

# Основы радиохимии и радиологии

## 3 курс ХФ

309 гр. Занятие № 2  
27 сентября

# Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом

Ионизация среды (газ, жидкость, твердое тело), возникновение электронов и ионов (первичных или вторичных). Возникновение импульса электрического тока если среда находится в электрическом поле.

Ионизационные детекторы:  
ионизационные камеры, газоразрядные, полупроводниковые, pin-диодные,

Возбуждение атомов среды с последующей релаксацией системы с испусканием квантов фотонного излучения - сцинтилляции

Сцинтилляционные детекторы:  
жидкие, твердые, газовые, детекторы Черенковского излучения и тд.

Первичные или вторичные химические реакции, приводящие к визуализации частицы или ее трека

Разнообразные трековые детекторы, компьютерная и авто-радиография

При поглощении ионизирующего излучения также возможно изменение температуры объекта – основа калориметрических детекторов

Измерили радиоактивность препарата  $^{58}\text{Co}^{35}\text{SO}_4$  с помощью торцового счетчика Гейгера-Мюллера с окном толщиной  $4 \text{ мг/см}^2$ . Скорость счета этого препарата составила  $6100 \text{ имп/мин}$  при фоне  $20 \text{ имп/мин}$ . Определите суммарную радиоактивность препарата, если разрешающее время счетчика  $1 \cdot 10^{-4} \text{ с}$ , диаметр окна детектора  $2 \text{ см}$ , расстояние от препарата до счетчика  $5 \text{ см}$ . Препарат без носителя (тонкий), покрыт алюминиевой фольгой толщиной  $0,01 \text{ см}$ . При расчете отражением излучения от подложки можно пренебречь. Плотность алюминия  $2,7 \text{ г/см}^3$ . Некоторые характеристики радионуклидов и их излучений приведены в таблице

Радионуклид	Тип распада	Период полураспада	$E_{\beta, \max}$ , МэВ	$R_{\max}$ , Г/см <sup>2</sup>	$\mu$ , см <sup>2</sup> /Г
$^{35}\text{S}$	$\beta^-$ (100%)	87 сут	0,167	0,032	210
$^{58}\text{Co}$	$\beta^-$ (15%) ЭЗ (85%)	71 сут	0,475	0,147	43

## **Примеры задач для подготовки к контрольной № 1**

## Краткая характеристика заданий контрольной работы № 1

Схемы распада, энергия распада, энергия частиц

Основной закон радиоактивного распада

Равновесия подвижное и вековое

Накопление РН при реакторном облучении мишени

Ослабление потока ионизирующего излучения

Зависимость скорости счета от условий измерения

## Задача 6. Зависимость скорости счета от условий измерения

**Регистрируемая активность  $I$**  связана с абсолютной активностью  **$A$**  образца, содержащего нуклид с простой схемой распада, соотношением

$$I = \varphi A = [\eta (p \varepsilon k S q)] A$$

**Эффективностью детектора ( $\varepsilon$ )** к данному виду излучения - вероятность того, что частица (квант), передав часть своей энергии атомам рабочего вещества детектора, вызовет в нем процессы, позволяющие зарегистрировать эту частицу или квант. **Коэффициент эффективности  $\varepsilon$**  - отношение числа частиц (квантов)  $I_\varepsilon$ , вызвавших такие процессы, к общему числу частиц (квантов)  $I_d$ , проникших в рабочий объем детектора ( $\varepsilon = I_\varepsilon / I_d$ )

**Коэффициент ослабления  $k$**  учитывает потери излучения на пути от источника до **рабочего вещества** детектора.

Ослабление потока  $\beta$ -частиц сравнительно тонкими поглотителями ( $d \leq 0,3 R_{max}$ ) описывается эмпирической экспоненциальной зависимостью. В этом случае коэффициент  $k$  можно определить по формуле:

$$k = \exp(-\mu d)$$

где  $\mu$  - массовый коэффициент ослабления в  $\text{см}^2/\text{г}$  (табл. П.4);  $d = d_1 + d_2$  - суммарная толщина слоя воздуха и окна в  $\text{г}/\text{см}^2$

**Поправка на схему распада  $p$ .** Доля излучения данного вида (или данной энергии) в спектре испускаемых ядром частиц (квантов) называется поправкой на схему распада  $p$ . Значения коэффициентов  $p_i$  приведены в таблицах изотопов (табл. П.1)

**Геометрический коэффициент  $\eta$**  учитывает потери излучения, обусловленные взаимным расположением препарата и счетчика. Равен отношению числа частиц (квантов)  $I_\eta$ , испускаемых препаратом, находящимся на бесконечно тонкой подложке, в направлении чувствительного объема детектора к общему числу частиц (квантов).

**Коэффициент самоослабления  $S$**  учитывает поглощение (рассеяние) ядерного излучения в самом радиоактивном веществе

**Коэффициент обратного рассеяния  $q$**  – отношение числа частиц  $I_{qS}$ , испускаемых в направлении детектора с поверхности препарата, находящегося на подложке конечной толщины, к числу частиц  $I_S$ , испускаемых в направлении детектора с поверхности того же препарата при бесконечно тонкой подложке ( $q = I_{qS} / I_S$ )

Измерили радиоактивность препарата  $^{58}\text{Co}^{35}\text{SO}_4$  с помощью торцового счетчика Гейгера-Мюллера с окном толщиной  $4 \text{ мг/см}^2$ . Скорость счета этого препарата составила  $6100 \text{ имп/мин}$  при фоне  $20 \text{ имп/мин}$ . Определите суммарную радиоактивность препарата, если разрешающее время счетчика  $1 \cdot 10^{-4} \text{ с}$ , диаметр окна детектора  $2 \text{ см}$ , расстояние от препарата до счетчика  $5 \text{ см}$ . Препарат без носителя (тонкий), покрыт алюминиевой фольгой толщиной  $0,01 \text{ см}$ . При расчете отражением излучения от подложки можно пренебречь. Плотность алюминия  $2,7 \text{ г/см}^3$ . Некоторые характеристики радионуклидов и их излучений приведены в таблице

Радионуклид	Тип распада	Период полураспада	$E_{\beta, \max}$ , МэВ	$R_{\max}$ , Г/см <sup>2</sup>	$\mu$ , см <sup>2</sup> /Г
$^{35}\text{S}$	$\beta^-$ (100%)	87 сут	0,167	0,032	210
$^{58}\text{Co}$	$\beta^-$ (15%) ЭЗ (85%)	71 сут	0,475	0,147	43



## Расчетные формулы

Поправка на схему распада  $p$  - из таблиц изотопов

Истинная скорость счета (поправка на время  $\tau$ )

$$I = [I_c / (1 - I_c \cdot \tau)] - I_{\text{фон}}$$

Геометрический коэффициент  $\eta = S_{\text{окно}} / S_{\text{шар}} = \pi \cdot r^2 / 4\pi \cdot R^2$

Определение  $d$  (г/см<sup>2</sup>) и коэффициента ослабления

$$\text{значение } d = d_{\text{Al}} + d_{\text{возд.}} + d_{\text{окно}}$$

$k = \exp(-\mu d)$  для случая  $(d/R_{\text{max}}) < 0.3$ ; или значение  $k$  по эмпирическому графику

Коэффициент самоослабления  $S = [1 - \exp(-\mu d_{\text{пр.}})] / \mu d_{\text{пр.}}$

Расчет коэффициента  $\phi$  и активности  $A = \phi I$

Решение. Поправка на разрешающее время

$$[I_c = (6100)/60 = 101.67 \text{ (имп/с)}]$$

$$I = [I_c / (1 - I_c \cdot \tau)] - I_{\text{фон}} = [101.67 / (1 - 101.67 \cdot 10^{-4})] - 0.33 = 102.38 \text{ (имп/с)}$$

$$\text{геометрический коэффициент } \eta = \pi \cdot 1^2 / 4\pi \cdot 5^2 = 0.01$$

$$\text{значение } d = d_{\text{Al}} + d_{\text{возд.}} + d_{\text{окно}} = 0.01 \cdot 2.7 + 0.0013 \cdot 5 + 0.004 = 0.0375 \text{ г/см}^2$$

$^{35}\text{S}$   $d > R_{\text{max}}$ .  **$\beta$ -частицы  $^{35}\text{S}$  не регистрируются**

$$^{58}\text{Co} \quad k = \exp(-\mu d) = \exp(-43 \cdot 0.0375) = 0.2; \quad (d/R_{\text{max}}) < 0.3.$$

$$I = I_{\text{Co}} = (\eta \cdot p \cdot k \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1) \cdot A = (0.01 \cdot 0.15 \cdot 0.2) \cdot A = 102.38; \quad A_{\text{Co}} = 341267 \text{ (Бк)}$$

$$N_{\text{S}} = N_{\text{Co}}; \quad N_{\text{Co}} = A/\lambda = 3.0915 \cdot 10^{12}$$

$$A_{\text{S}} = \lambda N = [\ln 2 / (87 \cdot 24 \cdot 3600)] \cdot 3.0915 \cdot 10^{12} = 285077 \text{ (Бк)}$$

$$A_{\text{препарат}} = 341267 + 285077 = 626344 \text{ (Бк)}$$

## Задачи для домашней подготовки к КР

Для измерения активности нуклида \*А, содержащегося в препарате толщиной  $20 \text{ мг/см}^2$ , использовали торцовый счетчик. Точечный препарат находился на расстоянии 6 см от окна детектора диаметром 1 см. Измеренная скорость счета препарата составила 4070 имп/мин, скорость счета фона – 30 имп/мин.

Вычислите коэффициент регистрации и определите активность радионуклида, если известно, что разрешающее время установки  $\tau = 2,1 \cdot 10^{-4} \text{ с}$ , толщина окна счетчика  $6 \text{ мг/см}^2$ . Эффективность счетчика принять равной 1, коэффициент обратного рассеяния – 1,3.

Тип распада	$E_{\beta, \text{max}}$ , МэВ	$R_{\text{max}}$ , г/см <sup>2</sup>	$d_{1/2}$ , г/см <sup>2</sup>	$\mu$ , см <sup>2</sup> /г
$\beta^-$ (93%) Э.З. (7%)	0,650	0,235	0,027	26,0

## «Равновесия»

Задача (решение на слайде 13)

Имеется цепочка превращений  ${}^{95}\text{Zr} \rightarrow {}^{95}\text{Nb} \rightarrow {}^{95}\text{Mo}_{\text{стаб.}}$ . В начальный момент радиоактивность препарата  ${}^{95}\text{Zr}$ , очищенного от  ${}^{95}\text{Nb}$ , равнялась 20 МБк. Определите активность  ${}^{95}\text{Nb}$  через 128 суток и его максимальную активность. Периоды полураспада  ${}^{95}\text{Zr}$  и  ${}^{95}\text{Nb}$  равны, соответственно, 64 и 35 сут.

### Задача «равновесие»

Имеется цепочка превращений  $^{95}\text{Zr} \rightarrow ^{95}\text{Nb} \rightarrow ^{95}\text{Mo}_{\text{стаб.}}$ . В начальный момент радиоактивность препарата  $^{95}\text{Zr}$ , очищенного от  $^{95}\text{Nb}$ , равнялась 20 МБк. Определите активность  $^{95}\text{Nb}$  через 128 суток и его максимальную активность. Периоды полураспада  $^{95}\text{Zr}$  и  $^{95}\text{Nb}$  равны, соответственно, 64 и 35 сут.

По условию подвижное равновесие ещё НЕ наступило.  $128 < 10 \cdot 35$

Универсальная формула (при  $N_{1,0} = 0$ )

$$a_2 = a_{1,0} [\lambda_2 / (\lambda_2 - \lambda_1)] [\exp(-\lambda_1 t) - \exp(-\lambda_2 t)];$$

$$\lambda_1 = \ln 2 / 64 = 0,01083 \text{ (сут}^{-1}\text{)}; \quad \lambda_2 = 0,019804 \text{ (сут}^{-1}\text{)};$$

$$(\lambda_2 - \lambda_1) = 0,0089738 \text{ (сут}^{-1}\text{)}; \quad \lambda_2 / (\lambda_2 - \lambda_1) = 2,20687$$

При  $t = 128$  сут.

$$a_{2,128} = 20 \cdot 2,20687 \cdot [\exp(-128\lambda_1) - \exp(-128\lambda_2)] = 7,5356 \text{ (МБк)};$$

$$t_{\text{max}} = T = [1 / (\lambda_2 - \lambda_1)] \ln(\lambda_2 / \lambda_1) = 67,2586 \text{ сут.}$$

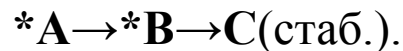
$$a_{2,T} = 20 \cdot 2,20687 \cdot [\exp(-T\lambda_1) - \exp(-T\lambda_2)] = 9,654 \text{ (МБк)}$$

Примечание. Формулу  $a_2/a_1 = \lambda_2 / (\lambda_2 - \lambda_1)$  можно применять лишь при наступления подвижного равновесия, т.е. в случае  $t > 10 T_{1/2,2}$

Если её использовать (ошибка), то получим  $a_{2,128} = 11,035 \text{ МБк}$

### Задача для домашней подготовки

Ниже приведена цепочка превращений:



Нуклид **A** после очистки от продуктов распада имел радиоактивность 100 МБк. Период полураспада **A** составляет 50 суток, **B** – 1 час. Определите: а) через какое минимальное время накопится 70 МБк нуклида **B**; б) радиоактивность нуклида **B** в препарате через 100 суток; в) отношение чисел атомов  $N(A):N(B)$  в препарате через 15 суток; г) через какое время суммарная активность препарата составит 80 МБк.

## Вековое равновесие

**III.3.** Препарат  $^{210}\text{Pb}$ , активность которого после отделения продуктов распада составляла 20 кБк, хранился в лаборатории в течение несколько лет. Проведенные в настоящее время измерения показали, что поток  $\alpha$ -частиц, испускаемых препаратом, равен 5530 част./с. Определите время хранения препарата и рассчитайте количества вещества атомов  $^{210}\text{Bi}$ ,  $^{210}\text{Po}$  и  $^{206}\text{Pb}$ , накопившихся в препарате за это время.

Схема ядерных превращений (ряд  $^{235}\text{U}$ ):  $^{210}\text{Pb} \rightarrow ^{210}\text{Bi} \rightarrow ^{210}\text{Po} \rightarrow ^{206}\text{Pb}$ .

Периоды полураспада радионуклидов свинца, висмута и полония: 22 года, 5 суток и 138 суток, соответственно.

### Решение III.3.

**Вековое равновесие (по условию  $t \gg 138$  сут.)**

В настоящее время ( $t$ )  $a(^{210}\text{Pb}) = a(^{210}\text{Po}) = a(^{210}\text{Bi}) = 5530$  Бк

$5530 = a_0 \exp(-\lambda t) = 20 \cdot 10^3 \exp(-\lambda t)$ ;  $\lambda(^{210}\text{Pb}) = t \cdot \ln 2 / 22 \Rightarrow t = 40,8$  года;

$\lambda(^{210}\text{Bi}) = 1,604507 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$      $\lambda(^{210}\text{Po}) = 5,81343 \cdot 10^{-8} \text{ с}^{-1}$

$v(^{210}\text{Bi}) = a / \lambda N_A = (5530 / \lambda N_A) = 5,72515 \cdot 10^{-15}$  (моль)

$v(^{210}\text{Po}) = a / \lambda N_A = (5530 / \lambda N_A) = 1,58014 \cdot 10^{-13}$  (моль)

Расчет  $v(^{206}\text{Pb})$ .

$N(^{206}\text{Pb}) =$  число распавшихся ядер  $^{210}\text{Pb} = \Delta N$ ; Для расчета используем

следующие данные:  $t_1 = 0$ ,  $t_2 = 40,8 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600$  (с);  $I_0 = 20000$  (с $^{-1}$ );

$\lambda = \ln 2 / (22 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600)$

$$\Delta N = \int_{t_1}^{t_2} I_0 e^{-\lambda t} dt = I_0 \left( \frac{e^{-\lambda t_2}}{-\lambda} - \frac{e^{-\lambda t_1}}{-\lambda} \right) = 1,4483 \cdot 10^{13}$$

Из  $\Delta N(\text{Pb})$  надо вычесть  $N(\text{Bi})$  и  $N(\text{Po})$ , содержащиеся в образце в момент  $t$ .

**Второй вариант.** Учитывая тот факт, что время наблюдения (40,8 лет)  $>$  периода полураспада (22 года), можно определить  $\Delta N$  по разности числа ядер  $^{210}\text{Pb}$  в момент  $t_1 = 0$  и  $t_2 = 40,8$  года.

$\Delta N = (20000 / \lambda) - (5530 / \lambda) = 1,44835 \cdot 10^{13} \Rightarrow$  далее вычесть число атомов висмута и полония.



## Задачи «основной закон распада»

Удельная радиоактивность океанической воды по  $^{40}\text{K}$  составляет  $12 \text{ кБк/м}^3$ . Рассчитайте концентрацию солей калия в океане (моль/л).  
Период полураспада  $^{40}\text{K}$  составляет  $1,28 \cdot 10^9$  лет, его содержание в природной смеси изотопов калия  $0,012\%$ .

$$a = \lambda N; \quad \lambda = \ln 2 / T_{1/2} = 1,7171525 \cdot 10^{-17} \text{ (с}^{-1}\text{)};$$

В  $1000 \text{ л}$  океанической воды  $N(^{40}\text{K}) = a/\lambda = 12000/\lambda = 6,9883 \cdot 10^{20} \text{ (Бк)}$ ;

Число атомов  $\text{K}$   $N(\text{K}) = N(^{40}\text{K})/\omega = 5,82354 \cdot 10^{24}$ ;

$C = N(\text{K})/1000N_A = 0,00967 \text{ (моль/л)}$

## Основной закон распада.

### Задачи для домашней подготовки к КР

1. Элемент калий помимо двух стабильных нуклидов  $^{39}\text{K}$  и  $^{41}\text{K}$  (массовая доля 93,08 и 6,91%), содержит также радионуклид  $^{40}\text{K}$  (0,012 %). Период полураспада  $^{40}\text{K}$   $1,28 \cdot 10^9$  лет, При распаде  $^{40}\text{K}$  испускаются или  $\beta$ -частицы (вероятность 89,3 %) или  $\gamma$ -кванты (вероятность 10,7 %). Калий является биогенным (жизненно необходимым) элементом и входит в состав всех продуктов питания. Рассчитайте массовую долю элемента калий в образце зерен кофе, если установлено, что за 10 минут 10 г этого образца испускает 321 гамма-квант.

Ответ: массовая доля калия в зернах  $\omega = 1.61 \%$

2. В радиоизотопном термоэлектродгенераторе «ИЗУ-1М» кинетическая энергия  $\beta$ -частиц, появляющихся при распаде  $^{90}\text{Sr}$  ( $^{90}\text{Y}$ ), преобразуется сначала в тепловую, затем - в электрическую. Через 14,35 лет после начала эксплуатации тепловая мощность «ИЗУ-1М» составила 1500 Дж/с. Определите тепловую мощность этого генератора и соответствующую массу находившегося в нем  $^{90}\text{SrTiO}_3$  через 30 дней после начала эксплуатации. При расчете полагать, что кинетическая энергия частиц полностью преобразуется в тепловую.

Периоды полураспада  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{90}\text{Y}$  равны 28,7 лет и 64,4 ч, соответственно.

Максимальная энергия  $\beta$ -частиц  $^{90}\text{Sr}$  равна 546 кэВ ( $p = 100\%$ ),  $\beta$ -частиц  $^{90}\text{Y}$  – 2274 кэВ ( $p = 100\%$ )

Ответ:  $m(^{90}\text{SrTiO}_3) \dots(\text{г})$

## Задание «Ослабление потоков ИИ»

Параллельные потоки моноэнергетических электронов,  $\beta^-$ - частиц и  $\alpha$ - частиц проходят через алюминиевые экраны толщиной 1 мм. Энергия частиц каждого типа равна 1,0 МэВ, плотность их потоков  $1000 \text{ см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ . Оцените плотность потока частиц за экраном.

Экран  $d = 2,7 \cdot 0,1 = 0,27 \text{ г/см}^2$ .

**Для электронов  $R_{\text{max}} = 412 \text{ мг/см}^2$**  (см. решение 1). Задерживается 65,5% потока, проходит 34,5%; за экраном плотность потока электронов  $\sim 340 \text{ см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ .

**Для  $\beta$ -частиц с энергией 1 МэВ  $R_{\text{max}} = 0,410 \text{ г/см}^2$** ,  $\mu = 13 \text{ см}^2/\text{г}$  (табл. П.4).

**Отношение  $d/R_{\text{max}} = 0,659 > 0,3$** . По графику зависимости коэффициента ослабления  $k$  от отношения  $d/R_{\text{max}}$  находим значение  $k \approx 0,01$ . Только 1 из 100 частиц проходит за экран; плотность потока за экраном  $\sim 10 \text{ см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ .

**Ответ II. 2 .  $F_e \sim 340 \text{ см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ ;  $F_\beta \sim 10 \text{ см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ ;  $F_\alpha = 0$**