

20.03.01 - Техносферная безопасность

Профиль: Охрана природной среды и ресурсосбережение

Предмет: Аналитические методы контроля в
техносферной безопасности

Кафедра: Обогащение полезных ископаемых и
охрана окружающей среды – И-122.

Преподаватель: д.т.н., проф. Богданов Андрей
Викторович

Физические методы анализа



Рентгеноспектральный анализ

Рентгеноспектральный анализ (РСА) – раздел аналитической химии, использующий **рентгеновские спектры** элементов для химического анализа веществ.

Рентгеноспектральный анализ по положению и интенсивности линий характеристического рентгеновского излучения позволяет установить **качественный и количественный состав** и служит для экспрессного неразрушающего контроля состава вещества. Рентгеноспектральный анализ отличается сравнительно **простой схемой пробоподготовки** и **высокой точностью**, благодаря тому, что измерения интенсивностей аналитических линий происходят с **небольшой погрешностью**, поэтому активно используется в **аналитическом методе контроля в техносферной безопасности**.

При **столкновении** с поверхностью **анода** происходит резкое **торможение** электронов, возникает **тормозное (фоновое) излучение** непрерывного спектра, связанное с **превращением кинетической** энергии электронов в **энергию излучения**. **Интенсивность** его зависит **от величины ускоряющего напряжения** и порядкового номера атомов в составе анода. **Коротковолновую границу тормозного спектра** определяют по формуле Дьюана — Гента:

$$\lambda_{\min} = \frac{h \cdot c}{U \cdot q_e} = \frac{1,240}{U},$$

где h — постоянная Планка, равная $6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж * с; c — скорость света в вакууме, равная $3 \cdot 10^8$ м/с; U — ускоряющее напряжение, В; q_e — заряд электрона, равный $1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл. Длинноволновая граница тормозного спектра соответствует $\lambda_{\max} = 1,5 \cdot \lambda_{\min}$.

Рентгеновское возбуждение атомов вещества может возникать в результате **бомбардировки** образца **электронами** больших энергий или при его облучении рентгеновскими лучами. Первый процесс называется **прямым возбуждением**, последний – **вторичным или флуоресцентным**, лежащий в основе **рентгенофлуоресцентного** анализа. В обоих случаях **энергия электрона** или кванта первичной рентгеновской радиации, бомбардирующей излучающий атом, должна быть **больше энергии**, необходимой для вырывания электрона из определённой внутренней оболочки атома. Однако электронная бомбардировка исследуемого вещества приводит к появлению не только характеристического спектра элемента, но и, как правило, достаточно интенсивного непрерывного излучения.





Рентгенооптическая схема: 1 – исследуемый образец; 2 – рентгеновская трубка; 3 – входная щель; 4 – кристалл-анализатор; 5 – приемная (выходная) щель; 6 – блок детектирования

Методы рентгеноспектрального анализа позволяют изучить химический состав вещества. Этот способ может применяться также как экспресс-метод неразрушающего контроля.

В исследовании могут участвовать следующие **типы веществ**:

- **металлы и сплавы;**
- **почвы, горные породы;**
- **- стекло и керамика;**
- **- жидкости;**
- **абразивные материалы;**
- **газы;**
- **аморфные вещества;**
- **полимеры и другие органические соединения; белки и нуклеиновые кислоты.**

Рентгеноспектральный анализ позволяет определить также следующие **свойства** материалов:

- **фазовый состав;**
- **ориентацию и величину монокристаллов, коллоидных частиц;**
- **диаграммы состояния сплавов;**
- **атомную структуру и дислокацию кристаллической решетки;**
- **внутренние напряжения;**
- **коэффициент термического расширения и другие характеристики.**

В зависимости от способа генерирования рентгеновских лучей различают следующие **виды рентгеноспектрального анализа**:

- **Рентгенофлуоресцентный.** Возбуждение атомов производится **первичным** рентгеновским излучением (высокоэнергетическими фотонами). Это длится около микросекунды, после чего они переходят в спокойное, основное положение. При этом излишек энергии испускается в виде фотона. Каждое вещество излучает эти частицы с определенным уровнем энергии, благодаря чему можно произвести его точную идентификацию.
- **Рентгенорадиометрический.** Возбуждение атомов вещества осуществляется **гамма-излучением** от радиоактивного изотопа.
- **Электроннозондовый.** Активация производится сфокусированным пучком электронов с энергией в несколько десятков кэВ.
- **Анализ с ионным возбуждением** (протонами или тяжелыми ионами).

Наиболее распространенным методом рентгеноспектрального анализа является **флуоресцентный**. Рентгеновское возбуждение при бомбардировке образца электронами называется прямым, а при облучении рентгеновскими лучами – вторичным (флуоресцентным). Для генерирования рентгеновского излучения используют **рентгеновскую трубку**.

Рентгеновская трубка представляет собой **баллон**, внутри которого создается **вакуум**. На одном конце трубки имеется **катод в виде вольфрамовой проволоки**. Она накаливается электрическим током до температур, обеспечивающих испускание электронов. На другом конце расположен **анод в виде массивной металлической мишени**. Между катодом и анодом создается **разность потенциалов**, благодаря которой происходит **ускорение электронов**. Заряженные частицы, двигаясь с большой скоростью, попадают на анод и возбуждают тормозное излучение. В стенке трубки есть **прозрачное окно** (чаще всего его делают из бериллия), через которое происходит выход рентгеновских лучей. Анод в приборах рентгеноспектрального анализа изготавливается из нескольких видов металла: вольфрама, молибдена, меди, хрома, палладия, золота, рения.



Подготовка проб для РСА

Для проведения исследования предварительно требуется подготовка проб. Они должны отвечать следующим **условиям** для рентгеноспектрального анализа:

- **Однородность.** Проще всего это условие можно обеспечить для жидких образцов. При расслоении раствора непосредственно перед проведением исследования его перемешивают. Для химических элементов в коротковолновой области излучения гомогенность достигается истиранием в порошок, а в длинноволновой – сплавлением с флюсом.
- **Устойчивость к внешним воздействиям.** Соответствие размерам пробозагрузочного устройства.
- **Оптимальная шероховатость** твердых образцов.

Порошковые образцы насыпают **в кювету и прессуются**. Кювету через переходник устанавливают в **обойму**. Для количественного анализа порошковые пробы рекомендуется спрессовывать в **таблетированный вид**. Для этого вещество **истирают** до состояния мелкой **пудры**, а затем делают **таблетки** на прессе. Для закрепления рассыпчатых веществ их помещают на подложку из **борной кислоты**. Жидкости наливают в кюветы с помощью пипетки, проверяя при этом отсутствие пузырьков.

Подготовку образцов, выбор методики анализа и оптимального режима, подбор эталонов и построение по ним аналитических графиков осуществляется лаборантом рентгеноспектрального анализа, который должен знать основы физики, химии, устройство спектрометров и методику проведения исследования.



Пресс для таблетирования проб



Таблетированные пробы

К преимуществам рентгеноспектрального метода относятся:

- возможность **неразрушающего** исследования;
- высокая **чувствительность и точность** (определение содержания примесей до 10-3%);
- **широкий диапазон** анализируемых химических элементов;
- **простота подготовки** образцов;
- **универсальность**;
- возможность **автоматической интерпретации** и высокая **производительность** метода.

Среди **недостатков** рентгеноспектрального анализа выделяют следующие:

- повышенные требования по **технике безопасности**;
- необходимость **индивидуальной градуировки**;
- **затрудненную интерпретацию** химического состава при **близком расположении** характеристических линий некоторых элементов;
- необходимость изготовления анодов из **редких материалов** для уменьшения фонового характеристического излучения, влияющего на достоверность результатов.

Рентгеноспектральный флуоресцентный анализ применяется в следующих целях:

- определение вредных примесей в **нефти и нефтепродуктах** (бензин, смазки и другие);
- **тяжелых металлов, оксидов металлов и других опасных соединений** в объектах окружающей среды (почве, воздухе, воде и т.д.), пищевых продуктах;
- анализ **катализаторов** в химической промышленности;
- прецизионное определение **периода кристаллической решетки**;
- выявление **толщины защитных покрытий** неразрушающим методом;
- определение **источников сырья**, из которых изготовлен предмет;
- вычисление **микрообъемов вещества**;
- определение **основных и примесных компонентов горных пород** в геологии и металлургии;
- исследование **объектов**, представляющих **культурно-историческую ценность** (иконы, картины, фрески, украшения, посуда, украшения и прочие предметы из различных материалов), их датирование;
- определение **состава для криминалистического анализа**.

Примеры оборудования для РСА



**Спектрометр
рентгенофлуоресцентный
волнодисперсионный вакуумный
Спектроскан МАКС-GV**



**Энергодисперсионный
рентгенофлуоресцентный
спектрометр EDX-7000**

Инфракрасная спектроскопия

Инфракрасная

спектроскопия (колебательная

спектроскопия, средняя

инфракрасная

спектроскопия, ИК-

спектроскопия, ИКС)

—

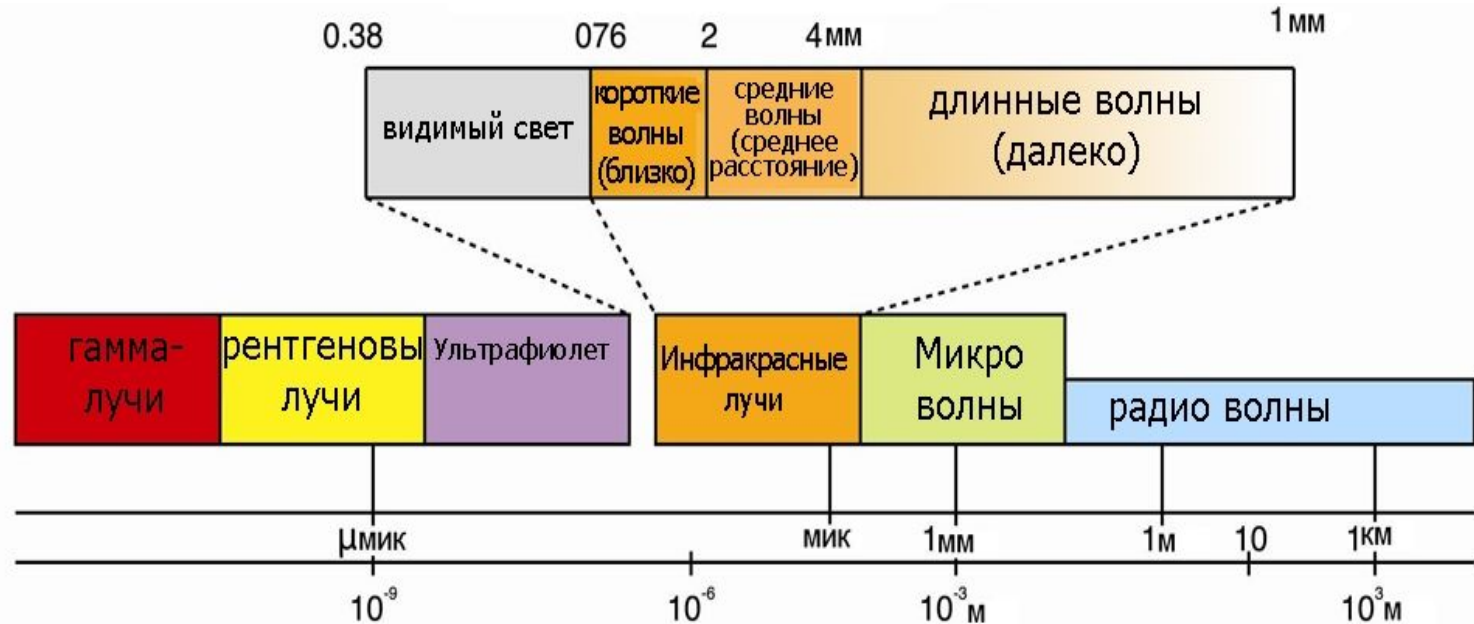
раздел спектроскопии,

изучающий

взаимодействие **инфракрасного излучения с веществами.**

При **пропускании инфракрасного излучения** через вещество происходит **возбуждение колебательных движений молекул** или их отдельных фрагментов. При этом наблюдается **ослабление интенсивности света**, прошедшего через образец. Однако поглощение происходит не во всём спектре падающего излучения, а лишь при тех длинах волн, энергия которых соответствует энергиям возбуждения колебаний в изучаемых молекулах. Следовательно, длины волн (или частоты), при которых наблюдается максимальное поглощение ИК-излучения, могут свидетельствовать о наличии в молекулах образца тех или иных **функциональных групп** и других фрагментов, что широко используется в различных областях химии для установления **структуры соединений**. Как правило в аналитических методах контроля техносферной безопасности ИК-спектроскопия используется для определения **органических веществ**, например, **нефтепродуктах** в почве, грунтах, донных отложениях, воде.

Метод ИК-спектроскопии основан на поглощении веществом инфракрасного излучения, в результате чего происходит усиление **колебательных движений молекул**



$$\nu = 1/\lambda \quad \text{волновое число [см}^{-1}\text{]}$$

«ближняя» ИК область 12500 - 4000 см^{-1}

«средняя» ИК область 4000 - 400 см^{-1}

«дальняя» ИК область 400 - 50 см^{-1}

Методы, основанные на взаимодействии вещества с излучением ИК-области спектра являются **абсорбционными**, т.е. основанными на явлении поглощения излучения. Эмиссионные методы в этой области спектра не используют ввиду трудностей получения и регистрации спектров испускания. В ИК-области для характеристики энергии фотонов чаще всего используют величину, называемую **ВОЛНОВЫМ ЧИСЛОМ**, измеряемым в обратных сантиметрах (см^{-1})

$$\bar{\nu} = \frac{1}{\lambda} \quad E = hc\bar{\nu}$$

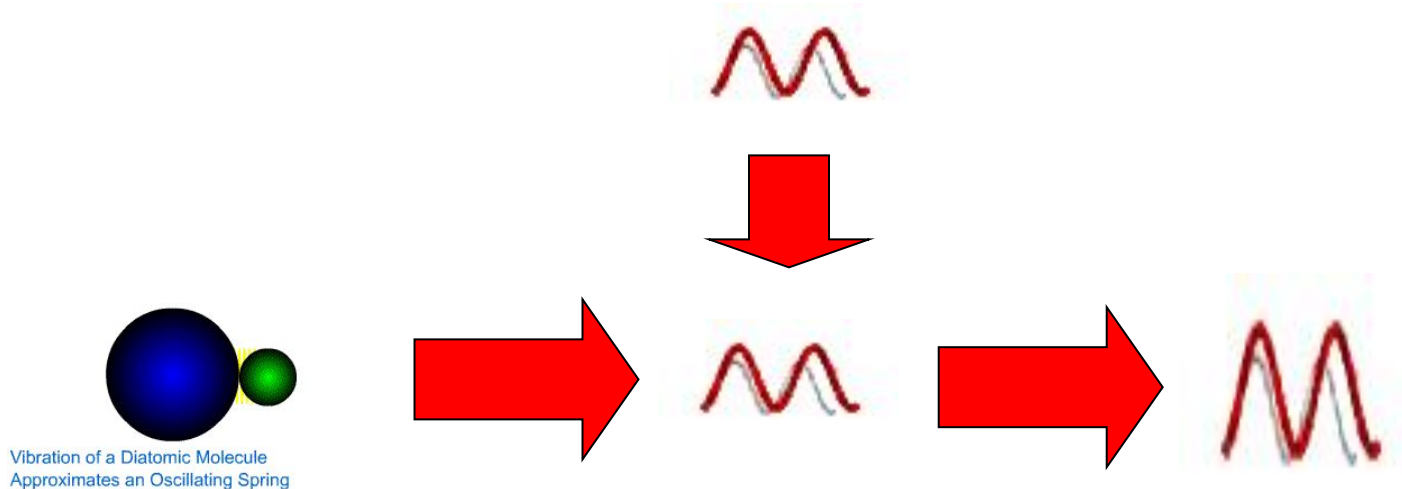
Число длин волн, укладывающихся на отрезке 1 см.

При попадании ИК излучения на молекулу она **поглощает** излучение тех частот, которые совпадают с частотами **собственных колебаний** молекулы.

После поглощения этого излучения молекулярные **осцилляторы** будут продолжать **колебаться** с теми же частотами, но амплитуда их колебаний увеличится. Каждое колебание в молекуле имеет определенную частоту, которая зависит от:

- **вида колебания** (валентные колебания имеют бóльшую частоту, чем деформационные колебания тех же связей);
- **массы атомов**, участвующих в образовании связи;
- **прочности** связи.

ИК излучение (от источника в ИК спектрометре)



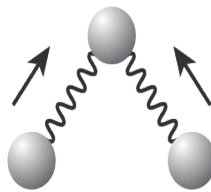
Электромагнитное поле (от колебаний молекулы)

Типы нормальных колебаний

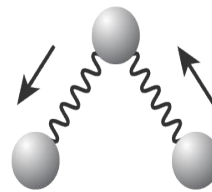
1. Валентные (изменение длины связи)

1А. Симметричные

1Б. Асимметричные



1А



1Б

• 2А. Ножничное

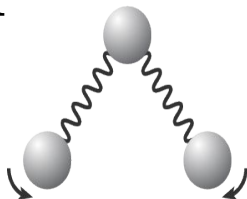
• 2Б. Маятниковое

• 2В. Веерное

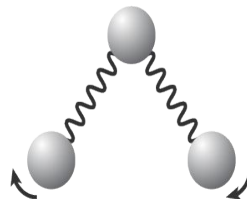
• 2Г. Крутильное

• 2А-2Б – в плоскости

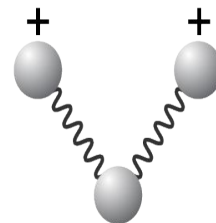
• 2В -2Г – вне плоскости



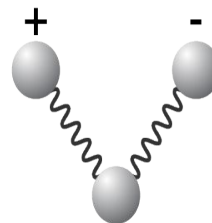
2А



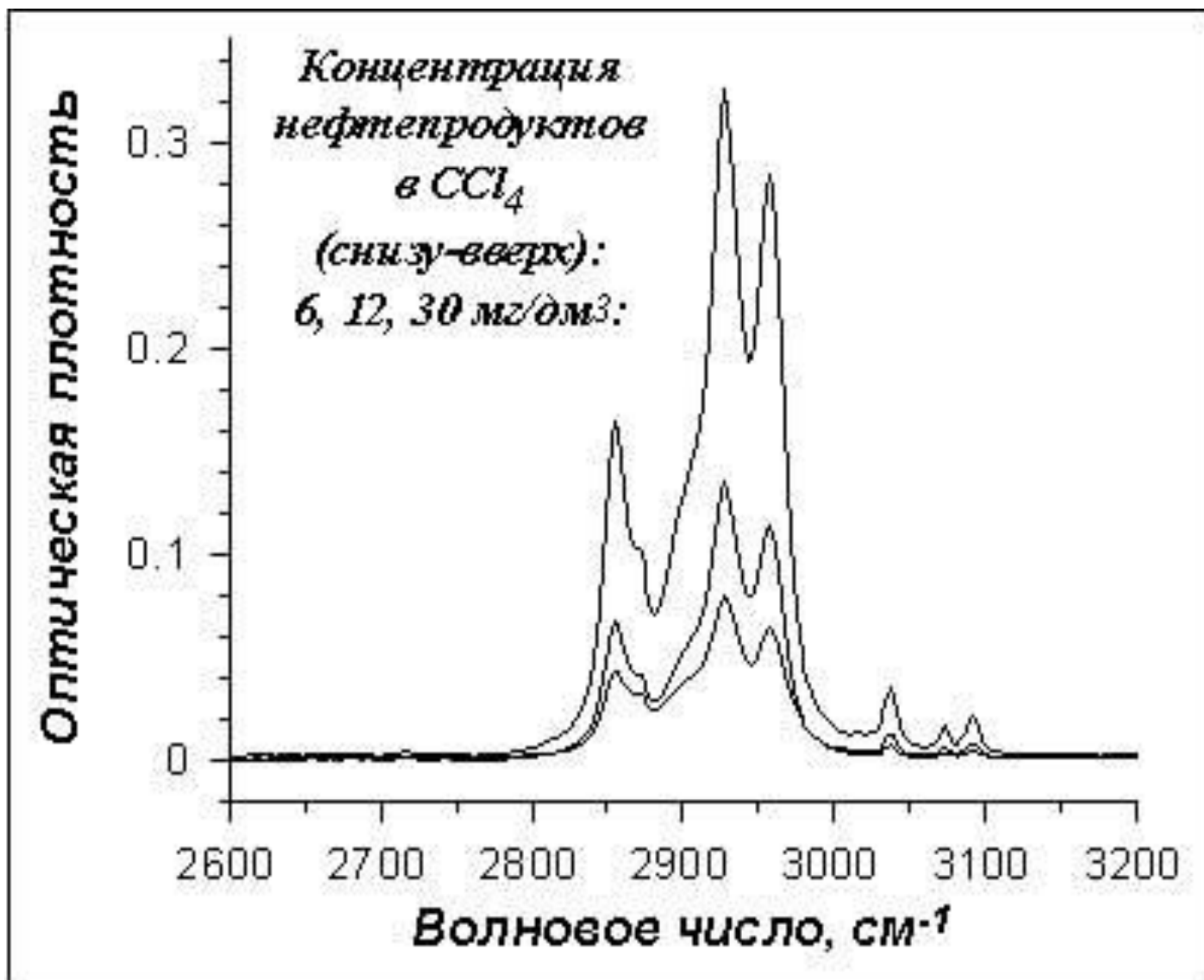
2Б



2В



2Г



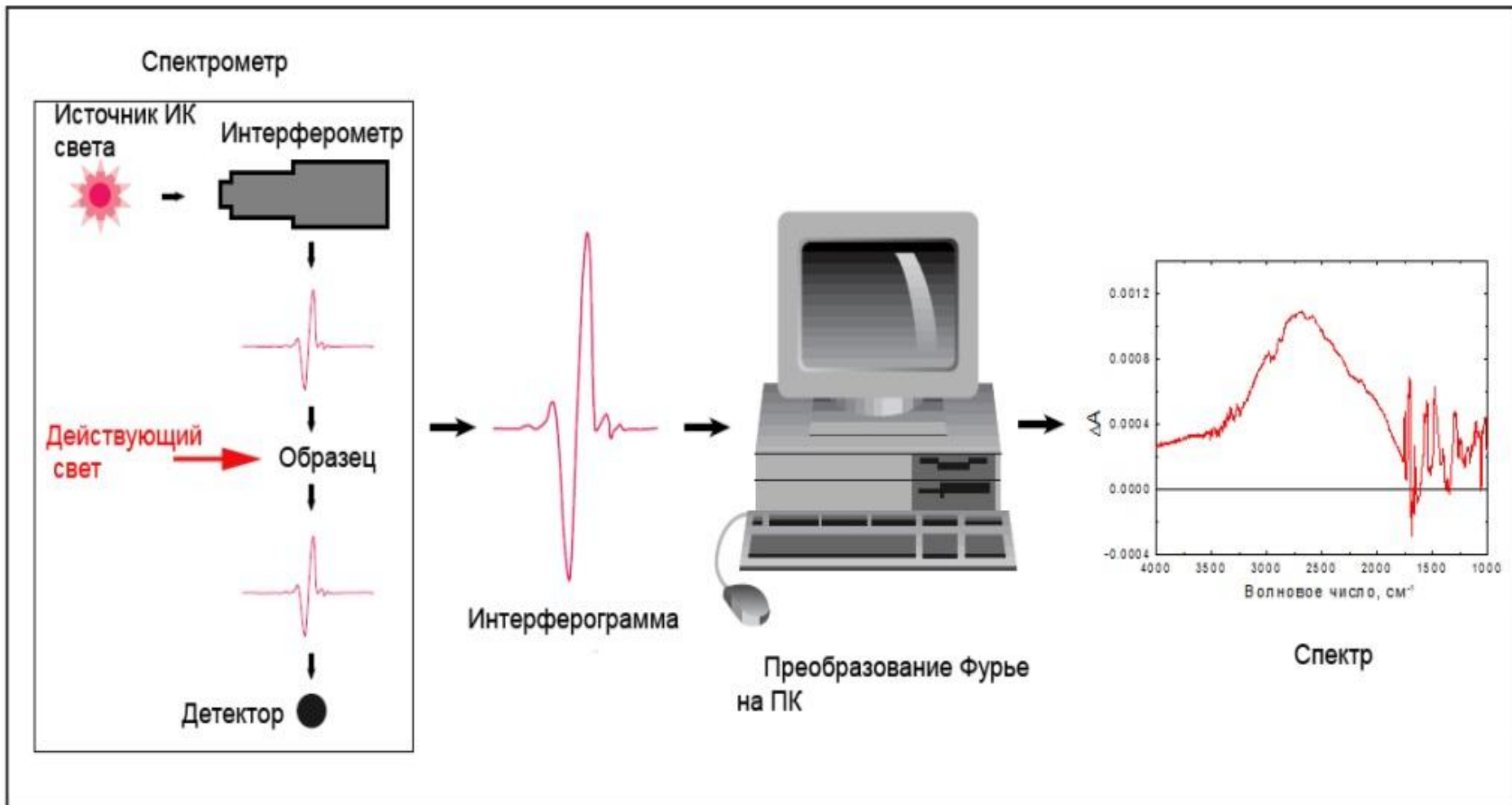
Пример ИК-спектра нефтепродуктов

ИК-Фурье спектроскопия

Используемый вместо последовательного облучения образца с переменной длиной волны (с дисперсией), метод ИК-Фурье позволяет собрать все спектральные данные за один проход. Для этого необходим **непрерывный источник**, который излучает свет в широком диапазоне инфракрасных длин волн. Инфракрасный свет проходит через **интерферометр** (измерительный прибор, действие которого основано на явлении интерференции) и направляется на образец.

На выходе получается **интерферограмма**, исходный сигнал, который показывает интенсивность излучения как функцию позиции зеркала. Для восстановления более понятного ИК-спектра в терминах интенсивности или волнового числа требуется произвести **преобразование Фурье**. Отсюда название «**ИК-Фурье**».

Сбор ИК-спектров на основании преобразования Фурье занимает намного **меньше времени**, чем с помощью обычных дисперсионных методов. Дополнительно такие спектры имеют существенно большее соотношение сигнала к шуму и – благодаря калибровке шкалы длин волн при помощи прецизионного лазера – намного **выше точность** по длине волны.



ИК-Фурье спектроскопия

Пробоподготовка для ИК-спектроскопии

1. **Прессование таблеток** с галогенидами щелочных металлов - основной и наиболее универсальный способ пробоподготовки. Он заключается в тщательном перемешивании в агатовой ступке тонкоизмельченного образца с порошком **KBr** и последующем прессовании смеси в пресс – форме.
2. **Суспензионный метод** представляет собой растирание образца до мелкодисперсного состояния и приготовление суспензии в иммерсионной жидкости с близким к образцу показателем преломления. При этом в качестве матрицы обычно используют **вазелиновое масло, фторированные или хлорированные масла**. Полученная полупрозрачная паста наносится с помощью шпателя на окно из оптического материала в виде тонкой **равномерной пленки**.
3. **Получение пленок**. При таком способе пробоподготовки необходимо на окошке из оптического материала сформировать тонкую **прозрачную пленку** диаметром 3-5 мм.
4. **Метод нарушенного полного внутреннего отражения** (МНПВО). Использование МНПВО основано на том, что на границе раздела фаз образца и оптического материала (кристалла из галогенидов таллия или селенида цинка) возникает "затухающая волна" ИК-излучения, проникающая на некоторую глубину в оптически менее плотную среду (образец), при этом регистрируется спектр пропускания ультратонких верхних слоев образца. Меняя угол падения.

Применение ИК-спектроскопии

В решении проблем охраны окружающей среды ИК-спектроскопия используется прежде всего для **идентификации структур неизвестных загрязнителей** органической природы. Кроме того с помощью ИК-спектрометров можно определять на уровне ПДК в атмосфере и воздухе рабочей зоны **неорганические газы** (CO , CO_2 , NH_3 , HCl , H_2S , SO_2 , O_3 и др.), а также некоторые **летучие органические соединения** (**формальдегид, метанол, пероксиацетилнитрат, муравьиная кислота и др.**). На этой основе создано несколько газоанализаторов. Известна также методика определения нефтепродуктов по их ИК-спектрам (CH_2 и CH_3 — группы), которой широко пользуются в Европе.

Примеры оборудования для ИК-спектроскопии



**ИК-Фурье спектрометр
IRPrestige-21**



**ИК-Фурье спектрометр
Nicolet iS50**

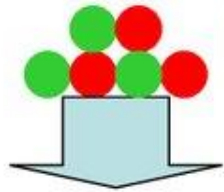
Хроматографический метод анализа

Хроматография в настоящее время является наиболее широко используемым методом исследования объектов окружающей среды, как правило при определении различных **органических веществ**, таких как **бенз(а)пирен**, **формальдегид**, **фенолы**, **пестициды**, а также для определения **анионов и катионов** (кальций, магний, калий, натрий, сульфаты, хлориды, нитраты и др.).

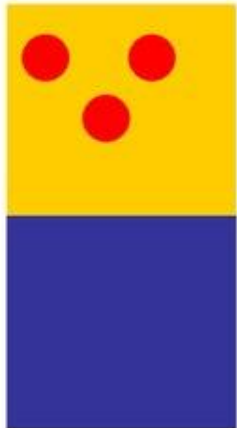
Хроматография – это метод **разделения и определения** веществ, основанный на **распределении** компонентов между двумя **фазами** – **подвижной** и **неподвижной**. **Неподвижной** (стационарной) фазой служит **твердое пористое вещество** (часто его называют **сорбентом**) или **пленка жидкости**, нанесенная на твердое вещество. **Подвижная** фаза представляет **собой жидкость или газ**, протекающий через неподвижную фазу, иногда под давлением.

Компоненты анализируемой смеси (**сорбаты**) вместе с подвижной фазой **передвигаются вдоль стационарной фазы**. Ее обычно помещают в стеклянную или металлическую трубку, называемую **колонкой**. В зависимости от силы взаимодействия с поверхностью сорбента (за счет адсорбции или по какому-либо другому механизму) компоненты будут перемещаться вдоль колонки с **разной скоростью**. Одни компоненты останутся в **верхнем слое** сорбента, другие, в меньшей степени взаимодействующие с сорбентом, окажутся в **нижней части колонки**, а некоторые и вовсе покинут колонку вместе с подвижной фазой.

Принцип хроматографического разделения веществ



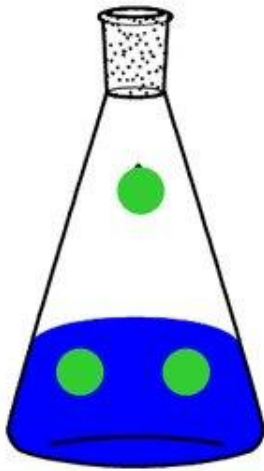
Молекулы разделяемых веществ



Неподвижная фаза

Подвижная фаза

Эффект разделения основывается на том, что соединения проходят расстояние, на котором происходит разделение, с некоторой, присущей этому соединению задержкой



Хроматографический процесс состоит из целого ряда сорбции и десорбции, а также растворения и элюирования, которые каждый раз приводят к новому равновесному состоянию

В зависимости от природы взаимодействия, обуславливающего распределение компонентов между элюентом и неподвижной фазой, различают следующие основные виды хроматографии:

Адсорбционная хроматография основана на различии сорбируемости разделяемых веществ адсорбентом (твёрдое тело с развитой поверхностью);

Распределительная хроматография - на разной растворимости компонентов смеси в неподвижной фазе (высококипящая жидкость, нанесённая на твёрдый макropористый носитель) и элюенте;

Ионообменная хроматография - на различии констант ионообменного равновесия между неподвижной фазой (ионитом) и компонентами разделяемой смеси;

Эксклюзионная (молекулярно-ситовая) хроматография - на разной проницаемости молекул компонентов в неподвижную фазу (высокопористый неионогенный гель).

Осадочная хроматография основана на различной способности разделяемых компонентов выпадать в осадок на твёрдой неподвижной фазе.

В соответствии с агрегатным состоянием элюента различают:
Газовую хроматографию ГХ (GC) и **Высоко эффективную жидкостную хроматографию** ВЭЖХ (HPLC).

Хроматография

Планарная

Колоночная

Тонко-
слойная

Бумажная

Жидкостная

Газовая

Сверхкрити-
ческая
флюидная

Обращенно-
фазовая

Нормально-
фазовая

Хиральная
(энантиоселективная)

Ионообменная

Ион-парная

Эксклюзионная

Подвижные, неподвижные фазы и детекторы различных хроматографических методов анализа

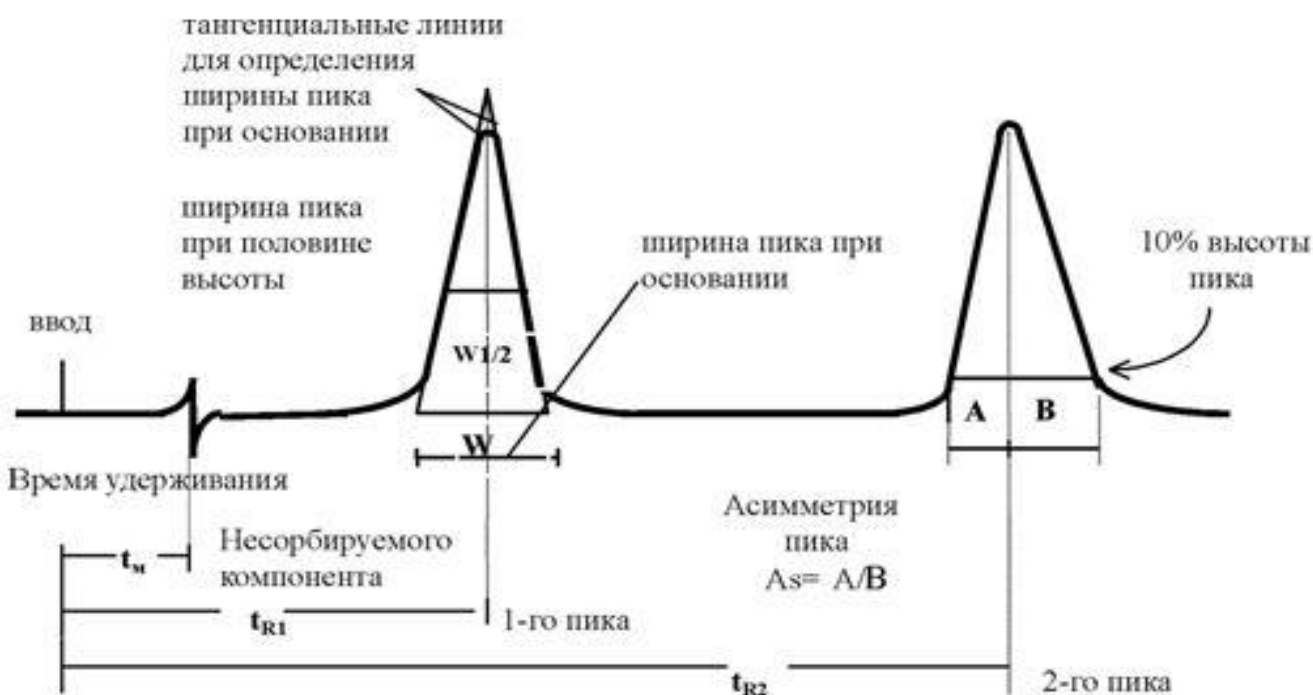
Методы хроматографии	Подвижная фаза	Неподвижная фаза	Детекторы
Газовая адсорбционная (ГХ)	Газ (гелий, азот, водород, аргон, воздух)	Неспецифические сорбенты (угли). Полярные – $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$; Al_2O_3 . Молекулярные сита или цеолиты – алюмосиликаты щелочных металлов, сополимеры стирола и дивинилбензола	Катарометр, пламенно-ионизационный (ПИД), по захвату е, термоионный, аргонный; масс-селективный (МСД),
Газовая распределительная (ГЖХ)	Газ (гелий, азот, водород, аргон, воздух)	Пленки жидких сорбентов различной полярности нанесены на твердый носитель или стенки колонки: полиэтиленгликоли, силиконовые масла, эфиры гликолей	атомно-эмиссионный, инфракрасный, ИК-Фурье спектрометр
Жидкостная сорбционная (ЖЖХ, ВЭЖХ, ЖАХ)	Водно-органические буферные растворы – элюенты: ацетонитрил, этанол, вода, гексан, их смеси	Пленки жидких сорбентов различной полярности нанесены на твердый носитель или стенки колонки: полиэтиленгликоли, силиконовые масла, эфиры гликолей. Полярные – $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$; Al_2O_3 . Молекулярные сита или цеолиты – алюмосиликаты щелочных металлов, сополимеры стирола и дивинилбензола	Электрохимический, многоволновый оптический; по показателю преломления; флюоресцентный, УФ-, ИК-, видимый спектрофотометр; масс-спектрометр
Ионо-обменная	Водные растворы	Катиониты, аниониты, амфолиты	Титриметрия
Молекулярно-ситовая	Растворы мономеров, полимеров	Молекулярные сита органической и неорганической природы	Масс-спектрометр, вискозиметр
Плоскостная ЖЖХ, ЖАХ	Органические и неорганические растворители	$\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$; Al_2O_3 , гидрофильная и гидрофобная бумага	Оптические, электрохимические

Основные **достоинства** хроматографического анализа:

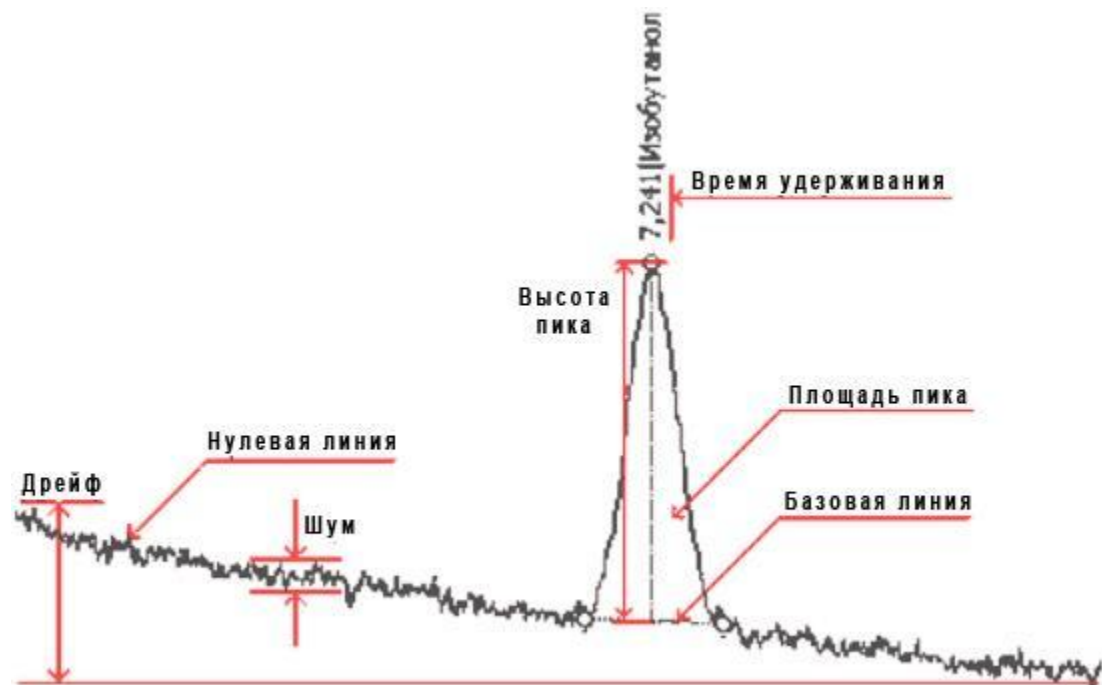
- экспрессность**;
- высокая **эффективность**;
- возможность **автоматизации** и получение объективной информации;
- сочетание** с другими физико-химическими методами;
- широкий интервал концентраций** соединений;
- возможность **изучения физико-химических свойств** соединений;
- осуществление проведения **качественного и количественного** анализа;
- применение для **контроля и автоматического регулирования технологических процессов**.

Среди **недостатков** методик хроматографии можно назвать:

- **трудоемкость и длительность** способа,
- **зависимость качества разделения** смеси от **размера частиц** анализируемого вещества.



t_M - время удерживания несорбируемого соединения; t_{R1} и t_{R2} - абсолютные времена удерживания компонентов 1 и 2.



Примеры оборудования для хроматографии



**Газовый хроматограф
Agilent 7890B**



**Жидкостный хроматограф LC-30
Nexera Shimadzu**

Радиационные методы контроля

Радиационный контроль является методом определения свойств различных объектов с использованием **ионизирующих излучений**. Ионизирующим называют излучение, взаимодействие которого с веществом приводит к образованию в этом веществе **зарядов различного знака**. Длина волны электромагнитного ионизирующего излучения составляет $6 \cdot 10^{-9} - 10^{-16}$, что обуславливает его способность **распространяться в непрозрачных средах**.

Обобщенная схема радиационного контроля предполагает наличие **источника** ионизирующих излучений, объекта контроля и **регистрирующего устройства (детектора)**. При прохождении ионизирующего излучения через вещество происходит его ослабление, величина которого зависит от толщины, плотности контролируемого материала и энергии источника излучения.

В качестве источников ионизирующего излучения используют **радионуклиды**, в результате распада которых получается линейчатый спектр излучения, рентгеновские трубки и ускорители, дающие непрерывный спектр тормозного излучения



а



б



в



г

Примеры источников ионизирующего излучения: а – гамма-дефектоскоп на основе радионуклида Se-75 РИД-Se4P, б – рентгеновский аппарат импульсного действия Арина-3, в- рентгеновский аппарат непрерывного излучения ICM SITE-X C2004, г – бетатрон

В настоящее время преимущество отдают методам оценки **конкретных радионуклидов**, поскольку при оценке доз облучения должен учитываться вклад каждого радионуклида. Однако когда нормативными требованиями предусматривается определение **суммарной активности альфа- или бета-излучающих радионуклидов**, такие измерения также включаются в программу экологического мониторинга.

В мониторинговой практике наибольшее применение имеют следующие методы измерения:

- **гамма-спектрометрия** с энергетическим диапазоном от 20 до 2000 кэВ. Такие методы имеют нижнюю границу чувствительности около 1 Бк/кг для большинства радионуклидов.
- **альфа-спектрометрия** для альфа-излучающих радионуклидов (особенно изотопов Pu, Am и Cm). Определение альфа- 10 излучателей обычно требует предварительного радиохимического анализа, последовательного селективного выделения радионуклидов и изготовление тонких твердых источников, готовых к альфа-спектрометрии.

Аппаратура радиационного контроля подразделяется по контролируемому радиационному параметру на приборы контроля:

- амбиентного эквивалента дозы;
- мощности амбиентного/направленного эквивалента дозы;
- плотности потока ионизирующих частиц;
- поверхностной активности;
- объемной активности радиоактивных аэрозолей (паров);
- объемной активности радиоактивных газов;
- удельной (объемной) активности радионуклидов в жидкостях;
- удельной (объемной) активности радионуклидов в твердых телах;
- активности радионуклидов, содержащихся в организме, органе;
- плотности радиоактивного загрязнения почвы;
- энергетического распределения ионизирующего излучения (спектрометрия) - при необходимости;
- двух и более параметров, обеспечиваемых средствами одной функциональной группы (комбинированные).

а



Блок
детектирования
 α -, β -излучения



Пульт
б



Блок
детектирования
фотонного
излучения



Переносные приборы для радиологического контроля: а – радиометр РЗС-10М – предназначен для измерения мощности эффективной дозы фотонного излучения, измерения плотности потока β -частиц и α -частиц; б – переносной радиометр нейтронов РПН-12П – предназначен для измерения плотности потока нейтронного излучения и поиска нейтронного излучения