

# Физико-химические методы анализа

## Атомно-абсорбционная спектроскопия

Связь между видами спектров атомного поглощения и испускания и химическим составом нагретого газа была установлена немецкими учеными Робертом Бунзеном и Густавом Кирхгофом в 1859—1861 годах

В 1955 году британско-австралийский физик Алан Уолш предложил простой и легко осуществимый на практике способ количественного определения содержания элементов в растворах, распыляемых в пламя ацетилен-воздух, по поглощению излучения атомных линий от специальных селективных ламп. Этот способ, лежащий в основе аналитического метода атомно-абсорбционной спектрометрии, предопределил развитие метода в дальнейшем.

В 1962 году основанная Уолшем фирма Techtron выпустила первый в мире серийный атомно-абсорбционный спектрометр АА-2.

# Характеристики метода

- \* Атомно-абсорбционный спектральный анализ как инструментальный метод определения химического состава веществ по атомным спектрам поглощения, на сегодняшний день, достиг весьма широкого распространения в аналитической практике. Этот метод позволяет определять около 70 элементов. В основном это металлы: Al, Ba, Be, V, Bi, W, Fe, Ca, Cd, Co, Si, Mg, Mn, Cu, Mo, Ni, Sn, Pb, Ti, Cr и Zn, но возможно применение метода и для определения некоторых неметаллов: As, B, I, P, Se, Si и Te.
- \* В настоящее время с использованием данного метода можно анализировать такие экологические объекты как природные и сточные воды, почвы, биологические ткани и жидкости, атмосферные выбросы, и другие.

## Из истории открытия

- \* Впервые линии поглощения атомов были обнаружены при изучении спектра Солнца в самом начале XIX века Волластоном, а затем и Фраунгофером. Непосредственная связь вида спектров атомного поглощения и испускания с химическим составом нагретого газа была установлена в работах Бунзена и Кирхгофа (1859-1861 гг.).
  - \* Спектры поглощения (абсорбции) атомов в аналитических целях начали применять с тридцатых годов XX века для идентификации некоторых элементов в атмосферах звезд и для земных дел: определения содержания ртути в различных пробах и атмосфере лабораторных помещений. Но распространенность метода как лабораторного была ограничена, так как отсутствовала удобная и высокочувствительная схема измерения.
- \* В 1955 г. австралийский ученый А. Уолш предложил простой и практически легко осуществимый способ количественного определения содержания элементов в растворах, распыляемых в пламя ацетилен-воздух, по поглощению излучения атомных линий от специальных селективных ламп. Это, кажущееся сейчас простым, решение, которое лежит в основе аналитического метода атомно-абсорбционной спектрометрии, предопределило дальнейшее стремительное развитие метода.

# Основные принципы ААС

- \* Атомно-абсорбционный анализ – метод аналитической химии, основанный на селективном поглощении (абсорбции) электромагнитного излучения определенной длины волны свободными от всех молекулярных связей нейтральными атомами определяемого элемента.
- \* В процессе абсорбции электрон переходит с основного энергетического уровня на более высокий в результате фотонного возбуждения, т.е. облучения светом с определенной частотой. При этом интенсивность возбуждающего света данной частоты уменьшается.

Для получения спектра необходимо произвести атомизацию вещества пробы, т.е. превращение ее в атомные пары, для чего его раствор распыляют в пламени или испаряют сухой остаток раствора в электрической печи в интервале температур 2000-3000 °С. В этом температурном интервале более 90% атомов находятся в невозбужденном состоянии и окружающие атомы и молекулы не могут его изменить и, следовательно, не могут повлиять на величину атомного поглощения. Этот факт, наряду с малым количеством линий поглощения, обуславливает высокую избирательность атомно-абсорбционного метода.

Связь между величиной поглощения и концентрацией элемента в пробе выражается из закона Бугера-Ламберта-Бера:

$$A = \lg(J_0/J) = kbC, \text{ где}$$

- \* A-величина, характеризующая поглощение света (абсорбция);
- \*  $J_0$ -начальная интенсивность возбуждающего излучения;
- \* J-интенсивность проходящего света;
- \* k-коэффициент поглощения;
- \* b-толщина поглощающего слоя;
- \* C-концентрация определяемого элемента.

Из формулы следует, что зависимость между светопоглощением и концентрацией линейна, а температура атомизатора на поглощение не влияет. Коэффициент поглощения k пропорционален вероятности данного перехода. Обычно наиболее высокие значения k соответствуют переходу электрона с основного на наиболее близкий к нему энергетический уровень. Если концентрацию определяемого элемента C выразить в грамм-атомах, то почти для всех элементов  $k=10^7-10^9$ .

Сравнение с фотометрическим методом показывает, что чувствительность атомно-абсорбционного метода значительно выше.

# Условия Уолша

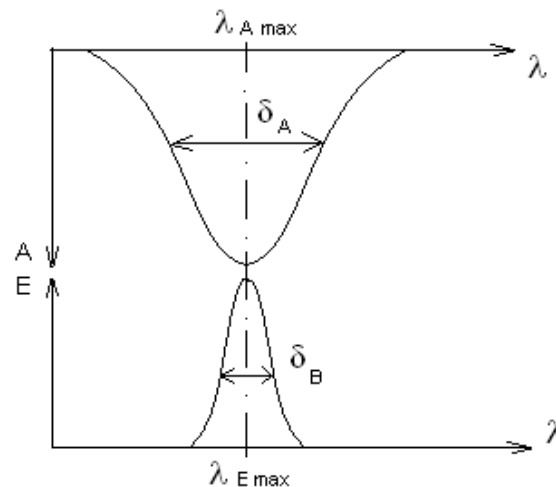
Для измерения величины атомного поглощения  $A$  необходимо соблюдение **двух условий**, сформулированных Уолшем:

- \* 1. *длина волны, соответствующая максимальному поглощению атомных паров, должна быть равна длине волны максимальной интенсивности излучения источника;*

$$\lambda_{E\max} = \lambda_{A\max},$$

- \* 2. **полуширина** линии поглощения атомных паров должна быть, по крайней мере, в два раза больше полуширины линии испускания источника

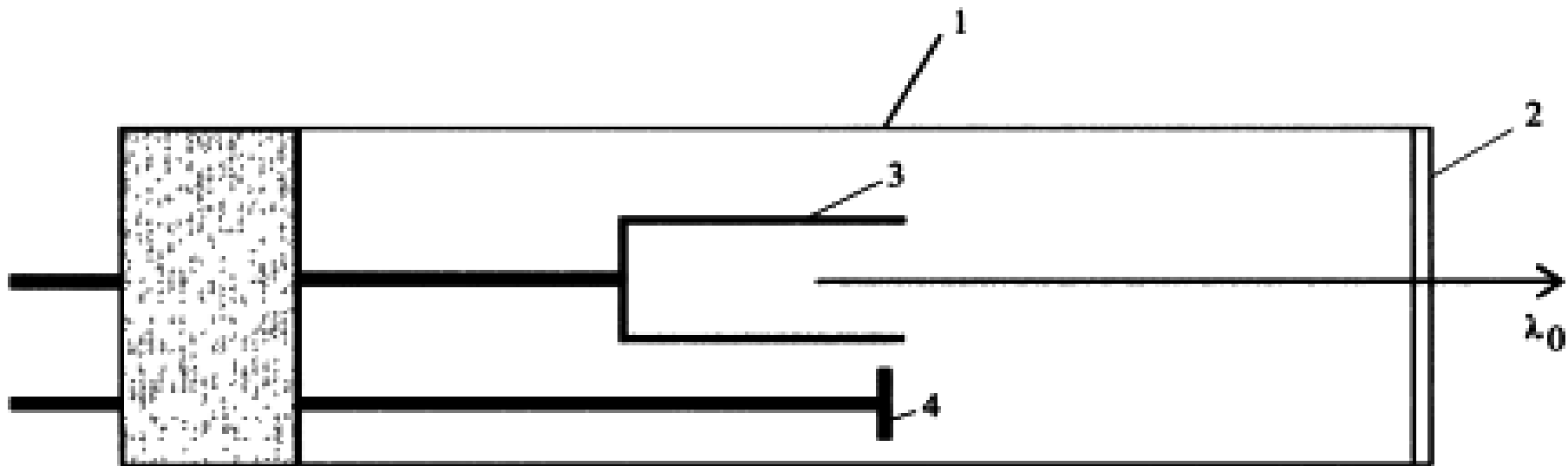
$$\delta_A \geq 2\delta_E,$$



- \* Если первое условие не выполняется, атомная абсорбция вообще не происходит.
- \* Если не выполняется второе условие, то атомами поглощается лишь малая часть излучения источника из-за того, что контур линии излучения шире контура линии поглощения.
  - \* Это приводит к резкому ухудшению чувствительности атомно-абсорбционного определения. Полуширина атомной линии поглощения составляет менее 0,01 нм, следовательно, полуширина соответствующей линии испускания должна быть не больше 0,005 нм.
- \* Традиционные методы монохроматизации света (призма, дифракционная решетка, интерференционные фильтры) не обеспечивают такой узкополосности. Поэтому в атомно-абсорбционном анализе приходится использовать специальные источники, излучающие узкие полосы спектра. К таким источникам относятся **газоразрядные лампы, лампы с полым катодом и высокочастотные безэлектродные лампы.**
  - \* С одной стороны, необходимость иметь на каждый определяемый элемент свою отдельную лампу усложняет процедуру анализа, но с другой стороны, исключительно тонкие линии атомного поглощения обеспечивают **высокую селективность** метода .



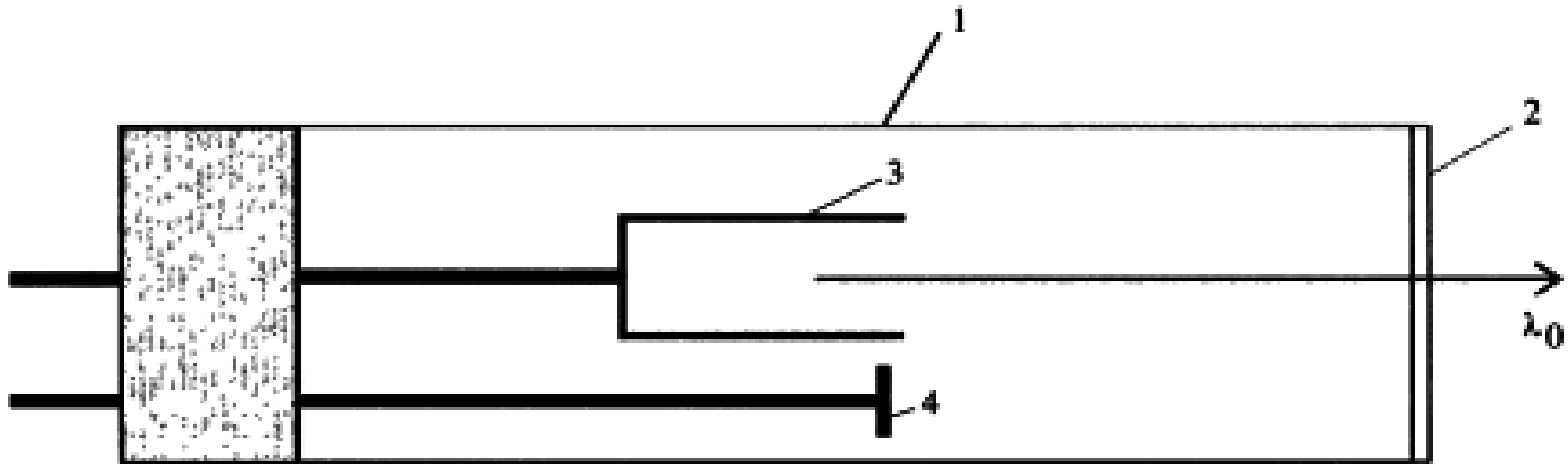
# Схематичное изображение лампы с полым катодом:



1 — баллон; 2 — окно для выхода излучения; 3 — катод; 4 — анод

Цилиндрический баллон лампы 1 изготовлен из молибденового стекла и снабжен при работе в ультрафиолетовой области кварцевым или УФ- окном 2. Внутри баллона помещен катод 3, имеющий форму полого цилиндра, и анод 4 (W, Zr) - часто в виде кольца.

# Схематичное изображение лампы с полым катодом:

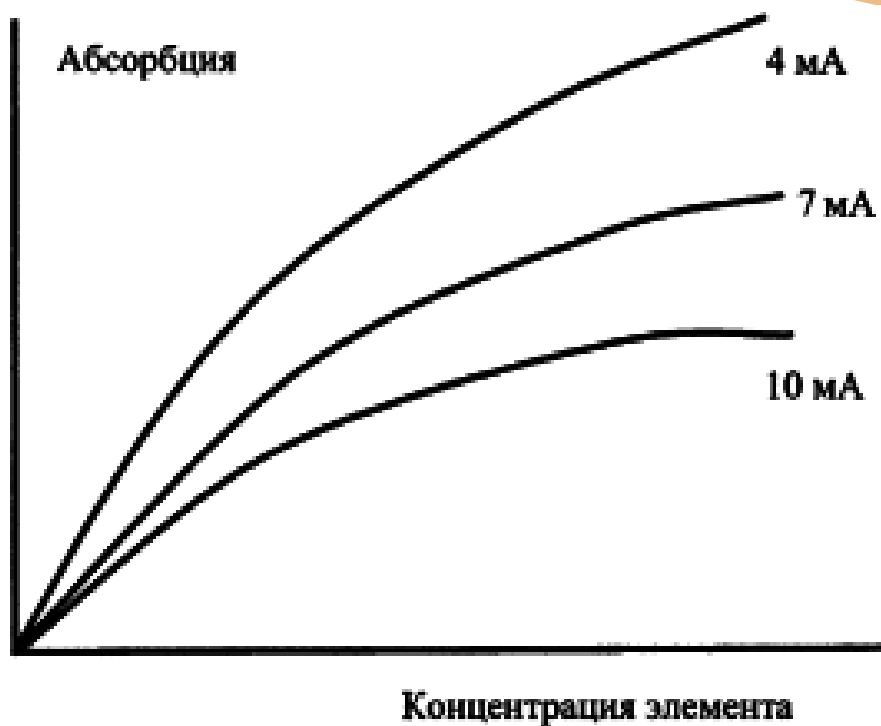


1 — баллон; 2 — окно для выхода излучения; 3 — катод; 4 — анод

## Недостатки:

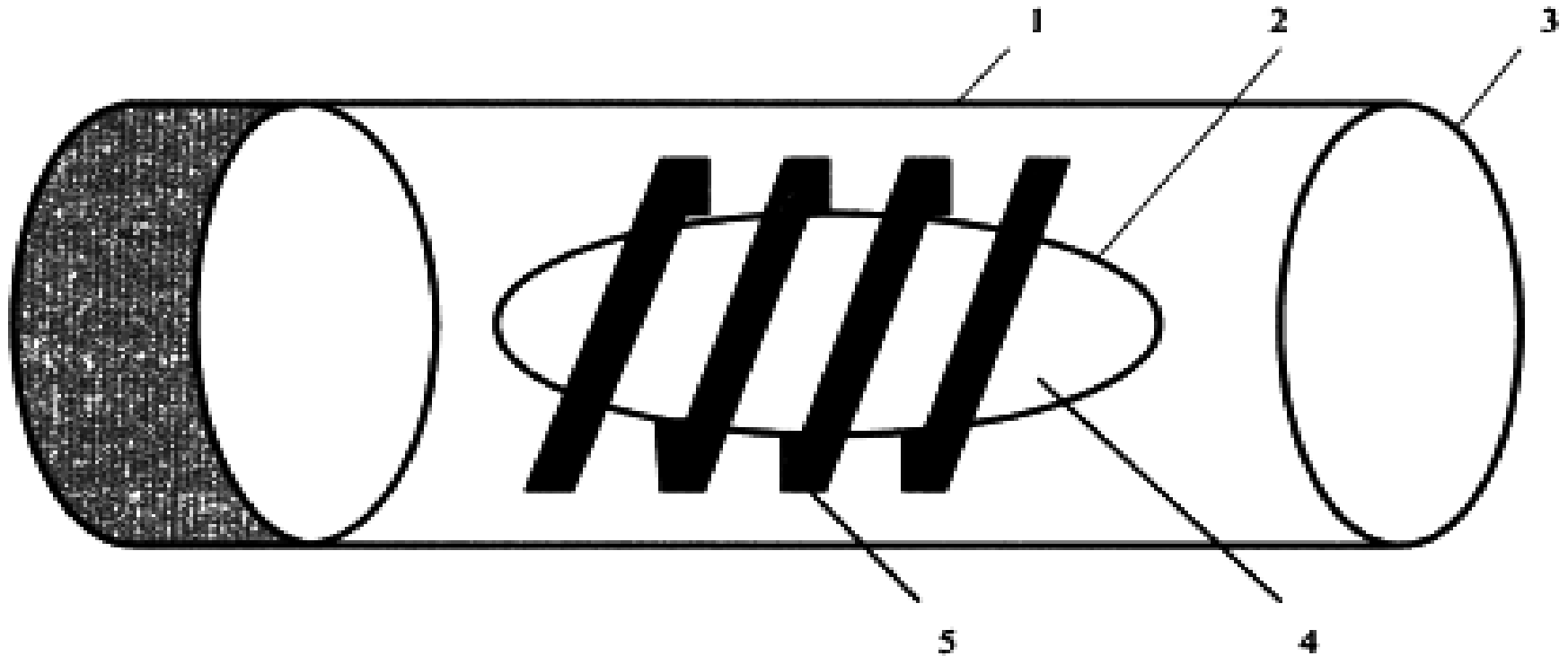
- сравнительно низкая интенсивность резонансного излучения;
- сложные спектры излучения;
- меньшая надежность ламп для легколетучих и легкоплавких элементов;
- высокая стоимость.

# Лампы с полым катодом



Изменения формы градуировочного графика для кадмия при различном токе питания лампы с полым катодом

# Высокочастотная безэлектродная лампа:



1 — корпус лампы, 2 — кварцевый баллон; 3 — кварцевое окно для выхода излучения; 4 — определяемый элемент или его легколетучее соединение; 5 - индуктор высокочастотного генератора

# Высокочастотная безэлектродная лампа:

## Достоинства:

- \* НИЗКАЯ СТОИМОСТЬ;
- \* ВЫСОКАЯ ИНТЕНСИВНОСТЬ;
- \* ВОЗМОЖНОСТЬ ПОЛУЧЕНИЯ ЛУЧШЕЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ (особенно для As, Hg, Sb, Se и Te);
- \* длительное время жизни.

## Недостатки

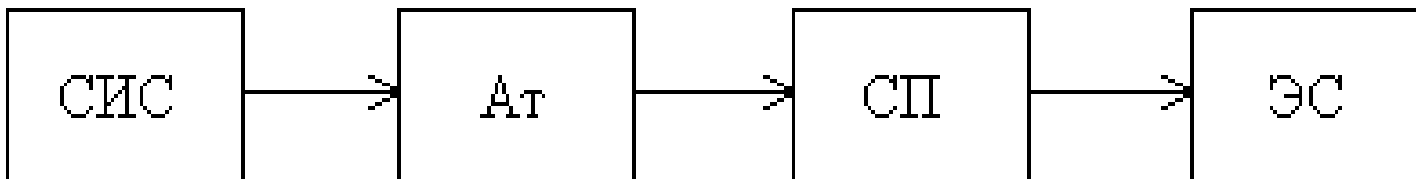
- необходимость иметь дополнительный блок питания — высокочастотный генератор;
- стабильность работы ниже, чем у ламп с полым катодом;
- время прогрева 30—40 мин, в то время как ламп с полым катодом — 5-20 мин.

# Общая схема атомно-абсорбционного анализа

Для реализации метода атомно-абсорбционного анализа необходимо иметь:

- \* селективный источник света излучаемого элемента (СИС);
- \* атомизатор (Ат) для перевода данного элемента из реальной пробы в атомарную форму;
- \* спектральный прибор (СП) для выделения аналитической линии этого элемента;
- \* электронную систему (ЭС) для детектирования, усиления и обработки аналитического сигнала.

Принципиальная схема атомно-абсорбционного спектрометра



## Способы получения поглощающих слоев

Получение поглощающих слоев в атомно-абсорбционной спектрометрии является наиболее существенным звеном в процедуре анализа. Это связано с необходимостью атомизации анализируемых проб, *т.е. переводением вещества в такое состояние, при котором определяемые элементы находятся в виде свободных атомов, способных к абсорбции света.*

Наиболее часто используемыми способами атомизации вещества пробы являются *пламенная* и *электротермическая атомизация.*

# Пламенная атомизация

**Пламя** – это низкотемпературная плазма, в которой протекающие химические реакции поддерживают температурный баланс. В атомной спектроскопии обычно используют пламена горючих газов в смеси с окислителями.

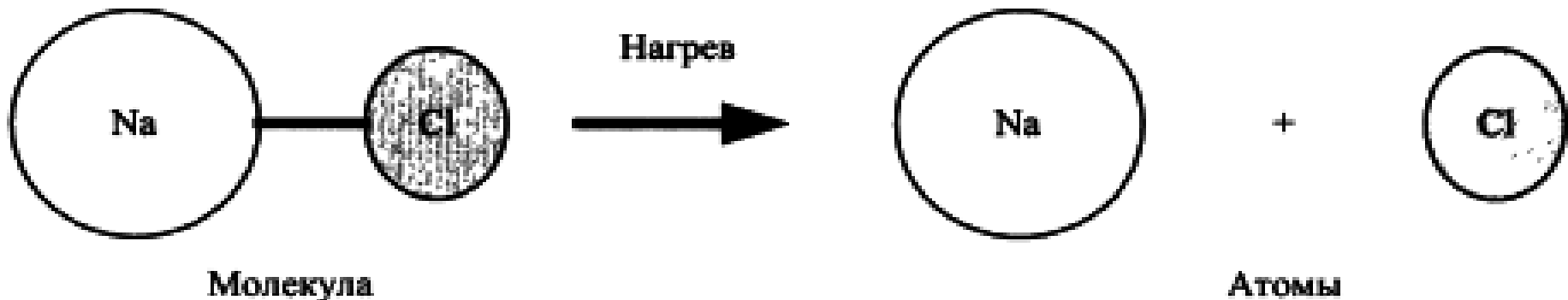
При этом необходимо выполнение следующих требований:

- \* пламя должно быть прозрачным в области 190-850 нм;
- \* слабое собственное излучение;
- \* максимальная эффективность атомизации элементов;
- \* минимальная степень ионизации элементов;
- \* высокая стабильность горения.

Наибольшее распространение в атомно-абсорбционном анализе получило **пламя ацетилен-воздух**. Оно имеет высокую пропускаемость в области от 200 нм, очень слабую собственную эмиссию и обеспечивает высокую эффективность атомизации более чем 30 элементов, в том числе щелочных, щелочноземельных элементов и некоторых металлов (медь, кадмий, таллий, свинец, марганец, железо, кобальт и никель). Максимальная температура пламени 2300 °С. Это пламя наиболее стабильно, его температура слабо зависит от рабочей высоты и стехиометрии и составляет 2250±50 °С.

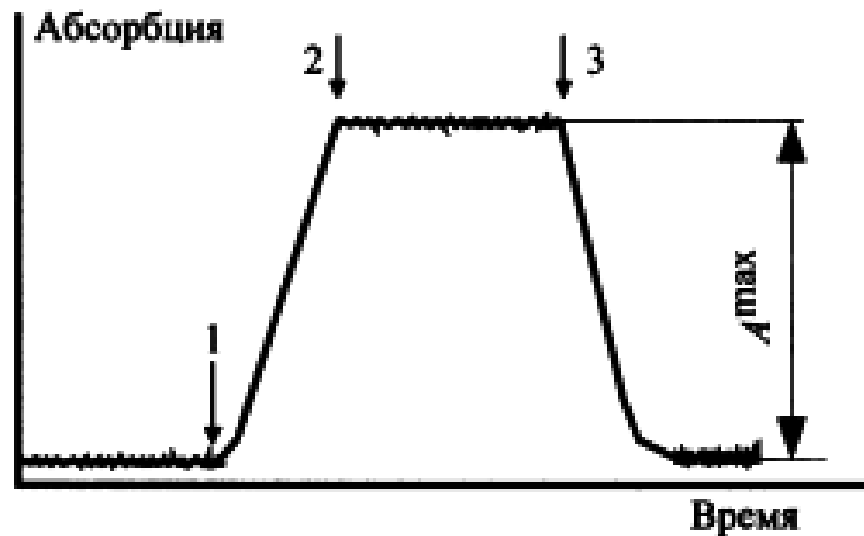


## Пример диссоциации молекул NaCl до атомов

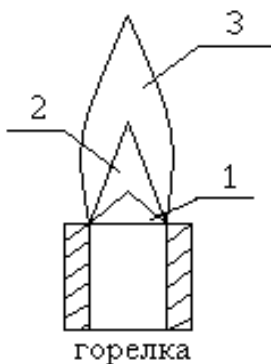


Изменение сигнала атомного поглощения во времени в методе пламенной атомно-абсорбционной спектрометрии при равномерном введении пробы:

- 1 - момент ввода пробы,
- 2 – момент установления максимального постоянного сигнала  $A_{\max}$ ,
- 3 - момент выключения подачи пробы



Используемые в атомно-абсорбционном анализе пламена газовых смесей ламинарны, т.е. все частицы в пламени перемещаются параллельно. Ламинарное пламя состоит из трех зон



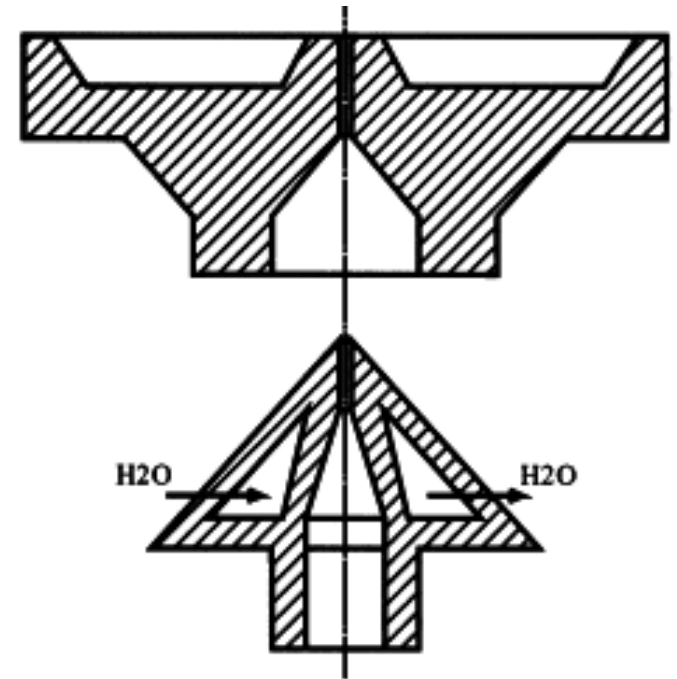
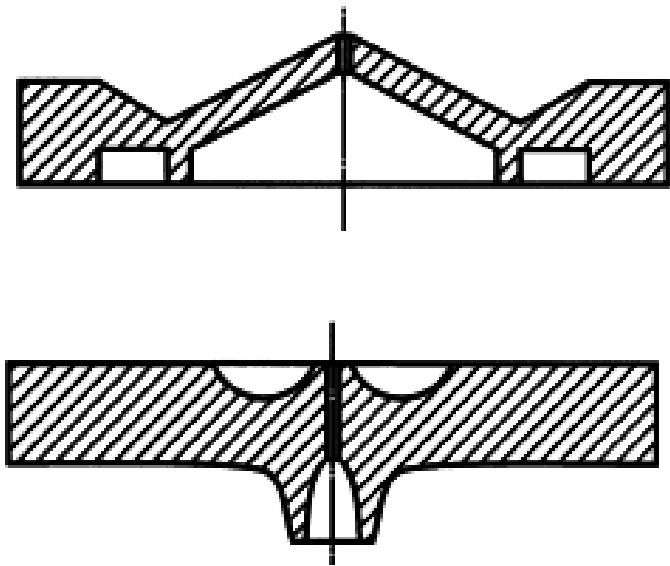
Зоны ламинарного пламени

- \* Внутренняя зона 1 называется первичной реакционной зоной. Для нее характерны **радикальные реакции пиролиза горючего**. Эта зона обычно не шире 1 мм и имеет температуру менее  $1000^{\circ}\text{C}$ . В первичной реакционной зоне термическое равновесие не достигается, и в атомной спектроскопии ее не используют, поскольку атомизация в этой зоне происходит лишь в незначительной степени, а собственное поглощение и шумы достаточно велики.
  - \* В атомно-абсорбционном анализе эта зона не используется.
- \* В средней зоне 2 – зоне внутреннего конуса **присутствует избыток горючего**, из-за чего в ней преобладают отрицательно заряженные радикалы и молекулы с восстановительным действием:  $\text{C}^*2$ ,  $\text{CN}^*$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}^*$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{NH}^*$ .
- \* Внешняя зона 3 называется вторичной реакционной зоной (зона догорания).
  - \* В ней реакция окисления идет до конца, т.е. при горении углеводородов в воздухе – до  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ . Кислород из окружающего воздуха диффундирует в эту зону и обеспечивает полное окисление продуктов пламени; **вторичная зона – самая стабильная**.

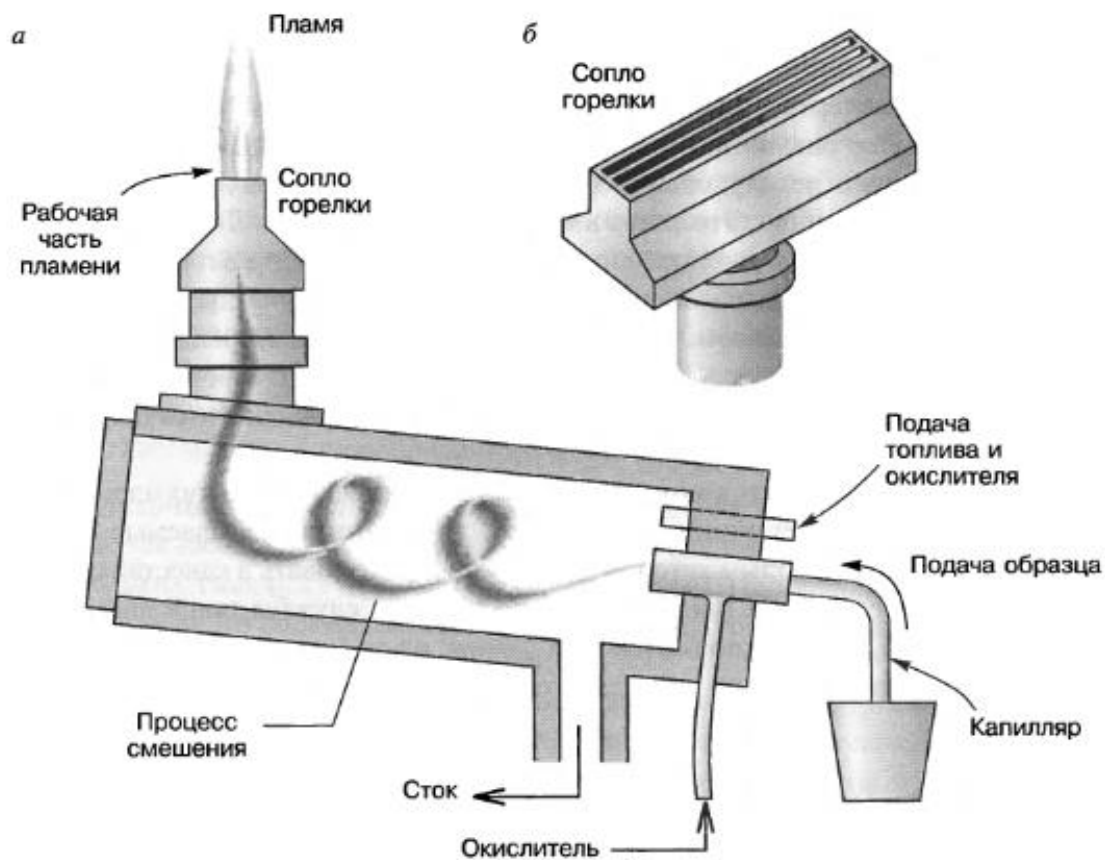
Топливо (горючий газ)	Окислитель	Диапазон температур при изменении стехиометрии пламени. °С	Максимальная скорость горения, см/с
Природный газ	Воздух	1700-1900	39-43
		1630-1880	
		1700-1800	
Природный газ	Кислород	2700-2800	370-390
Пропан	Воздух	1900-2000	43-45
Пропан	Кислород	2530	372
Пропан	Динитрооксид	2600, 2630	250
Бутан	Воздух	1300-1900	-
Водород	Воздух	2000-2100	300-440
		1830-2030	
Водород	Кислород	2550-2700	900-1400
Водород	Динитрооксид	2690 - 2880	390
Ацетилен	Воздух	2100-2400,	158-266
		2090-2330	
Ацетилен	Кислород	3050-3100	1100-2480
		2630-3030	
Ацетилен	Динитрооксид	2600-2800	285
		2560-2800	260
Металацетален- алленовая фракция (МАФ)	Воздух	1530-2200	-
(МАФ)	Кислород	2930	470

# Горелки

## Различные профили сечения горелок

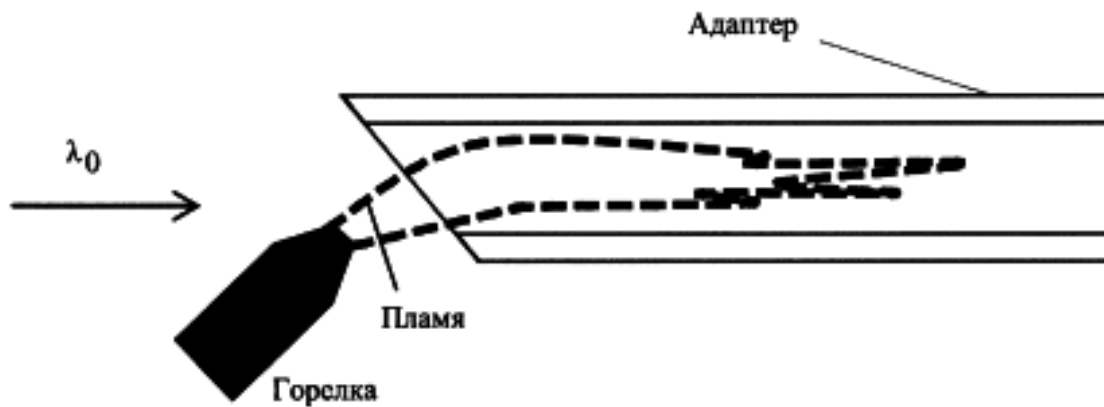


Горелка выполняется из коррозионно-стойких материалов: нержавеющей стали или титановых сплавов. Эти материалы весьма устойчивы к кислым растворам. Внутренние стенки горелки в некоторых случаях покрывают тефлоном.

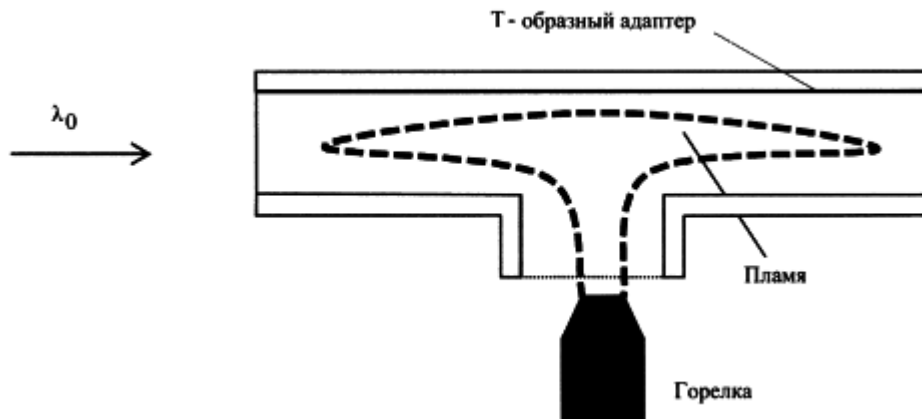


## Горелка со смесительной камерой:

а - распылитель,  
камера и горелка;  
б - сопло горелки



Линейный и Т-образный адаптеры, используемые для повышения чувствительности определений элементов в пламени



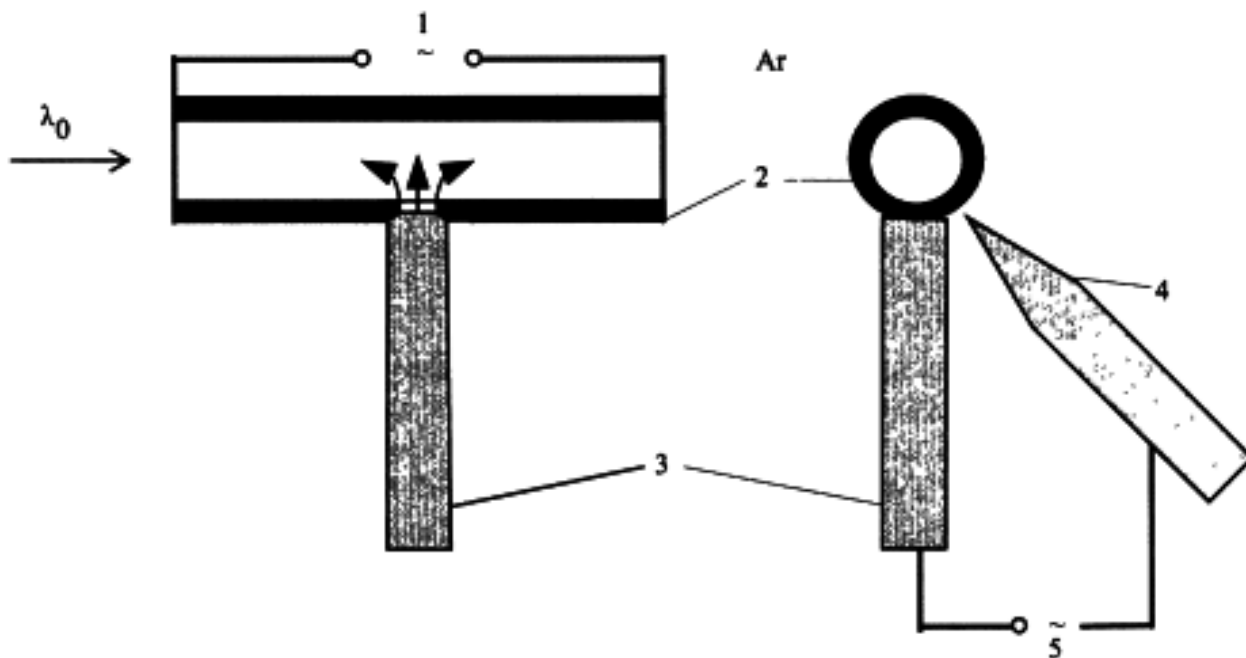
# Электротермическая атомизация

Технику электротермической атомно-абсорбционной спектрометрии предложил Б.В. Львов.

Вместо пламенного атомизатора, он применил непламенный графитовую кювету, нагреваемую электрическим током.

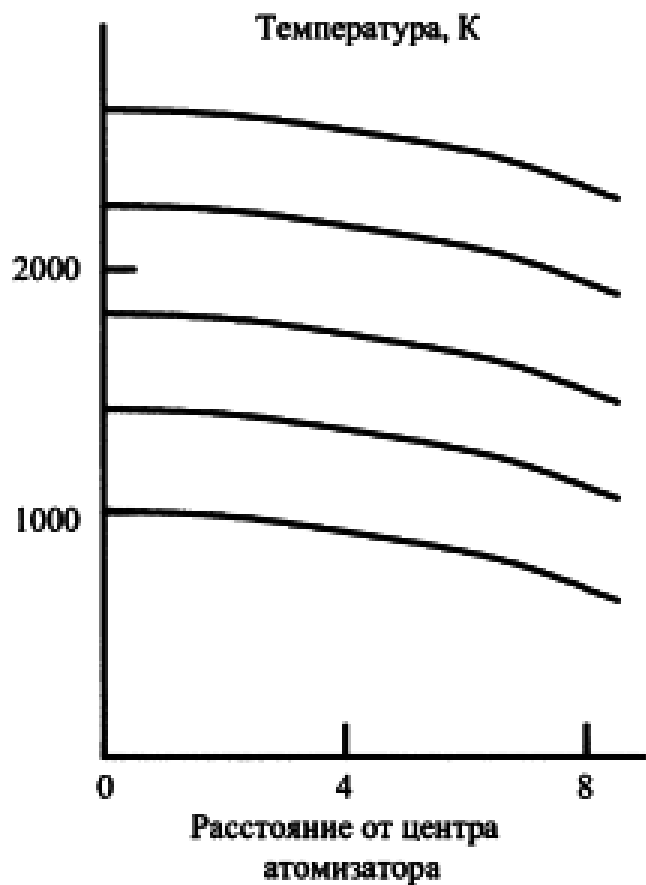


# Графитовая кювета Львова

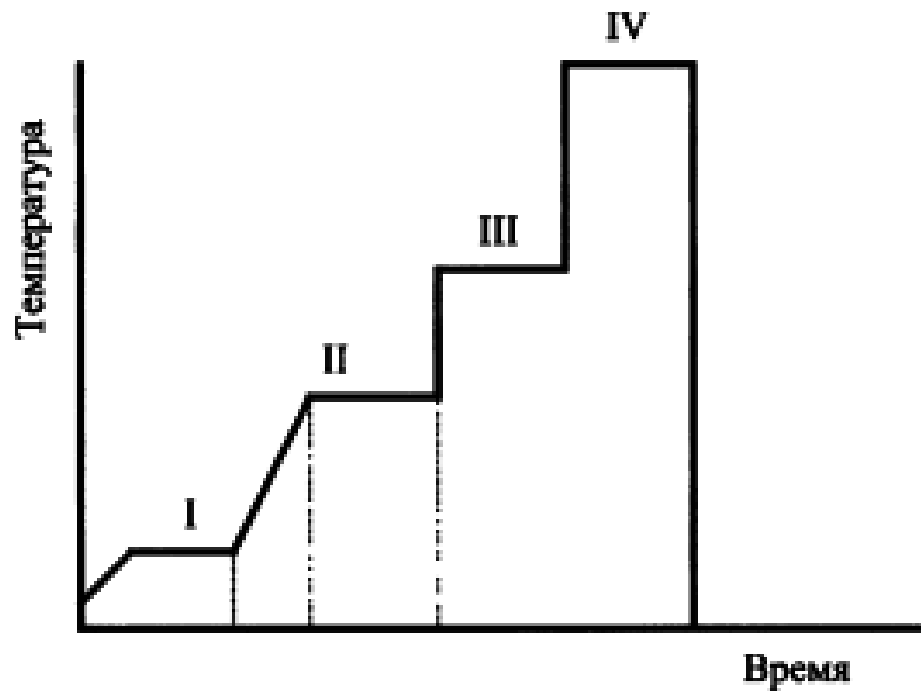


1 и 5 — блоки питания;  
2 — графитовая трубка;  
3 — цилиндрический электрод с нанесенной на его торец пробой;  
4 — подставкой графитовый электрод;  
 $\lambda_0$  — луч от селективного источника света





Вид температурного распределения вдоль поверхности атомизатора продольного нагрева (печь Массманна — пространственно неизотермичный атомизатор) при различной конечной температуре стадии атомизации (температура в центре атомизатора)



Пример обычной температурно-временной программы нагрева для цикла электротермической атомизации, включающей следующие стадии:

- \* I - высушивание пробы,
- \* II - пиролиз,
- \* III - атомизация,
- \* IV - очистка

## Высушивание

- \* На стадии высушивания пробы происходит удаление растворителя за счет физических процессов испарения и кипения. Высушивание пробы должно происходить постепенно и до конца, во избежание потерь от разбрызгивания. Скорость высыхания влияет на распределение раствора в печи и на его проникание в графит. Температура и длительность стадии высушивания для отдельных проб зависят от природы растворителя и объема образца. **Температура данной стадии должна быть несколько ниже (на 10-20 градусов), чем температура кипения растворителя**, длительность стадии высушивания пробы обычно составляет от 1 до 3 с на 1 мкл объема образца.

# Пиролиз

- \* На стадии пиролиза исследуемая проба находится в составе сложной термодинамической системы, включающей в себя пробу, вводимые химические модификаторы, материал поверхности атомизатора и его атмосферу.
- \* При реализации этой стадии температурно-временной программы нагрева необходимо удалить из пробы максимальное количество матричных компонентов, не потеряв определяемый элемент.
- \* Стадия пиролиза является очень важной составной частью температурно-временной программы нагрева пробы, поскольку она во многом определяет правильность результатов анализа и степень устранения термохимических и неселективных спектральных помех на последующей стадии атомизации.

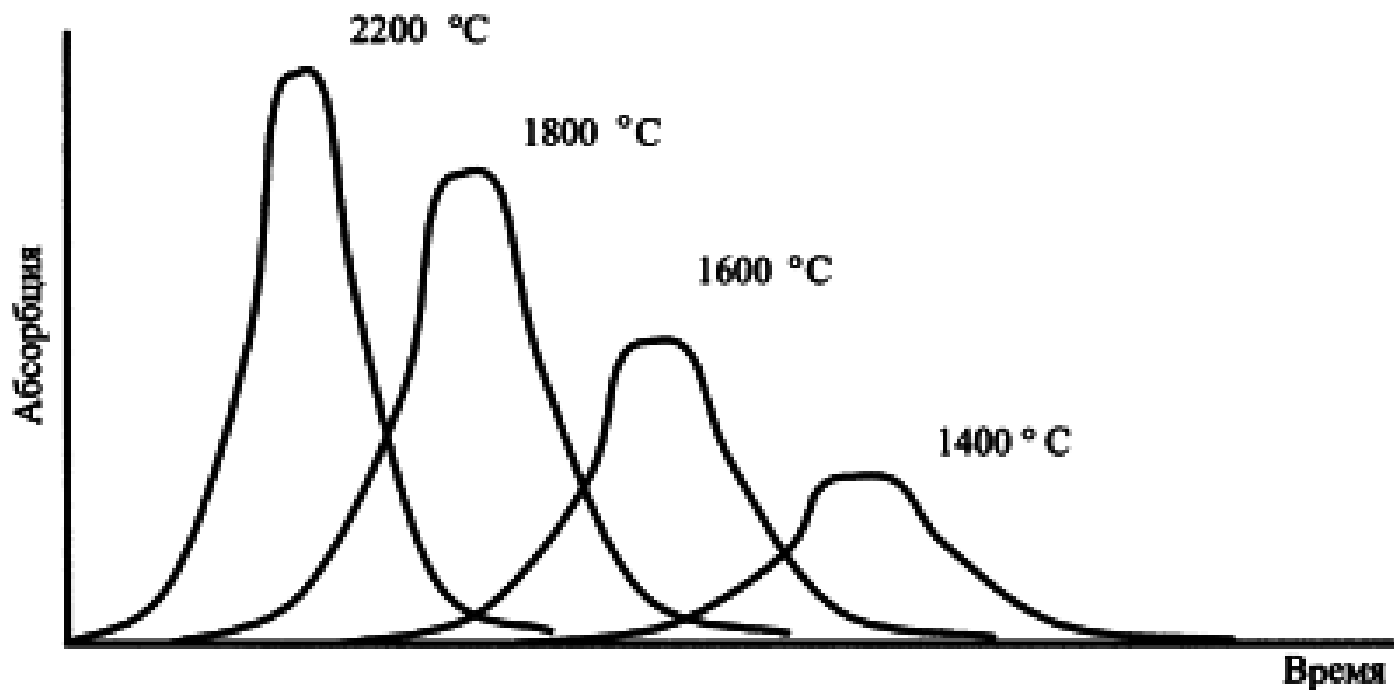
# Атомизация

Атомизация элементов в графитовой печи в зависимости от их физико-химических свойств может происходить двумя основными путями:

- \* термическое испарение и разложение индивидуальных веществ;
- \* термохимическое восстановление газообразных соединений определяемого элемента.

Температуры, обычно используемые на стадии атомизации в электротермических атомизаторах (2000-2800 °С), близки к температурам пламен ацетилен-воздух и ацетилен-закись азота, наиболее часто применяемых в атомно-абсорбционном анализе.

- \* Для многих элементов в этих пламенах наблюдается значительная ионизация, что необходимо учитывать и устранять в практическом анализе.
- \* Явление ионизации наблюдается и в электротермических атомизаторах, но для существенно меньшего круга определяемых элементов. Это связано с высокой собственной фоновой концентрацией электронов в данном атомизаторе.



Изменение сигнала атомного поглощения свинца при варьировании температуры стадии атомизации

# Спектральные помехи

1. Неселективное поглощение – основная спектральная помеха в атомно-абсорбционном анализе. В данном случае под неселективным поглощением понимается неатомное, фоновое поглощение, которое в некоторых случаях сильно зависит от длины волны, что затрудняет его коррекцию традиционными способами.
- \* Это поглощение имеет место в том случае, когда в атомизаторе в процессе испарения пробы, наряду с атомами определяемого элемента, в газовой фазе *появляются молекулы, спектральная полоса поглощения которых накладывается на линию поглощения определяемого элемента*. Кроме того, при испарении и атомизации проб, содержащих, например, органические соединения, может происходить *задымление рабочего пространства атомизатора*. В последнем случае уменьшение интенсивности опорного излучения будет происходить еще и за счет рассеяния света на микрочастицах дыма.

- \* Значительное внимание уделяется разработке аппаратурных способов коррекции неселективного поглощения. Эти способы позволяют эффективно подавлять помехи с широким спектральным интервалом, однако для правильной коррекции узкополосных помех требуется определенная осторожность. Сущность способов коррекции неселективного поглощения сводится к тому, что **одновременно с поглощением аналитической линии регистрируется поглощение корректирующей линии** или полосы, которая предполагается обусловленным неселективным поглощением и численно равным неселективному поглощению на длине волны аналитической линии.
- \* В настоящее время применяют следующие аппаратурные способы коррекции неселективного поглощения: использование дополнительной спектральной линии; использование эффекта самообращения спектральных линий; использование ламп со сплошным спектром



# Спектральные помехи

## 1. Ионизация

- \* если в образце присутствуют другие легко ионизирующиеся элементы (например, калий или цезий), то это приводит к увеличению концентрации свободных электронов в пламени и подавляет ионизацию определяемого элемента
- \* Признаком ионизации может служить отклонение градуировочного графика вверх при более высоких концентрациях

## 2. Образование устойчивых соединений

- \* Это приводит к уменьшению оптической плотности, поскольку сигнал формируется свободными атомами. Устраняется химически.

# Атомно-абсорбционный спектрометр AA-6300 фирмы «Shimadzu».



# Спектрометры атомно-абсорбционные моделей Фирмы Thermo Scientific (США) iCE 3300, 3400, 3500



Спектральный диапазон, нм	ОТ 180 ДО 900		
Спектральная ширина щели, нм	0,2;	0,1;	0,1;
	0,5;	0,2;	0,2;
	1,0	0,5; 1	0,5; 1
Количество атомизаторов, установленных одновременно	1	1	2

# Принцип действия прибора

Основными элементами атомно-абсорбционного спектрометра являются: селективный источник света (СИС), модулятор (МОД), атомизатор (АТ), монохроматор (МОН), детектор (ДЕТ), усилитель (УС) и регистрирующее устройство (РЕГ).

Схема атомно-абсорбционного спектрометра





**Селективный источник света (СИС)** излучает линейчатый спектр, содержащий узкую резонансную линию определяемого элемента.

**Модулятор (МОД)** механическим или электрическим способом прерывает поток света от источника.

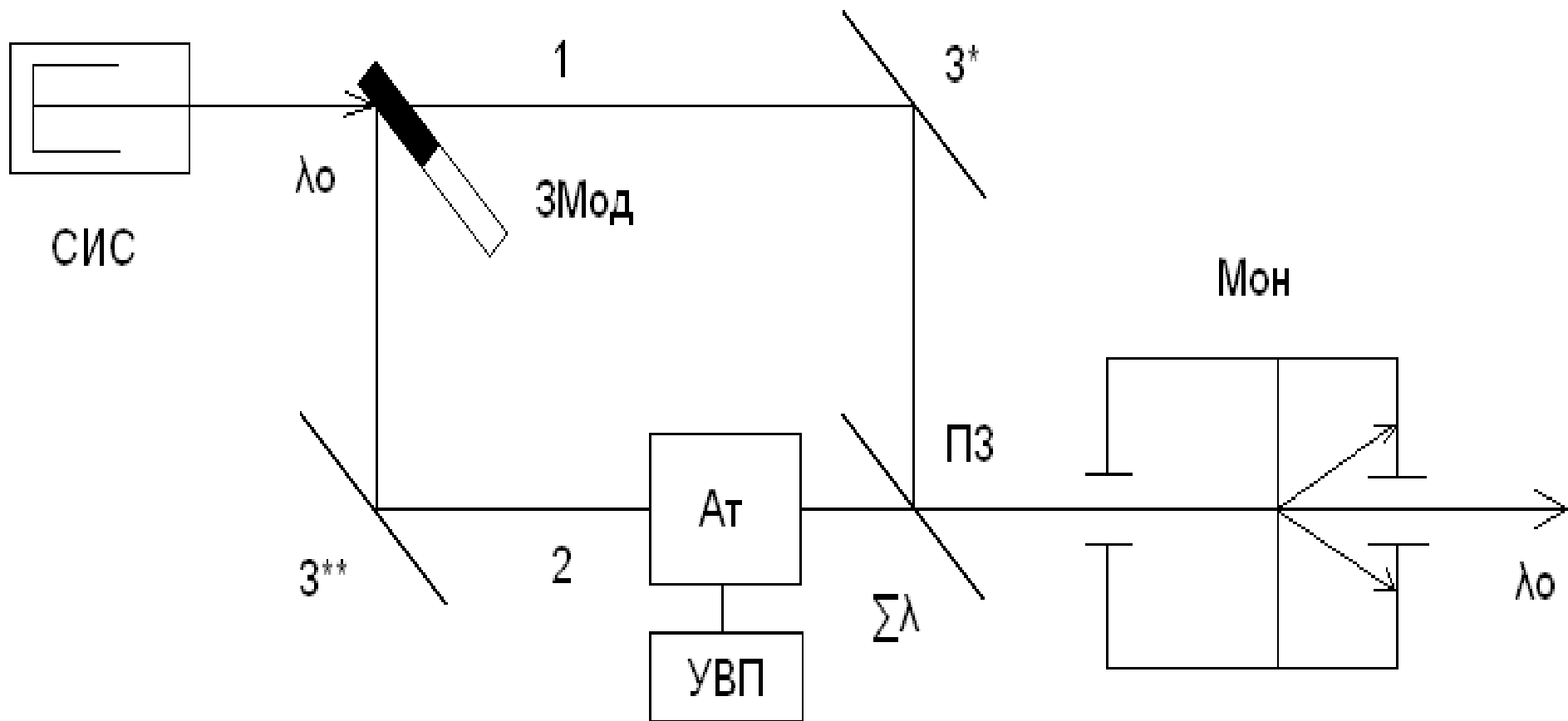
**В атомизаторе (АТ)** проба превращается в атомные пары определяемого элемента пробы, поглощающие свет соответствующей длины волны.

**Монохроматор (МОН)** выделяет узкую спектральную полосу (обычно 0,2-2 нм), в которой находится измеряемая спектральная линия определяемого элемента.

**Детектор (ДЕТ)** преобразует световой поток в электрический сигнал, который обрабатывается в регистрирующем устройстве так, чтобы на выходе атомно-абсорбционного спектрометра регистрировалась величина поглощения.

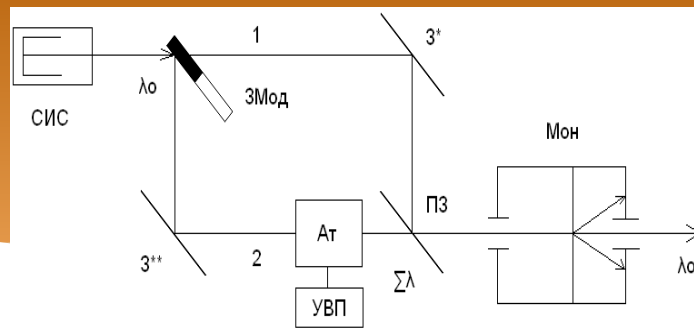
**Регистрирующее устройство (РЕГ.У)** синхронизировано с модулятором и реагирует только на прерывистый сигнал источника.

Таким образом исключается воздействие излучения атомизатора – оно постоянно во времени и, следовательно, вызывает в детекторе постоянный ток, на который отсчетное устройство не реагирует.

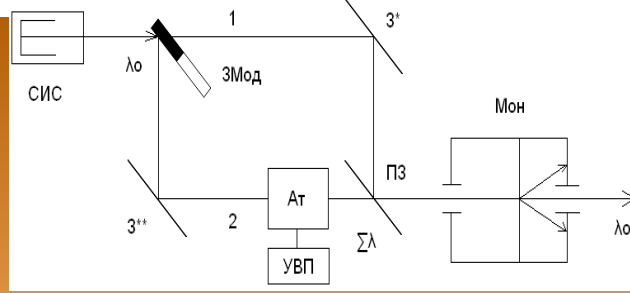


Двулучевая схема переменного тока:

1-луч сравнения; 2-измерительный луч; СИС-селективный источник света; ЗМод-модулятор с зеркальными лопастями; 3\* и 3\*\*-поворотные зеркала; Ат-атомизатор; ПЗ-полупрозрачное зеркало; Мон-монокроматор; УВП-устройство ввода пробы.

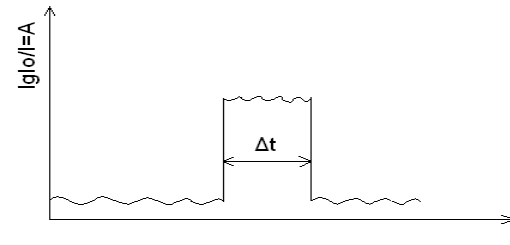


В данной схеме пучок света от селективного источника СИС попадает на зеркальные лопасти вращающегося модулятора ЗМод и делится на два луча. Луч 1 с помощью зеркальной оптической системы пропускается мимо атомизатора Ат прямо на вход монохроматора Мон. Это сравнительный луч света, с помощью которого можно провести измерение сравнительного (опорного) сигнала  $I_0$ . В другой момент времени, после поворота модулятора ЗМод при вращении на некоторый угол, свет от селективного источника СИС с помощью зеркальной системы проходит уже через атомизатор и попадает на вход монохроматора. Это рабочий луч света 2, испытавший поглощение в атомизаторе на резонансной длине волны  $\lambda_0$ . Он позволяет провести измерение полезного сигнала  $I$ . Оба луча света далее с помощью полупрозрачного зеркала ПЗ совмещаются на одном оптическом пути через монохроматор Мон. Соответствующие каждому лучу и характеризующиеся сдвигом по фазе выходные сигналы, полученные на фотоприемнике, разделяют, усиливают и сравнивают с помощью электронной системы обработки сигнала. Следовательно, **используя данную схему, можно измерять соотношение  $I_0/I$  с высокой частотой**, соответствующей частоте модуляции 200-400 Гц.



При равенстве интенсивностей лучей 1 и 2 сигнал абсорбции равен нулю. Если в ячейке атомизатора присутствуют атомы определяемого элемента, то происходит ослабление рабочего луча света 2, возникает сигнал разбаланса и регистрируется прибором, фиксирующим сигнал поглощения.

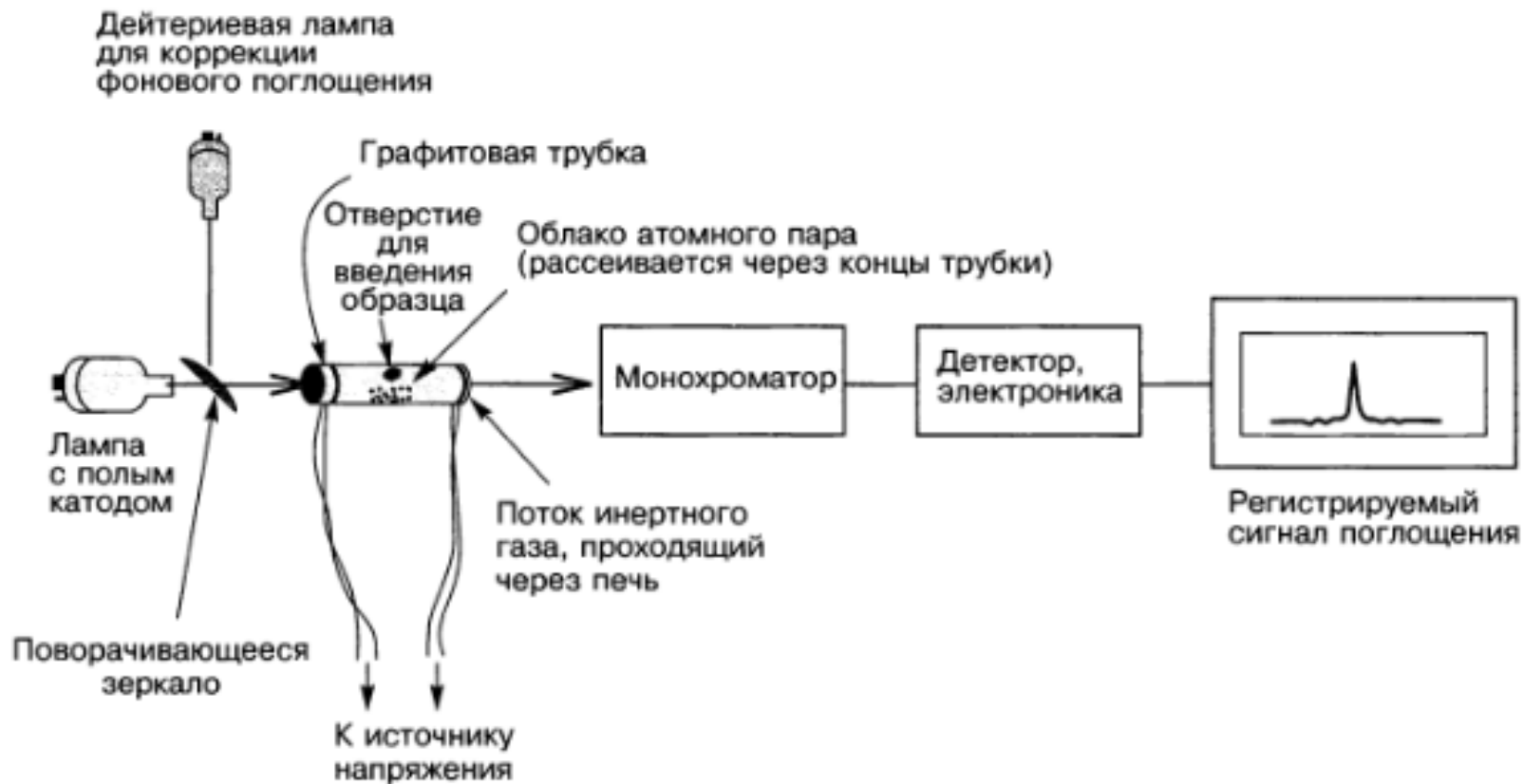
За малые промежутки времени между отдельными измерениями  $I$  и  $I_0$  дрейф интенсивности лампы и изменение чувствительности фотодетектора значительно измениться не могут. Это сохраняет значительно большую стабильность нулевой линии. В такой конструкции спектрометра **нет необходимости затрачивать большие усилия на обеспечение стабильности источника селективного излучения.**



Измерение аналитического сигнала (абсорбции)  $A$  в двухлучевой схеме переменного тока ( $\Delta t$  – промежуток времени введения пробы в пламенный атомизатор)



## Блок-схема спектрометра с электротермическим атомизатором



# Достоинства метода

- \* **высокая избирательность** определения индивидуальных элементов;
- \* **высокая чувствительность** (низкое содержание вещества в исследуемой пробе:  $10^{-1}$ - $10^{-4}$  мг/л);
- \* **хорошая воспроизводимость** (относительное стандартное отклонение ~ 0,01 %);
- \* **большая производительность** (до 500 определений в час).
- \* Этот метод **позволяет определять около 70 элементов**. В основном это металлы, но возможно применение метода и для определения некоторых неметаллов: As, B, I, P, Se, Si и Te. Причем для большинства определяемых элементов (около 40) возможно достижение относительно **низких пределов обнаружения**:
  - \* в пламенном варианте – от десятых долей до десятков и сотен мкг/л;
  - \* в электротермическом варианте – от тысячных до десятых долей мкг/л.
  - \* Для таких элементов как As, Cd, Hg, Se, Zn и некоторые другие, пределы обнаружения, реализуемые в методе атомно-абсорбционной спектроскопии, являются одними из самых низких в аналитической химии.

Современная техника атомно-абсорбционного анализа, реализуя **гибкость метода**, позволяет устанавливать содержание элементов в широком интервале концентраций:

- \* в пламени – от десятитысячных долей процента до десятков массовых процентов;
- \* в электротермических атомизаторах нижняя граница определяемых массовых долей для многих элементов составляет  $10^{-6}$ - $10^{-4}$  % мас., верхняя – до  $10^{-3}$ % мас.

# Недостатки ААС

Атомно-абсорбционный метод **немногоэлементный**, требующий дополнительных комплектующих и расходных материалов (графитовые кюветы, источники возбуждения).

# Применение ААС

В настоящее время с использованием данного метода можно анализировать как высокочистые водные и органические растворы, так и воды с морской соленостью и рассолы.

Метод успешно применяется для анализа как легкорастворимых металлов и сплавов, так и для объектов, которые достаточно трудно перевести в раствор: шлаки, разнообразные современные керамики, горные породы, минералы и другие.

Наиболее широко метод употребляется для анализа экологических объектов: природные и сточные воды, почвы, растения, биологические ткани и жидкости, корма, продукты питания, атмосферные выбросы, бытовая и техническая пыль и другие.

## Сравнение пределов обнаружения элементов (нг/мл) методами атомной спектроскопии

Элемент	ААС (пламя)	ААС (э/т)	АЭС (пламя)	АЭС (ППТ)	АЭС (ИСП)	АФС
Al	20	0,01	3	2	0,2	0,6
Ba	8	0,04	1	2	0,01	2
Be	1	0,003	100	0,5	0,003	1
B	700	15	50	5	0,1	2000
V	20	0,1	7	8	0,06	30
Bi	0,02	0,1	1000	75	10	2
W	500		200	30	0,8	2000
Gd	1000	8	120		0,4	800
Ga	50	0,01	5	38	0,6	0,9
Ge	50	0,1	400		0,5	100
Fe	3	0,01	10	3	0,09	3
Au	6	0,01	500	3	0,9	5
In	20	0,02	1	38	0,4	0,2
Cd	0,5	0,0002	300	0,5	0,07	0,001
K	1	0,004	0,01	0,3	30	0,8

# Сравнение пределов обнаружения элементов (нг/мл) методами атомной спектроскопии

Элемент	ААС (пламя)	ААС (э/т)	АЭС (пламя)	АЭС (ППТ)	АЭС (ИСП)	АФС
Mg	0,1	0,0002	1	0,2	0,003	0,1
Mn	0,8	0,0005	1	0,5	0,01	0,4
Cu	1	0,005	3	2	0,04	0,03
Mo	10	0,02	10	0,5	0,2	12
As	0,02	0,08	2000	45	2	0,1
Na	0,2	0,004	0,01	0,05	0,1	0,1
Ni	2	0,05	10	2	0,2	2
Sn	10	0,03	100	23	3	10
Hg	0,001	0,2	150	75	1	0,003
Pb	10	0,007	0,2	23	1	10
Se	0,02	0,05		45	1	0,06
Ag	0,9	0,001	2	2	0,2	0,1
Sb	0,1	0,08	200	3	10	0,1
U		300	100	150	1,5	
Zn	0,8	0,0006	1000	2	0,1	0,0003