

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Взаимодействие β -излучения с веществом

Методические указания к лабораторной работе

Электронный учебный материал

Минск \diamond БНТУ \diamond 2013

УДК 614.876(075.8)
ББК 51.26я7

Авторы:

Н.Н.Митькина
И.К.Султанова

Рецензенты:

И.А.Сатиков, директор МИДО, канд. физ.-мат. наук
П.Г.Кужир, зав. кафедрой физики БНТУ, канд. физ.-мат. наук

В методических указаниях рассмотрено взаимодействие β -излучения с веществом, особенности его измерения, а также методы защиты от β -излучения. Кратко обсуждается природа, свойства и источники β -излучения.

Белорусский национальный технический университет
Пр-т Независимости, 65, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.(017)292-77-52 факс (017)292-91-37
E-mail: ...
<http://www...>
Регистрационный № БНТУ/ФИТР47-43.2013

© БНТУ, 2013
© Митькина Н.Н., Султанова И.К., 2013

2013

Содержание

| | |
|---|----|
| Введение | 4 |
| β -распад | 4 |
| Взаимодействие β -частиц с веществом | 7 |
| Защита от β -излучения | 10 |
| Методика приготовления проб для измерения на бета-радиометре | 12 |
| Бета-радиометр РУБ-91 | 13 |
| Органы управления бета-радиометра | 14 |
| Эсперимент | 15 |
| Контрольные вопросы | 18 |
| Список литературы | 19 |

Введение

Ионизирующее излучение, воздействуя на живой организм, вызывает в нем цепочку обратимых и необратимых изменений, которые приводят к опасным биологическим последствиям. Первичным этапом, инициирующим многообразные процессы, происходящие в биологическом объекте, являются ионизация и возбуждение атомов. Именно в этих физических актах взаимодействия происходит передача энергии ионизирующего излучения облучаемому объекту. В методических указаниях рассматривается природа β -излучения, его взаимодействие с веществом, способы защиты от внешних потоков β -излучения, а также особенности его измерения.

Цель работы:

1. Изучить
 - - взаимодействие β -частиц с веществом;
 - - способы защиты от β -излучения;
 - - принцип действия β -радиометра;
 - - методику приготовления проб для проведения измерений β -излучения радионуклидов;
2. Измерить активность образцов по *Sr-90+Y-90* и *K-40*.
3. Рассчитать удельные и объемные активности образцов.
4. Решить задачу.

Указания по технике безопасности.

1. ***Включение лабораторной установки производится с разрешения преподавателя или инженера лаборатории.***
2. ***В лабораторной работе используются очень хрупкие кюветы с порошками. Будьте осторожны!***

1. β -распад

Устойчивость ядра определяется оптимальным соотношением протонов и нейтронов. Если нейтронов слишком много, они способны превращаться в протоны, а если протонов много, они способны превращаться в нейтроны. И в том, и в другом случае ядро превращается в другое ядро, образуется новый химический элемент. Этот процесс называется радиоактивным распадом и сопровождается

ся испусканием β -излучения.

β -излучение это поток β -частиц. β -частицами называют два вида элементарных частиц: электроны ${}_{-1}^0e$ и позитроны ${}_{+1}^0e$. Они имеют одинаковые характеристики: массу, величину заряда, спин и т.д., отличаясь лишь знаком электрического заряда. Источниками β -частиц являются радиоактивные ядра, которые испытывают β -распад.

β -распад – самопроизвольное превращение ядра одного химического элемента в ядро другого химического элемента с тем же массовым числом A и с зарядовым числом, отличающимся от исходного на $\Delta Z = \pm 1$.

Периоды полураспада β -активных ядер лежат в широком интер-

-2

электронный или β^- - распад, при котором из ядра вылетает электрон ${}_{-1}^0e$ и антинейтрино $\tilde{\nu}$ (антинейтрино – элементарная незаряженная частица с массой покоя меньше, чем $4 \cdot 10^{-4} m_e$) и образуется ядро с тем же массовым числом, но с увеличенным на единицу зарядовым числом ($\Delta Z = +1$).

Электронный распад подчиняется закону смещения:



Электрон и антинейтрино возникают в ядре в процессе радиоактивного превращения одного из нейтронов ${}^1_0 n$ в протон ${}^1_1 p$



Примером этого вида распада является радиоактивное превращение ${}^{90}_{38} Sr$:



период полураспада $Sr-90$ равен 29,1 года. Дочернее ядро иттрия-90 также является радиоактивным и тоже испытывает β^- - распад, в результате которого образуется цирконий:



период полураспада $Y-90$ равен 64 часа. Электронный распад испытывают все естественные радионуклиды и большинство искусственных радионуклидов.

позитронный или β^+ -распад, при котором из ядра вылетают позитрон и нейтрино ν , а новое ядро имеет зарядовое число на единицу меньше ($\Delta Z = -1$).

Закон смещения для позитронного распада:



Позитрон и нейтрино возникают в результате превращения одного из протонов в нейтрон. Распад свободного протона невозможен энергетически, так как его масса меньше массы нейтрона. Внутри ядра такой процесс может идти за счет энергии ядра:



Вероятность этого процесса составляет доли процента. Позитронный распад испытывают некоторые искусственные радионуклиды.

электронный захват или **K-захват**, при котором ядро захватывает электроны из электронной оболочки и испускает нейтрино. При этом внутри ядра один протон превращается в нейтрон:



Электронный захват испытывает радиоактивный изотоп калия **K-40**, в результате чего образуется кальций:



Период полураспада **K-40** равен $1,26 \cdot 10^9$ лет. Наиболее вероят-

При распаде некоторых β -активных ядер наблюдаются одновременно несколько конкурирующих процессов. Например, при распаде радионуклида **K-40**, доля которого в природном калии составляет 0,0118 %, наблюдается конкуренция β^- -распада и K-захвата.

Экспериментальное исследование энергии, выделяющейся при β -распаде привело к открытию нейтрино. Калориметрические ис-

следования показали, что энергия β -частиц меньше максимальной энергии, равной разности между массой покоя материнского ядра и суммой масс электрона и дочернего ядра. Следовательно, эти распады протекают с кажущимся нарушением закона сохранения энергии. Чтобы объяснить исчезновение энергии В.Паули высказал в 1932 году предположение, что при β -распаде вместе с электроном испускается еще одна частица, которая уносит часть энергии. Э.Ферми предложил назвать эту частицу нейтрино (маленький нейтрон). Экспериментальное доказательство существования нейтрино было получено только в 1956 году.

Так как при электронном и позитронном распаде из ядра вылетают две частицы, а распределение между ними общей энергии, выделяющейся при распаде, происходит статистически, то кинетическая энергия β -частицы может изменяться от нуля до некоторого предельного значения E_{max}^{β} , характерного для рассматриваемого радионуклида. Значения максимальной энергии изменяются от 18 кэВ (для ${}^3_1\text{H}$) до 16,6 МэВ (для ${}^{12}_7\text{N}$). Средняя энергия β -частиц E_{cp}^{β} это энергия, которую имеет наибольшее число β -частиц, испускающихся при распаде данных радионуклидов. Таким образом спектр β -излучения – сплошной.

2. Взаимодействие β -частиц с веществом

Проходя через вещество, β -частица взаимодействует с ядрами и электронами атомов вещества. При каждом столкновении с ядрами или электронами среды β -частица может значительно изменять направление движения, поэтому β -частицы движутся в веществе по ломаной линии и им не свойственна определенная глубина проникновения в вещество.

Процессы прохождения через вещество позитронов и электронов примерно одинаковы. В дальнейшем для определенности рассматривается торможение электронов в веществе. Это оправдано еще и тем, что подавляющее большинство встречающихся в практике радиационного контроля β -активных ядер испытывает электронный распад.

При прохождении через вещество в результате взаимодействия с ядрами и атомными электронами β -частицы постепенно теряют свою энергию. Потери энергии β -частиц складываются из ионизационных и радиационных потерь.

Ионизационные потери возникают вследствие неупругого взаимодействия β -частицы с атомным электроном. Электрон, получив энергию, может либо покинуть атом (т.е. атом превращается в положительно заряженный ион), либо атом переходит в возбужденное состояние (т.е. атом приобретает «лишнюю» энергию).

Радиационные потери обусловлены испусканием β -частицей тормозного рентгеновского излучения. Если любая заряженная частица движется в электрическом поле, то на нее действует сила. Следовательно, частица движется с ускорением. Из электродинамики известно, что движущаяся с ускорением заряженная частица испускает электромагнитное излучение. Поэтому, если β -частицы пролетают вблизи ядра атома, они начинают испускать тормозное рентгеновское излучение. Установлено, что интенсивность тормозного рентгеновского излучения прямо пропорциональна квадрату зарядового числа атомного ядра, в поле которого движется частица, и обратно пропорциональна массе частицы:

$$I \approx \frac{Z^2}{m_e} \quad (9)$$

По своему вкладу в потери энергии β -частиц радиационные потери примерно на три-четыре порядка меньше, чем ионизационные потери. Однако радиационные потери играют огромную роль в обнаружении и определении активности радионуклидов, β -распад которых не сопровождается испусканием γ -излучения. Например, обнаружение чистого β -излучателя стронция-90, попавшего внутрь организма человека, осуществляется по измерению тормозного рентгеновского излучения с помощью гамма-спектрометров излучения человека (СИЧ). Поскольку пробеги β -частиц в биологической ткани невелики, β -излучение не выходит из тела человека. Рентгеновское излучение пронизывает тело человека насквозь и его можно измерить. А затем рассчитать активность человека по **Sr-90**.

Количественной мерой радиоактивности вещества является активность. **Активность** – отношение числа радиоактивных рас-

падов dN' , происшедших в радиоактивном препарате, к промежутку времени dt , за который они произошли:

$$A = \frac{dN'}{dt} \quad (10)$$

$$A = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} N = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \cdot \frac{m}{M} \cdot N_A, \quad (11)$$

где $T_{1/2}$ - период полураспада, N – количество ядер радионуклида,

M – молярная масса, m – масса радионуклида, $N_A = 6,023 \cdot 10^{23}$ *моль*⁻¹ - число Авогадро.

Единицы измерения активности:

| СИ | Внесистемные единицы |
|--------------------------------|-------------------------------|
| Бк (Беккерель) | Ки (Кюри) |
| 1 Бк = $2,7 \cdot 10^{-11}$ Ки | 1 Ки = $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк |

Активность радионуклидов в препарате равна 1 Бк, если в препарате происходит 1 радиоактивный распад за 1 секунду. 1 Ки – активность одного грамма радия.

Как видно из формулы (11) активность препарата зависит от количества радионуклидов, и, следовательно, от количества препарата, поэтому на практике используются следующие величины:

$$\text{Удельная активность } A_m = \frac{A}{m}, \text{ Бк/кг} \quad (12)$$

где m – масса вещества.

$$\text{Объемная активность } A_V = \frac{A}{V}, \text{ Бк/м}^3, \text{ Бк/л} \quad (13)$$

где V – объем вещества.

3. Защита от β -излучения

Важнейшей величиной, характеризующей распространение частиц в веществе, является *пробег R* - смещение в пространстве по прямой линии от точки рождения до точки остановки или поглощения, независимо от того, по какой траектории двигалась частица. Пробег R измеряется в единицах длины (мм, см). Поскольку энергия β -частиц, испускаемых данными радионуклидами, изменяется от нуля до максимальной величины E_{max}^{β} , то пробеги β -частиц от одного и того же радионуклида неодинаковы. В связи с этим понятие «пробег β -частицы, испущенной данным радионуклидом» не имеет физического смысла. Кроме того, из-за извилистости траектории глубина проникновения β -частиц в вещество меньше, чем средняя длина пробега. Поэтому для β -частицы вводится понятие максимального пробега.

Максимальный пробег β -частиц R_{max}^{β} - минимальная толщина слоя вещества, при которой ни один из электронов, падающих нормально на слой, из него не вылетает. В литературе обычно приводятся эмпирические формулы для пробегов моноэнергетических электронов. Величины максимальных пробегов моноэнергетических электронов в биологической ткани, воздухе и алюминии для значений энергий, характерных для бета-частиц, испускаемых радионуклидами, приведены в табл. I.

Таблица 1. Максимальный пробег моноэнергетических электронов в различных веществах

| Максимальная энергия β -частиц, МэВ | Воздух, см | Биологическая ткань, мм | Алюминий, мм |
|---|------------|-------------------------|--------------|
| 0,01 | 0,13 | 0,002 | 0,0006 |
| 0,05 | 2,91 | 0,046 | 0,0144 |
| 0,1 | 10,1 | 0,158 | 0,050 |
| 0,5 | 119 | 1,87 | 0,593 |
| 1,0 | 306 | 4,80 | 1,52 |

| | | | |
|-----|-----|------|------|
| 1,5 | 494 | 7,80 | 2,47 |
| 2,0 | 710 | 11,1 | 3,51 |
| 2,5 | 910 | 14,3 | 4,52 |

Для грубых оценок максимальных пробегов β -частиц в алюминии и воздухе можно использовать следующие формулы:

$$R_{max}^{\beta} \approx 450 E_{max}^{\beta} \quad \text{для воздуха} \quad (10)$$

$$R_{max}^{\beta} \approx 0,25 E_{max}^{\beta} \quad \text{для алюминия} \quad (11)$$

В этих формулах энергия β -частиц ставится в МэВ и длина пробега получается в см.

Пробег частиц имеет важное значение для определения оптимальной толщины пробы измеряемого образца и толщины защитных экранов.

Используя данные о максимальных пробегах β -частиц, нетрудно рассчитать толщину защитных экранов, предохраняющую человека от воздействия внешних потоков β -излучения. Очевидно, что эта толщина должна быть больше максимального пробега β -частиц. Материал, выбираемый для защитных экранов, должен быть легким (алюминий, органическое стекло), так как в веществе в результате взаимодействия ядер атомов с β -частицами возникает тормозное рентгеновское излучение, которое является проникающим. Интенсивность рентгеновского излучения прямо пропорциональна квадрату зарядового числа атомного ядра тормозящего вещества.

Максимальная энергия бета-частиц большинства "чернобыльских" радионуклидов не превышает 2 МэВ. Соответственно в воздухе их пробеги не превышают 10м, в биологической ткани - 10 см, в алюминии - 5 мм. В значительной мере β -излучение этих радионуклидов задерживается одеждой, а если и достигает тела, то проникает практически на глубину всего лишь нескольких миллиметров. Достаточно знать о наличии β -излучения, чтобы средствами индивидуальной защиты предотвратить попадание радионуклидов внутрь организма.

Наибольшую опасность внешние потоки β -частиц представляют для хрусталика глаз. Если возможно облучение β -активными радионуклидами, для которых $E_{max}^{\beta} \geq 3,5 \text{ МэВ}$, для защиты глаз

необходимо использовать очки из органического стекла или прозрачные плексигласовые щитки. Для защиты кожи рук рекомендуется применять защитные перчатки.

4. Методика приготовления проб для измерения на бета-радиометре

Пробег β -частиц имеет важное значение для определения оптимальной толщины пробы измеряемого образца. β -частицы легко поглощаются слоем конденсированного вещества миллиметровой толщины. Поэтому в исследуемой пробе фактически излучает в окружающую среду только тонкий поверхностный слой пробы, которую необходимо специально готовить. Для подготовки проб для измерения на бета-радиометре используют метод концентрирования радиоактивного стронция.

Пробы воды концентрируют различными способами: выпариванием, осаждением и ионным обменом.

Пробу почвы взвешивают целиком с растительным покровом, высушивают до воздушно-сухого состояния и прокаливают целиком при температуре 550°C в течение 6-8 часов до полного удаления органического вещества (периодически пробу вынимают из печи и перемешивают). Прокаленную пробу взвешивают.

Отбирают 3 пробы массой до 100 г каждая и на радиометре РУБ-91 измеряют их β -радиоактивность. Проба считается хорошо гомогенизированной, если результаты измерений не различаются более, чем в 1,5-2 раза от среднего значения. Если различия превышают указанную величину, то повторяют перемешивание. Для радиометрического анализа отбирают среднюю пробу.

Пробу растительности и продуктов питания растительного происхождения взвешивают, измельчают ножом или на мясорубке, помещают в сушильный шкаф и высушивают при температуре 100-120°C. Сухую пробу обугливают на электрической плитке и озоляют в муфельной печи при температуре 600-700°C.

Мясо и мышцы рыбы отделяются от костей, нарезаются мелкими кусками, высушиваются под инфракрасной лампой, обугливаются на электроплитке и озоляют при температуре 600-700°C.

Свежее молоко выпаривают в широкой эмалированной или алюминиевой кастрюле.

Для любого вида продукции объем пробы, размещенной в измерительной кювете, должен соответствовать ее объему - 30 см^3 , отличаясь от него не более, чем на $\pm 10\%$.

5. Бета-радиометр РУБ-91

Бета-радиометр РУБ-91 "Адани" предназначен для измерения удельной (объемной) активности стронция-90 в природных объектах и продуктах питания.

Бета-радиометр позволяет проводить измерения в твердых и сыпучих образцах, сухих и сублимированных продуктах питания, а также пробах почв на фоне радионуклидов техногенного происхождения, таких как цезий-137, рутений-106, церий-144 и естественного радионуклида калия-40.

Принцип действия бета-радиометра основан на анализе амплитудного распределения импульсов, возникающих в сцинтилляционном детекторе при попадании в него β -частиц. Вычисление активности исследуемого образца производится на основе анализа распределения импульсов по амплитуде. Упрощенная структурная схема бета-радиометра приведена на рисунке.

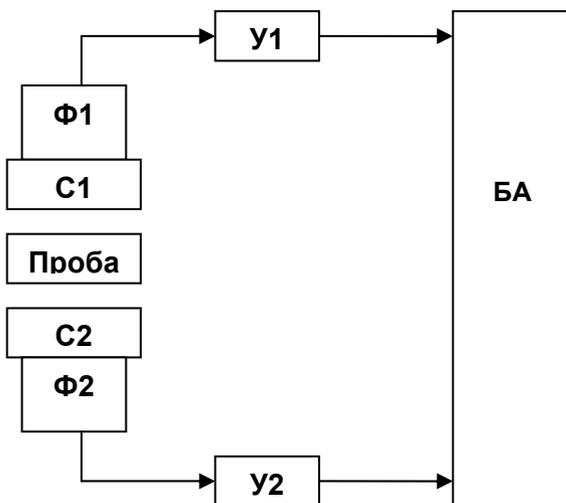


Рис. Упрощенная структурная схема бета-радиометра.

β -частица, испускаемая пробой, вызывает вспышку в одном из сцинтилляторов С1 или С2. Вспышки, попадая на один из фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) Ф1 или Ф2, преобразуются в электрические импульсы. Импульсы тока с выходов ФЭУ через усилители У1 и У2 поступают на блок анализатора БА.

6. Органы управления бета-радиометра

6.1. Блок анализатора.

Кнопка «**СЕТЬ**» служит для включения и выключения прибора.

Кнопка «**СБРОС**» служит для отмены ошибочной команды и приведения радиометра в исходное состояние.

Кнопки блока «**РЕЖИМ ИНДИКАЦИИ**» предназначены для вывода на цифровое табло количественных характеристик активности измеряемой пробы.

Кнопки « $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ » и « ^{40}K » используются для вы-

вода на цифровое табло активности пробы соответствующих радионуклидов;

Кнопка «**ПОГРЕШНОСТЬ**» служит для вывода на цифровое табло погрешности определения активности радионуклида в пробе.

Кнопка «**ФОН**» включает режим измерения фона.

Кнопки «**ВРЕМЯ ИЗМЕРЕНИЯ** · 10³ » служат для задания вре-
2 4

Кнопки «**ПЛОТНОСТЬ**, г·см⁻³ » предназначены для задания

Выполнение команды при нажатии любой из кнопок подтверждается звуковым сигналом. При этом загорается соответствующий этой кнопке светодиод.

Светодиоды «**Бк/пр**» и «**кБк/пр**», расположенные на цифровом табло, служат для индикации единицы измерения активности исследуемой пробы.

6.2. Блок детекторов.

Кнопка «  » служит для включения и выключения блока детекторов.

Кнопка «  » предназначена для включения высоковольтных источников питания фотоумножителей.

7. Эксперимент

Нажмите кнопки «**СЕТЬ**» на блоке детекторов и блоке анализатора;

- нажмите кнопку «**СБРОС**» блока анализатора;

- выдержите бета-радиометр включенным в течение 2-х минут.

Выход на рабочий режим бета-радиометра сопровождается звуковым сигналом и высвечиванием «0» во всех разрядах табло блока

анализатора и загоранием светодиода над кнопкой «  » блока

детекторов.

Задание 1. Измерение фона.

1. Задвиньте столик блока анализатора до упора и закрепите его винтом;

2. Нажмите кнопку **«СБРОС»**; выдержите бета-радиометр включенным в течение 2-х минут. Выход на рабочий режим бета-радиометра сопровождается звуковым сигналом и высвечиванием **«0»** во всех разрядах табло блока анализатора и загоранием светодиода

над кнопкой  блока детекторов.

3. Нажмите кнопку **«ФОН»**, при этом над кнопкой загорится светодиод и прозвучит звуковой сигнал;

4. Нажмите кнопку **«ВРЕМЯ ИЗМЕРЕНИЯ · 10³»** - **«0,5»**. В

Задание 2. Измерение активности пробы № 1.

1. Установите кювету №1 на выдвижной столик блока анализатора, задвинув столик до упора и закрепив его винтом.

ВНИМАНИЕ! Запрещается устанавливать кювету с пробой внутрь блока детектора без приклеенной крышки!

2. Проконтролируйте, чтобы над кнопкой **«ФОН»** не горел светодиод, в противном случае повторно нажмите кнопку **«ФОН»** для его выключения;

3. Нажмите кнопку **«СБРОС»**;

4. Нажмите кнопку, соответствующую виду пробы с определенной плотностью (плотность пробы определяется по формуле)

$$\rho = m / V, \quad (14)$$

где m – масса пробы в граммах, V - объем измерительной кюветы, равный 30 см³.

5. Нажмите кнопку  на блоке детекторов;

6. Нажмите кнопку «**ВРЕМЯ ИЗМЕРЕНИЯ**·10³» - «0,5». Над

⁴⁰К

⁹⁰Sr+⁹⁰Y

7. Для индикации величины абсолютной погрешности ΔA (Бк/пр) нажмите кнопку «**ПОГРЕШНОСТЬ**». Величину относительной погрешности измерения определите по формуле:

$$\varepsilon = \frac{\Delta A}{A} \cdot 100\% \quad (15)$$

A - активность пробы в Бк/пр. Если полученная величина относительной погрешности больше 35%, то для повышения точности следует увеличить время измерения. Данные занесите в табл. 2.

8. Аналогичные измерения проведите для всех образцов, указанных преподавателем. **Внимание! При смене образца не забывайте нажимать кнопку «СБРОС».**

Таблица 2.

| № пробы | Активность пробы, A, Бк/пр. | | Погрешность, ΔA , Бк/пр. | | Относительная погрешность, ε | |
|---------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------|--|-----------------|
| | ⁹⁰ Sr+ ⁹⁰ Y | ⁴⁰ К | ⁹⁰ Sr+ ⁹⁰ Y | ⁴⁰ К | ⁹⁰ Sr+ ⁹⁰ Y | ⁴⁰ К |
| 1 | | | | | | |
| 2 | | | | | | |

Задание 3. Расчет удельной и объемной активности проб.

Используя данные таблицы 2, рассчитайте удельную активность по формуле (12) и объемную активность по формуле (13), объем пробы при полном заполнении измерительной кюветы равен 0,03 л.

Данные расчета занесите в табл.3.

Таблица 3.

| № пробы | Масса пробы, кг | Объем пробы, л | Удельная активность, A_m , Бк/кг | | Объемная активность, A_v , Бк/л | |
|---------|-----------------|----------------|------------------------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------|
| | | | $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ | ^{40}K | $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ | ^{40}K |
| 1 | | | | | | |
| 2 | | | | | | |

Задание 4. Решите задачу по выбору преподавателя.

Задача 1. Определите годовую эквивалентную дозу внутреннего облучения легких естественным радионуклидом калия-40.

Удельная активность легких по К-40 $A_m=2,08 \cdot 10^{-9}$ Ки/кг. В каждом акте распада К-40 поглощается энергия 0,47 МэВ. Период полураспада К-40 равен $T_{1/2}=1,26 \cdot 10^9$ лет.

Задача 2. По измеренной активности рассчитайте массу радионуклидов в исследованных образцах.

Контрольные вопросы

1. Природа β -излучения.
2. Законы смещения при β -распаде (для всех видов распада). Взаимопревращения протонов и нейтронов.
3. Ионизационные и радиационные потери β -излучения.
4. Пробег частицы в веществе. Максимальный пробег β -частиц.
5. Способы защиты от внешнего β -излучения.
6. Активность, объемная и удельная активность. Единицы измерения.
7. Принцип действия β -радиометра.
8. Методика приготовления проб для измерения β -излучения.

Список литературы

1. Мухин К.Н. Экспериментальная ядерная физика: в 3 т. Санкт-Пб, М., Лань, 2008. – Т.1: Физика атомного ядра -2008. -383 с.
2. Кужир П.Г., Сатиков И.А., Трофименко Е.Е. Радиационная безопасность: Учебное пособие – Минск: НПООО «Пион», 1999. – 279 с.
3. Защита от ионизирующих излучений: в 2 т./ под ред. Н.Г. Гусева – М., Энергоатомиздат, 1989. – Т.1: Физические основы защиты от излучений – 1989. – 509 с.