг. Кроме того, одна и та же градуировочная зависимость может быть использована для анализа образцов с разными матрицами.

# Некоторые аналитические задачи, легко решаемые при использовании РФ-спектрометров

- Массовый анализ горных пород и руд
- Экспрессное определение состава продуктов обогащения руд
- Определение элементов в легированных сталях
- Анализ археологических объектов (монет, серег, колец, шлаков, костей)
- Определение редкоземельных элементов в модельных материалах для захоронения высокоактивных отходов
- Определение драг. металлов в продуктах переработки плат электроники
- Определение характеристических элементов в косметической продукции
- Идентификация драгоценных камней и сплавов
- Исследование состава строительных материалов на предмет соответствия ГОСТ
- Химическое картирование горных выработок полевошпатового сырья
- Экспресс анализ осадков при электролитической очистке воды
- Анализ примесей в металлах
- Определение марок сплавов
- Обнаружение отклонений в технологических процессах по составу промежуточных продуктов