

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

Национальный исследовательский Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского

БИОФИЗИКА. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ.
РАЗДЕЛ «РАДИАЦИОННАЯ БИОФИЗИКА»

Учебно-методическое пособие

Рекомендовано методической комиссией Института биологии и биомедицины
для студентов ННГУ, обучающихся по направлению подготовки
06.03.01 «Биология»

Нижегород
2021

УДК 577.34
ББК 28.071
Ш57

Ш57 Н.Ю. Шилягина, А.В. Масленникова, Л.М. Юдина, С.А. Мысягин, О.Н. Шерстнева, С.С. Сороко, Т.А. Здобнова, В.А. Воденеев **БИОФИЗИКА. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ. РАЗДЕЛ «РАДИАЦИОННАЯ БИОФИЗИКА»**: Учебно-методическое пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2021. – 50 с.

Рецензент: к.х.н. **Буланов Е.Н.**

В настоящем пособии представлены краткие теоретические основы отдельных разделов радиационной биофизики и дано описание лабораторных работ, посвященных устройству и принципу работы счетчика Гейгера–Мюллера, исследованию условий, влияющих на скорость счета радиоактивных препаратов, анализу статических ошибок радиометрических измерений.

Учебно-методическое пособие составлено в соответствии с учебными планами дисциплины «Биофизика» и предназначено для бакалавров 3 курса ННГУ, обучающихся по направлению 06.03.01 «Биология».

Ответственный за выпуск
председатель методической комиссии Института биологии и биомедицины
ННГУ, к.б.н. **Е.Л. Воденеева**

УДК 577.34
ББК 28.071

© **Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2021**

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	5
ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	15
Лабораторная работа №1 Устройство и принцип работы счетчика Гейгера– Мюллера.....	15
<i>Задание 1</i>	19
<i>Задание 2</i>	20
<i>Задание 3</i>	22
Лабораторная работа №2. Изучение условий, влияющих на скорость счета радиоактивных препаратов	24
<i>Задание 1</i>	27
<i>Задание 2</i>	27
<i>Задание 3</i>	28
<i>Задание 4</i>	29
<i>Задание 5</i>	30
Лабораторная работа №3 Статистические ошибки измерений.....	32
<i>Задание 1.</i>	36
<i>Задание 2</i>	39
ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ	45
ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ	46
ЛИТЕРАТУРА	48

ВВЕДЕНИЕ

Биофизика — междисциплинарная область науки, изучающая физические процессы, протекающие в биологических системах разного уровня организации и рассматривающая влияние различных физических факторов на биологические объекты. В целом биофизика призвана выявлять связи между физическими механизмами, лежащими в основе организации живых объектов, и биологическими особенностями их жизнедеятельности, а также разрабатывать физические подходы для исследования биологических систем.

Выдающийся советский биофизик Глеб Михайлович Франк (1904–1976) сказал: «Биофизика не имеет присущего только ей объекта или предмета исследования, как, например, микробиология (наука, изучающая микроорганизмы) или энтомология (раздел зоологии, изучающий насекомых). Эта наука скорее характерна только ей присущим физическим подходом к изучению широкого круга жизненных явлений». Действительно, объекты биофизики весьма разнообразны — от биомакромолекул до микроорганизмов, представителей растительного и животного царства и их популяций.

Классификация, принятая Международным союзом теоретической и прикладной биофизики (1961), которая отражает основные биологические объекты в области биофизических исследований, включает следующие разделы:

- молекулярная биофизика — исследование физических и физико-химических свойств макромолекул и молекулярных комплексов;
- биофизика клетки — изучение физико-химических основ процессов, протекающих в отдельных клеточных системах, в том числе формирование электрических потенциалов, механизмов транспортных процессов, закономерности взаимодействия лигандов с клеточными рецепторами;
- биофизика сложных систем, к которым относят отдельные органеллы, целые организмы и популяции;
- биофизика процессов управления и регуляции — изучение и моделирование принципов управления в биологических системах.

В настоящем учебно-методическом пособии особое внимание уделено радиометрическим методам исследования. Это связано с широким использованием данных методов в различных областях биологии и медицины, высокой информативностью методов и возможностью их применения для проведения качественного и количественного анализа.

Учебно-методическое пособие служит дополнением к теоретическим материалам по курсу «Биофизика» и будет полезно для слушателей биологических и биомедицинских специальностей.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Ионизирующее излучение (ИИ) — это излучение, которое образуется при радиоактивном распаде, ядерных превращениях, торможении заряженных частиц в веществе и при взаимодействии со средой создает ионы различных знаков.

Радиоактивность и сопутствующее ей ИИ существовали задолго до зарождения жизни на Земле. С того времени радиация постоянно наполняет космическое пространство, а радиоактивные материалы вошли в состав Земли. Даже сам человек немного радиоактивен, так как в любой живой ткани присутствуют в следовых количествах радиоактивные вещества.

Совокупность космического излучения, излучения от естественных радионуклидов, рассеянных в атмосфере, литосфере, гидросфере и находящихся в составе биологических организмов, составляет *природный*, или *естественный радиационный фон*.

ИИ и радиоактивные вещества, образующиеся в результате ядерных взрывов, деятельности атомных электростанций, извлечения полезных ископаемых из недр Земли, попадающие в окружающую среду в результате их применения в медицине, науке и различных отраслях хозяйственной деятельности человека формируют *искусственный радиационный фон*, который в настоящее время в целом по земному шару добавляет к естественному радиационному фону лишь 1–3%.

СТРОЕНИЕ АТОМА. ПОНЯТИЕ РАДИОАКТИВНОСТИ

Атом — мельчайшая частица химического элемента, сохраняющая его свойства. Атом состоит из положительно заряженного ядра и отрицательно заряженных *электронов* (e^- , масса 0,000548 а.е.м. или $9,1 \times 10^{-28}$ г), движущихся в кулоновском поле ядра по законам квантовой механики в виде электронного облака по электронным орбиталям. Ядро атома состоит из положительно заряженных *протонов* (p , масса 1,00758 а.е.м. или $1,67 \times 10^{-24}$ г) и не имеющих заряда *нейтронов* (n , масса 1,00866 а.е.м. или $1,67 \times 10^{-24}$ г). Атом в целом электронейтрален. Протоны и нейтроны, составляющие атомное ядро, называют *нуклонами* (от латинского *nucleus* — ядро).

Число протонов в ядре атома называют *протонным*, или *зарядовым числом* (Z), а число нейтронов — *нейтронным числом* (N). Зарядовое число соответствует порядковому номеру химического элемента в Периодической системе Д.И. Менделеева. Суммарное количество протонов и нейтронов ($Z+N$) в ядре атома называют *атомным*, или *массовым числом* (A).

Изотопы — это атомы одного и того же химического элемента, имеющие в своих ядрах одинаковое количество протонов, но отличающиеся массовыми числами из-за разного количества нейтронов в ядрах. Изотопы принято обозначать A_ZX , где X — химический элемент, A — массовое число, Z — зарядовое число. Пример — изотопы водорода: ${}^1_1\text{H}$ (протий — $1p$), ${}^2_1\text{H}$ (дейтерий — $1p1n$), ${}^3_1\text{H}$ (третий — $1p2n$).

Нуклид — это совокупность атомов с определенным количеством протонов и нейтронов в ядре.

В природе, наряду с устойчивыми (стабильными) нуклидами, существуют и неустойчивые радиоактивные нуклиды (радионуклиды). Ядра неустойчивых радионуклидов самопроизвольно распадаются. Неустойчивым атомное ядро делает избыток протонов или нейтронов. Такие атомные ядра обладают избыточной энергией и стремятся перейти в более устойчивое состояние с меньшей энергией.

Радиоактивность — спонтанный процесс превращения атомных ядер одних химических элементов в ядра других химических элементов с выделением энергии в виде электромагнитного излучения (гамма- и рентгеновское излучение) и корпускулярного излучения (альфа-, бета-, нейтронное, позитронное излучение).

Радиоактивное излучение, обусловленное природными радионуклидами, в которых распад происходит самопроизвольно, то есть без внешнего воздействия, называют *естественной радиоактивностью*; радиоактивность веществ, возникающую под действием облучения их ИИ (альфа- или нейтронным излучением) — *искусственной, или наведенной, радиоактивностью*.

Радиоактивными являются все химические элементы, расположенные в Периодической системе элементов Д.И. Менделеева после висмута (*Bi*, порядковый номер 83). Остальные химические элементы имеют как стабильные, так и радиоактивные изотопы. Превращение нестабильного ядра в устойчивое ядро может осуществляться в результате одного или нескольких последовательных радиоактивных распадов.

ЕДИНИЦЫ РАДИОАКТИВНОСТИ. ЗАКОН РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА

Скорость ядерных превращений характеризуется *активностью* (*A*) — числом ядерных превращений в единицу времени. В Международной системе единиц (СИ) за единицу активности радионуклидов принят беккерель [Бк], 1 Бк соответствует одному ядерному превращению в 1 секунду: 1 Бк = 1 расп./с. внесистемная единица активности радионуклидов — *кюри* [Ки]. 1 Ки = $3,7 \times 10^{10}$ Бк. Эта величина соответствует активности 1 г радия. Активность радионуклида можно выразить следующей формулой:

$$A = -dN/dt = \lambda \times N, \text{ где} \quad (1)$$

A — активность радионуклида;

dN — число ядер, распавшихся за промежуток времени *dt*;

λ — коэффициент пропорциональности, характеризующий вероятность распада ядра, или постоянная распада;

N — полное количество ядер радионуклида в текущий момент времени.

Удельная активность — это активность вещества в расчете на единицу его массы, а *объемная активность* — на единицу объема вещества. Удельную активность (A_m , [Бк/кг], [Бк/г]) обычно применяют при оценке содержания радионуклидов в твердых веществах, а объемную (A_v , [Бк/м³], [Бк/л]) — при оценке содержания радионуклидов в жидких и газообразных веществах (вода, воздух и т.п.).

Радиоактивный распад — это статистическое явление. Для большой совокупности ядер можно получить статистический закон, выражающий зависимость числа нераспавшихся ядер от времени — *закон радиоактивного распада*:

$$N_t = N_0 \times e^{-\lambda \times t}, \text{ где} \quad (2)$$

N_t — число радиоактивных ядер в момент времени t ;

N_0 — первоначальное число радиоактивных ядер;

λ — коэффициент пропорциональности, характеризующий вероятность распада ядра, или постоянная распада.

Другая важная характеристика процесса распада ядра — *период полураспада радионуклида* ($T_{1/2}$) — промежуток времени, за который количество ядер уменьшится вдвое. Период полураспада — постоянная величина, не зависящая от числа радиоактивных атомов в образце. Продолжительность периода полураспада для различных радионуклидов может составлять от миллионных долей секунды до нескольких миллиардов лет. С постоянной распада период полураспада связан соотношением:

$$\lambda \times T_{1/2} = \ln 2 = 0,693;$$

или

$$T_{1/2} = 0,693 / \lambda. \quad (3)$$

Активность радионуклида A (I) можно выразить следующим образом:

$$A = \lambda \times N_0 = N_0 \times 0,693 / T_{1/2}.$$

Таким образом, активность радионуклида можно использовать в качестве количественной меры содержания его в веществе. Чем выше активность, тем больше ядерных превращений происходит в веществе в единицу времени и тем больше количество радионуклида в нем.

ТИПЫ ЯДЕРНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ. ВИДЫ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКА

Энергия излучений, испускаемых при ядерных превращениях, довольно велика. Этой энергии вполне достаточно для отрыва электрона с внешней орбиты от электрически нейтральных (незаряженных) атомов и молекул, попадающих на пути распространения излучения. Данный процесс, в результате которого образуется отрицательно заряженный электрон и положительно заряженный ион, называют ионизацией.

Минимальную энергию, необходимую для отрыва электрона от свободного атома в его низшем энергетическом состоянии, называют *энергией ионизации* (иногда используют термин «*потенциал ионизации*»). Для нейтральных атомов энергия ионизации изменяется от 3,9 эВ (Cs) до 24,6 эВ (He) (1эВ — энергия, приобретаемая электроном, проходящим в свободном пространстве разность потенциалов в 1 В. $1 \text{ эВ} = 1,60 \times 10^{-19} \text{ Дж}$). Для воды — основного компонента живых систем, энергия ионизации равна 12,6 эВ. Обычно это значение энергии и принимают как пороговое для деления излучения на ионизирующее и неионизирующее.

Излучения, сопровождающие процессы ядерных превращений, как правило, имеют энергию, существенно превышающую порог ионизации, вследствие чего их относят к *ионизирующим излучениям*.

ИИ подразделяют по их природе на *корпускулярные* (частицы, имеющие массу покоя, отличную от нуля) и *электромагнитные* (фотонные). Электромагнитные излучения — это гамма- и рентгеновское излучения. Все остальные виды ИИ имеют корпускулярную природу — α -частицы, β -частицы, нейтроны, нейтрино, антинейтрино, осколки деления ядер.

Альфа-частицы (α -частицы) — положительно заряженные ядра атомов гелия ${}^4_2\text{He}$, которые состоят из двух протонов и двух нейтронов. α -частицы испускаются при радиоактивном распаде изотопов тяжелых элементов ($Z > 82$). В результате альфа-распада заряд ядра уменьшается на 2 относительные единицы, а его масса — на 4 а.е.м. (рис. 1), то есть положение полученного в результате распада атома смещается в Периодической системе элементов Д.И. Менделеева на 2 позиции влево.

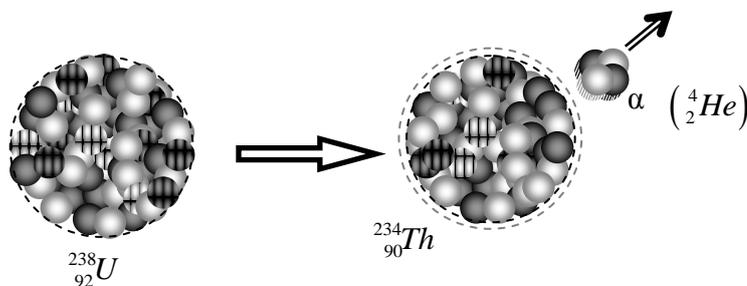


Рис. 1. Схема α -распада урана-238

Альфа-частицы, образующиеся при радиоактивном распаде, обладают энергией 2–14 МэВ и движутся со скоростью до 20 000 км/с; проникающая способность в воздухе для альфа-частиц — 2–10 см, в биологических тканях — несколько десятков микрометров. В воздухе на 1 см пути альфа-частица образует 100–250 тыс. пар ионов.

Бета-частицы (β -частицы) — электроны (отрицательный заряд) и позитроны (положительный заряд), испускаемые ядрами атомов при бета-распаде. Бета-частицы имеют массу 0,000548 а.е.м., энергию 0,02–14 МэВ и распространяются со скоростью, практически равной скорости света

(300 000 км/с). Проникающая способность бета-частиц в воздухе — до 25 м, а в биологических тканях — до 1 см; в воздухе на 1 см пробега одна бета-частица образует 50–100 пар ионов.

Бета-частицы образуются в результате бета-распада. Если в ядре имеется избышек нейтронов, то происходит *электронный бета-распад* (бета-минус распад, или β^-). При этом виде ядерных превращений один из нейтронов превращается в протон, а ядро испускает электрон и антинейтрино, и возникает ядро нового элемента при неизменном массовом числе (рис. 2). Вылет электронов сопровождается выбросом *антинейтрино* ($\bar{\nu}$) — элементарной частицы с массой менее 1/2000 массы покоя электрона, дочерний элемент сдвинут в Периодической системе элементов Д.И. Менделеева на одну позицию вправо.

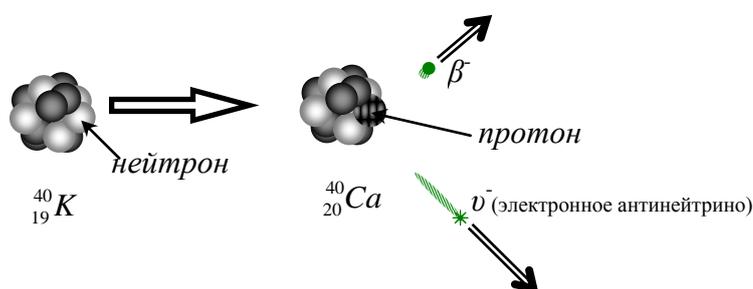


Рис. 2. Схема электронного бета-распада калия-40

При избышке протонов происходит *позитронный бета-распад* (бета-плюс распад, или β^+). Позитронный бета-распад сопровождается образованием нового элемента, расположенного в периодической таблице Д.И. Менделеева на одну позицию влево от материнского. При этом виде ядерных превращений один из протонов превращается в нейтрон, энергия выделяется также в виде элементарной частицы — в этом случае позитрона — и *нейтрино* (ν^+) (рис. 3).

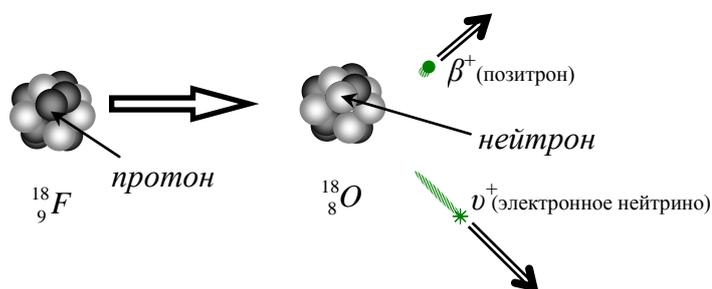


Рис. 3. Схема позитронного бета-распада фтора-18

Поскольку бета-частицы имеют заряд, при контакте с веществом они взаимодействуют с электрическими полями атомов, что приводит к замедлению самой частицы и излучению потерянной энергии в виде электромагнитного излучения. Если энергия бета-частиц выше 50 кэВ, а

поглощающий материал характеризуется высокой плотностью, то возникающее электромагнитное излучение оказывается также высокоэнергетичным и обладает способностью к ионизации атомов. Этот процесс называют *радиационным торможением*, а возникающее электромагнитное излучение — *тормозным излучением*. В результате радиационного торможения бета-частицы теряют значительное количество энергии.

Гамма-излучение (γ -кванты, γ -лучи) — коротковолновое электромагнитное излучение ($\lambda < 0,2$ нм), распространяющееся прямолинейно со скоростью света; его энергия составляет 0,01–3 МэВ. Гамма-кванты испускаются при альфа- и бета-распадах ядер природных и искусственных радионуклидов, если ядро оказывается в возбужденном состоянии. Фотоны гамма-излучения лишены массы покоя и не имеют заряда, поэтому проникающая способность гамма-излучения в воздухе составляет 150 м, в биологических тканях — десятки сантиметров.

Рентгеновское излучение — коротковолновое электромагнитное излучение ($\lambda = 10^{-5}$ –100 нм), возникающее при торможении электронов в электрическом поле ядер атомов (тормозное рентгеновское излучение) или при перестройке электронных оболочек атомов при ионизации и возбуждении атомов и молекул (характеристическое рентгеновское излучение).

Четкой границы между гамма-излучением и рентгеновским излучением нет. Энергия фотонов гамма-излучения обычно больше, чем энергия фотонов рентгеновского излучения. Однако в переходной области от одного вида излучения к другому энергия фотонов рентгеновского излучения может оказаться выше энергии фотонов гамма-излучения. Отличаются эти виды излучения, преимущественно, способом получения.

Все виды ИИ прямо или косвенно вызывают ионизацию или возбуждение атомов вещества, поэтому возникающие первичные изменения качественно не зависят от вида излучения. Однако при облучении в равных дозах (то есть при одном и том же количестве поглощенной единицей массы вещества энергии) возникают количественно разные биологические эффекты, что связано с различной проникающей ИИ и связанной с ней величиной линейной передачи энергии.

Проникающая способность — одно из наиболее важных свойств ИИ. Она зависит, с одной стороны, от состава и плотности облучаемого объекта, а с другой — от природы и свойств излучения.

За меру проникающей способности для ускоренных заряженных частиц принимают расстояние, на котором частица замедляется до энергии, близкой к средней энергии теплового движения. Для квантов рентгеновского и гамма-излучения за меру проникающей способности принимают расстояние, на

котором мощность излучения падает в e раз (где $e \sim 2,72$ — основание натурального логарифма).

Характеристика, связанная с проникающей способностью ИИ, — величина *линейной передачи энергии (ЛПЭ)* — количество энергии, передаваемой ИИ на единицу длины пути. В зависимости от величины ЛПЭ все ИИ делят на *редко- и плотноионизирующие*. К редкоионизирующим относят все виды излучения, имеющие ЛПЭ менее 10 кэВ/мкм. Это, в основном, электроны, а также гамма- и рентгеновское излучение. К плотноионизирующим (ЛПЭ >10 кэВ/мкм) относят протоны, α -частицы и другие тяжелые частицы, а также нейтроны, биологическое действие которых реализуется за счет вторичных ускоренных заряженных частиц. Редкоионизирующие виды излучений отличаются сравнительно высокой проникающей способностью, а плотноионизирующие (за исключением нейтронов) проникают в ткани на небольшую глубину. Так, альфа-частицы обладают очень низкой проникающей способностью. Даже в воздухе их пробег равен нескольким сантиметрам, а более плотные вещества (например, ткань или бумага) непроницаемы для альфа-частиц при толщине в доли миллиметра. Поток альфа-частиц, падающий на тело человека, из-за малой проникающей способности целиком поглощается в верхних слоях кожи. Вследствие этого альфа-излучение при внешнем радиационном воздействии совершенно безопасно для человека. Однако, если альфа-активный изотоп попадет с пищей, водой или воздухом внутрь организма, то опасность будет весьма велика, так как испускаемые изотопом внутри тканей альфа-частицы вызовут очень сильную ионизацию атомов и молекул, а, следовательно, и сильное повреждение биологических субстратов, которые непосредственно поглощают энергию.

Проникающая способность бета-частиц примерно в сто раз больше, чем таковая альфа-частиц (рис. 4). В воздухе бета-частицы проходят несколько метров, в твердых средах — несколько миллиметров. В связи с этим бета-частицы представляют определенную опасность для жизни и здоровья людей не только при попадании внутрь организма, но и при аппликации на кожные покровы и слизистые оболочки (поскольку в результате могут развиваться серьезные местные лучевые поражения).

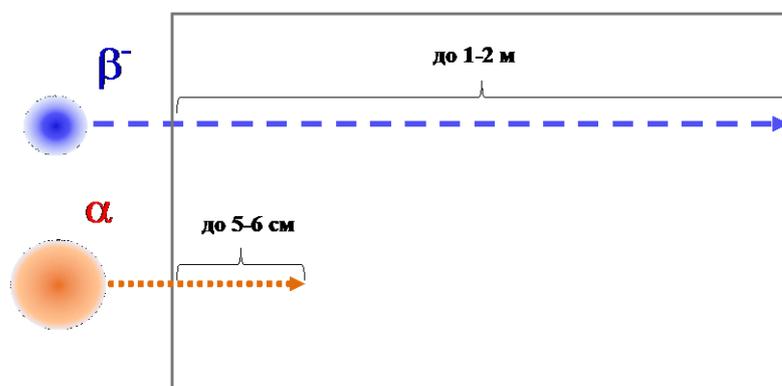


Рис. 4. Пробег альфа- и бета-частиц энергией 7 МэВ в воздухе

Проникающая способность рентгеновских лучей и гамма-квантов очень велика. Они глубоко проникают даже в плотные среды, а тело человека «пронизывают» насквозь. Например, гамма-кванты с высокой энергией могут проходить через слой земли или бетона толщиной в несколько метров. Весьма велика проникающая способность, сравнимая с проникающей способностью гамма-лучей, у нейтронов. ИИ, обладающие большой проникающей способностью, представляют опасность в большей степени при внешнем облучении, а альфа- и бета-излучения — при непосредственном воздействии на ткани организма при попадании внутрь с вдыхаемым воздухом, водой, пищей.

ДОЗИМЕТРИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Степень радиационного поражения биологических объектов определяется дозой облучения.

Экспозиционная доза излучения (X) — это количественная характеристика ионизирующей способности рентгеновского или гамма-излучения в воздухе, измеренная по количеству образованных зарядов (пар ионов) в воздухе.

$$X = dQ/dm, \text{ где} \quad (4)$$

dQ — полный заряд ионов одного знака, возникающих в сухом воздухе при торможении всех вторичных электронов, образованных фотонами в малом объеме воздуха;

dm — масса воздуха в этом объеме.

В единицах СИ экспозиционную дозу выражают в *кулонах на килограмм воздуха* — Кл/кг. Внесистемная единица — *рентген* [Р].

$$1 \text{ Р} = 2,58 \times 10^{-4} \text{ Кл/кг}$$

$$1 \text{ Кл/кг} = 3876 \text{ Р}$$

Поглощенная доза излучения (D) — это величина энергии ИИ, переданная веществу.

$$D = dE/dm, \text{ где} \quad (5)$$

dE — энергия, переданная ионизирующим излучением веществу, находящемуся в элементарном объеме;

dm — масса вещества в этом объеме.

В единицах СИ поглощенную дозу выражают в *греях* [Гр]. 1 Гр — это поглощенная доза ИИ любого вида, при которой на 1 кг массы вещества поглощается 1 Дж энергии излучения. Внесистемная единица — *рад* (от англ. rad — radiation absorbed dose).

$$1 \text{ рад} = 1 \times 10^{-2} \text{ Гр}$$

$$1 \text{ Гр} = 100 \text{ рад}$$

Одинаковые поглощенные дозы различных видов ИИ оказывают на организм разное действие, обусловленное разной плотностью ионизации —

удельной ионизацией. Чем выше удельная ионизация, тем больше эффект биологического действия облучения. Именно поэтому одна и та же поглощенная доза различных видов ИИ приводит к разной степени поражения организма. В связи с этим в радиобиологии введено понятие «относительная биологическая эффективность», или «коэффициент качества», или «взвешивающий коэффициент ИИ» (W_R) (табл. 1).

Таблица 1

Значение взвешивающих коэффициентов W_R для отдельных видов ионизирующих излучения

Ионизирующие излучения	W_R
Фотоны любых энергий	1
Электроны и мюоны любых энергий	1
Нейтроны с энергией:	
менее 10 кэВ	5
от 10 до 100 кэВ	10
от 100 кэВ до 2 МэВ	20
от 2 МэВ до 20 МэВ	10
более 20 МэВ	5
Протоны с энергией более 2 МэВ, кроме протонов отдачи	5
Альфа-частицы, осколки деления, тяжелые ядра	20

Эквивалентная доза (H) — это поглощенная доза в органе или ткани, умноженная на соответствующий взвешивающий коэффициент для данного вида излучения.

$$H = D \times W_R, \text{ где} \quad (6)$$

D — поглощенная доза в органе или ткани,

W_R — взвешивающий коэффициент для излучения типа R (тип ткани в этом случае не учитывают).

В СИ эквивалентную дозу выражают в *зивертах* [$Зв$]. Как и для поглощенной дозы его эквивалент — 1 Дж/кг. внесистемная единица — *бэр* (*биологический эквивалент рада*).

$$1 \text{ Зв} = 100 \text{ бэр}$$

Различные органы и ткани имеют разную чувствительность к воздействию ИИ, поэтому дозы облучения отдельных элементов живых систем также следует рассчитывать с учетом еще одного взвешивающего коэффициента — W_T , характеризующего их радиочувствительность (табл. 2).

Таблица 2

Значения взвешивающего коэффициента W_T для разных органов и тканей

Органы и ткани	W_T	Органы и ткани	W_T
Гонады	0,20	Печень	0,05
Красный костный мозг	0,12	Пищевод	0,05
Тонкая кишка	0,12	Щитовидная железа	0,05
Легкие	0,12	Кожа	0,01
Желудок	0,12	Клетки костных поверхностей	0,01
Мочевой пузырь	0,05	Остальное*	0,05
Молочная железа	0,05	Всё тело	1

* При расчетах учитывать, что «Остальное» включает надпочечники, головной мозг, экстраторакальный отдел органов дыхания, тонкий кишечник, почки, мышечную ткань, поджелудочную железу, селезенку, вилочковую железу и матку. В тех исключительных случаях, когда один из перечисленных органов или тканей получает эквивалентную дозу, превышающую самую большую дозу, полученную любым из двенадцати органов или тканей, для которых определены взвешивающие коэффициенты, следует приписать этому органу или ткани взвешивающий коэффициент, равный 0,025, а оставшимся органам или тканям из рубрики «Остальное» приписать суммарный коэффициент, равный 0,025.

Эффективная эквивалентная доза (E) — это величина, используемая как мера риска возникновения отдельных последствий облучения всего тела человека и отдельных его органов и тканей с учетом их радиочувствительности. Её рассчитывают, как сумму произведений эквивалентной дозы в органах и тканях на соответствующие взвешивающие коэффициенты:

$$E = \sum H_T \times W_T, \text{ где} \quad (7)$$

H_T — эквивалентная доза в органе или ткани T ,

W_T — взвешивающий коэффициент для органа или ткани T .

Эффективную эквивалентную дозу измеряют так же, как и эквивалентную — в *зивертах* и *бэрах*.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Лабораторная работа №1. Устройство и принцип работы счетчика Гейгера–Мюллера

На сегодняшний день существует три основные группы приборов для регистрации и измерения ИИ: *радиометры, дозиметры и спектрометры.*

Радиометры — это приборы для измерения плотности потоков ИИ, активности радиоактивных веществ, концентрации радионуклидов в различных средах и уровней радиоактивного загрязнения поверхностей.

Дозиметры — это приборы для измерения экспозиционной дозы (*R, рентген*), поглощенной дозы (*Гр, грей*) и эквивалентной или эффективной дозы (*Зв, зиверт*), а также для измерения мощности перечисленных величин (*R/ч, Гр/ч, Зв/ч*).

Спектрометры — это приборы, которые измеряют энергетический спектр излучения (распределение гамма-квантов, альфа- или бета-частиц по энергиям) и позволяют установить радионуклидный состав пробы и содержание (активность) радионуклида в источнике.

Важнейшая часть этих приборов — *детектор* — устройство для регистрации ИИ, в котором энергия ИИ преобразуется в электрическую или другие виды энергии, что позволяет регистрировать это излучение.

Основные типы детекторов: *газоразрядные, полупроводниковые и сцинтилляционные.*

Работа *газоразрядных (ионизационных) детекторов* основана на ионизации рабочего вещества (газа) излучением.

Полупроводниковые детекторы также относят к ионизационным. По принципу действия они подобны ионизационным камерам, но вместо газа в качестве рабочего вещества в них используют полупроводниковые материалы.

Работа *сцинтилляционных детекторов* основана на регистрации вспышек люминесценции, возникающих в некоторых кристаллах (например, NaI или CsI), органических жидкостях или пластмассах при попадании в них заряженных частиц или гамма-квантов. Вспышки в кристалле фиксируются фотокатодом и в цепи возникает импульс электрического тока.

Счетчик Гейгера–Мюллера — один из наиболее распространенных газоразрядных детекторов ИИ, используемый в большинстве бытовых и профессиональных приборов дозиметрического контроля. Счетчик был изобретен в 1908 году немецким физиком Хансом Вильгельмом Гейгером и английским физиком Эрнестом Резерфордом, а в 1913 году усовершенствован немецким физиком Вальтером Мюллером.

Счетчик Гейгера–Мюллера предназначен для регистрации заряженных частиц. Его также можно использовать для детекции нейтронов, рентгеновских и гамма-квантов по вторичным заряженным частицам, генерируемым ими.

Конструкции газоразрядных счетчиков довольно разнообразны. Счетчики широкого применения, выпускаемые серийно, бывают двух основных типов: *цилиндрические и торцевые*. В цилиндрический счетчик частица попадает через его стенку, которая имеет определенную толщину. В торцевом счетчике в торце (доньшке) имеется окно для входа частиц, закрытое тонкой слюдяной, металлической или органической (лавсановой) пленкой. Торцевые счетчики используют для регистрации α -излучения и β -излучения малых энергий. Реже применяют так называемые проточные счетчики, в которых радиоактивный излучатель помещают в рабочий объем счетчика, после чего последний заполняют газом или продувают равномерным потоком газа. Один из недостатков газоразрядных детекторов — низкая эффективность регистрации гамма-излучения. В силу высокой проникающей способности большая часть гамма-квантов покидает рабочий объем детектора, так и не вызвав ионизации молекул газа.

Принцип работы счетчиков Гейгера–Мюллера основан на эффекте ударной ионизации газовой среды под действием радиоактивных частиц или квантов электромагнитных колебаний в межэлектродном пространстве при высоком ускоряющем напряжении (рис. 5).

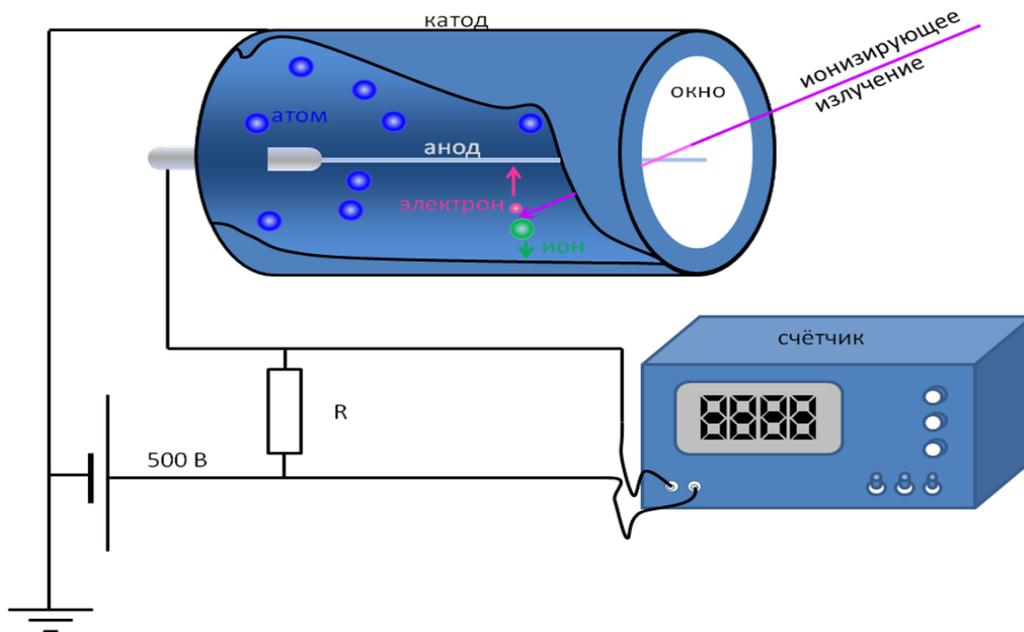


Рис. 5. Принцип работы счетчика Гейгера–Мюллера

Счетчик Гейгера–Мюллера — герметичный баллон (трубка), заполненный газовой смесью из аргона и спирта с добавкой галогенидов. По оси трубки натянута вольфрамовая или молибденовая нить, служащая в качестве анода (+). Катодом (–) служит внутреннее металлическое покрытие баллона. Внутреннее пространство счетчика заполнено инертным газом, обычно аргоном. Давление газа внутри счетчика — 100–200 мм рт.ст. К электродам прикладывается напряжение порядка нескольких сотен вольт. При попадании в счетчик ионизирующей частицы происходит ионизация

аргона. Положительно заряженные ионы аргона устремляются к катоду, а электроны — к аноду. Двигаясь к аноду, электроны постепенно увеличивают свою энергию. В зоне, близко прилегающей к аноду, где напряженность поля очень велика, электроны приобретают способность ионизировать атомы аргона при столкновении с ними — это вторичная ионизация (в отличие от ионизации, обусловленной первоначально влетевшей в счетчик частицей). В результате вторичной ионизации возникает большое количество электронов, которые, в свою очередь, приобретают способность вызывать вторичную ионизацию и т.д. Таким образом, число электронов, летящих к аноду, лавинообразно возрастает, и в счетчике возникает разряд, который регистрируется счетной установкой. Однако при этом разряд может длиться непрерывно. Положительно заряженные ионы аргона, двигаясь к катоду, приобретают большую скорость, и, ударяясь о металлический катод, выбивают из него большее число электронов, чем необходимо для нейтрализации положительных ионов. Оказавшись свободными, электроны направляются к аноду, вызывая вторичную ионизацию. Кроме того, некоторые атомы аргона при столкновении с ядерными частицами приходят в возбужденное состояние и при возвращении к прежнему энергетическому состоянию испускают ультрафиолетовое излучение, которое, достигая металлического катода, также выбивает из него электроны.

Таким образом, ионизация, раз начавшись при попадании в объем счетчика одной частицы, продолжается со всё большей интенсивностью. Именно поэтому для нормальной работы счетчика необходимо погасить разряд. Для гашения разряда применяют метод, основанный на добавлении в трубку многоатомных спиртов. Смесь обычно состоит из 90% аргона и 10% паров спирта. Молекулы спирта имеют слабо связанный электрон, который легко отходит от молекулы и присоединяется к положительно заряженному иону аргона. К катоду вместо легких ионов аргона движутся тяжелые ионы спирта. При этом они не приобретают больших ускорений и, дойдя до катода, нейтрализуются на нём, не выбивая при этом из металлической стенки трубки больше электронов, чем это нужно для нейтрализации. Кроме того, молекулы спирта поглощают ультрафиолетовое излучение, которое в следствие этого не достигает металлических стенок счетчика и не выбивает из них электроны. Таким образом прекращается вторичная ионизация, и трубка снова готова к работе.

Цель работы: изучить устройство и принцип работы счетчика Гейгера–Мюллера на примере радиометра МКС/СРП–08А.

Экспериментальная часть

Оборудование и материалы: радиометр МКС/СРП-08А, блок детектирования БДПС-25-01А (гамма-излучение), блок детектирования БДПС-02А (альфа-, бета-излучение), зарядное устройство ЗУ-1; контрольный источник Cs-137, паспорт на прибор, руководство по

эксплуатации, свидетельство о поверке, паспорт на контрольный источник.

Дозиметр-радиометр источников фотонного, электронного и альфа-излучений МКС/СРП-08А (рис.6) поисковый предназначен для:

– измерения мощности амбиентного эквивалента $H^*(10)$ дозы фотонного излучения (МАЭД). Амбиентный эквивалент дозы (англ. *ambient «окружающий»*) используется для характеристики поля излучения в точке, совпадающей с центром шарового фантома. Международная комиссия по радиационным единицам и измерениям (МКРЕ) дает определение амбиентного эквивалента дозы, как эквивалента дозы, который создается в некоторой точке в поле излучения соответственно достроенным и распространённым полем в стандартном шаре МКРЕ на глубине d по радиусу, имеющему направление, противоположное направлению распространения поля; символ $H(d)$. Для сильно проникающего излучения рекомендована величина $d=10$ мм. Единица измерения амбиентного эквивалента дозы — зиверт;

- измерения плотности потока электронного излучения;
- измерения плотности потока альфа-излучения.



Рис. 6. Внешний вид поискового дозиметра-радиометра МКС/СРП-08А.

- 1 — Электронный блок управления.
- 2 — Блок детектирования альфа- и бета-излучения БДПС-02А.
- 3 — Блок детектирования гамма-излучения БДБС-25-01А.
- 4 — Штанга телескопическая с креплением электронного блока к штанге

Дозиметр-радиометр МКС/СРП-08А с автономным источником питания (аккумуляторный блок питания) позволяет проводить замеры в полевых условиях при отсутствии сетевого электропитания, в мобильных лабораториях, а также (при использовании дополнительного оборудования — телескопической штанги) в труднодоступных местах — в узких пространствах и на высоте, превышающей рост человека на 1,5 м.

Дозиметр-радиометр применяют в полевых и лабораторных условиях на предприятиях Минатома, Госсанэпиднадзора, МЧС, природоохранных предприятий различных ведомств и др.

Принцип действия дозиметра-радиометра основан на преобразовании энергии квантов фотонного, электронного и альфа-излучений в электрические импульсы, которые с помощью амплитудно-цифрового преобразователя (АЦП) преобразуются в цифровой сигнал, проходящий дальнейшую обработку в микропроцессорном блоке устройства обработки и отображения информации с выводом результатов обработки на жидкокристаллический дисплей.

В состав дозиметра-радиометра входят три основных блока: электронный блок управления и два сменных блока детектирования — БДБС-25-01А и БДПС-02А.

Электронный блок управления состоит из микропроцессорного устройства для управления работой дозиметра-радиометра и индикации параметров, аккумуляторного блока питания, панели управления и корпуса. Панель управления дозиметра-радиометра расположена на верхней поверхности корпуса и включает табло индикации режимов работы и величин контролируемых параметров, а также клавиши управления дозиметром-радиометром.

Корпус дозиметра-радиометра выполнен из полистирола. На задней стенке корпуса находится переключатель для включения/выключения питания дозиметра-радиометра, а также разъем для подключения соединительного кабеля между электронным блоком и блоком детектирования, либо блока питания для зарядки аккумуляторного блока дозиметра-радиометра. На правой боковой поверхности корпуса находится аудиогнездо для подключения наушников; на нижней поверхности корпуса — кольцо-зажим для крепления электронного блока на блоках детектирования или на телескопической штанге.

В дозиметре-радиометре используется два блока детектирования:

– сцинтилляционный блок детектирования БДБС-25-01А, в состав которого входит фотоумножитель ФЭУ-85 с кристаллом CsJ(Tl) размером (25×25) мм;

– газоразрядный блок детектирования БДПС-02А — счетчик Гейгера–Мюллера. Для отдельного измерения плотности потока электронного и альфа-излучений используют три типа защит, которые крепятся на входное окно блока детектирования.

Задание 1

Проверка правильности функционирования дозиметра-радиометра МКС/СРП-08А с блоком детектирования БДБС-25-01А (модификация для измерения МАЭД)

1. Подключить к электронному блоку блок детектирования БДБС-25-01А.

2. Включить питание прибора с помощью переключателя на задней стенке корпуса электронного блока. При включении прибора по умолчанию устанавливается режим измерения МАЭД. При этом на табло появится сообщение, показанное на рис. 7.

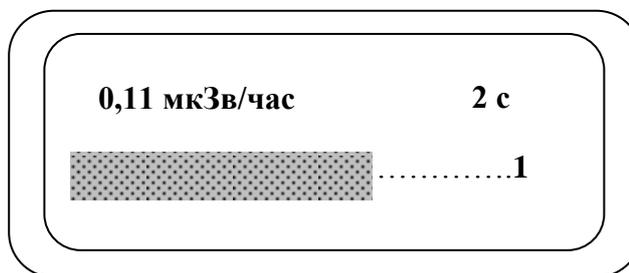


Рис.7. Табло электронного блока дозиметра-радиометра МКС/СРП-08 А при подключении к нему блока детектирования БДБС-25-01А

3. Убрать контрольный источник на расстояние не менее 2 м от блока детектирования БДБС-25-01А. Провести пять измерений МАЭД фона, вычислить среднее арифметическое МАЭД фона $H^*(10)_ф$.
4. Блок детектирования БДБС-25-01А установить вертикально на контрольный источник Cs-137, входящий в комплект поставки прибора. К детектору должна быть обращена сторона источника с надписью «Гамма контрольный источник Cs-137».
5. Провести не менее пяти измерений МАЭД контрольного источника. Вычислить среднее арифметическое значение МАЭД контрольного источника и записать как $H^*(10)_{изм}$.
6. Определить действительное значение МАЭД контрольного источника $H^*(10)_{к.и.}$ по формуле:

$$H^*(10)_{к.и.} = H^*(10)_{изм} - H^*(10)_ф$$

Если действительное значение МАЭД в пределах $\pm 15\%$ совпадает со значением МАЭД контрольного источника, указанным на оборотной стороне в свидетельстве о поверке, то прибор готов к работе.

Задание 2

Проверка правильности функционирования дозиметра-радиометра МКС/СРП-08А с блоком детектирования БДБС-25-01А (модификация для измерения скорости счёта)

1. Подключить к электронному блоку блок детектирования БДБС-25-01А.

2. Включить питание прибора с помощью переключателя на задней стенке корпуса электронного блока. Через 20 с после включения прибора перейти с помощью долгого удерживания клавиши [+] в режим поиска и сравнения источников фотонного ионизирующего излучения.
3. Убрать контрольный источник на расстояние не менее 2 м от блока детектирования БДБС-25-01А. Нажать однократно клавишу [М] для запуска измерения скорости счёта фона. На табло появится сообщение вида, показанного на рисунке 8.

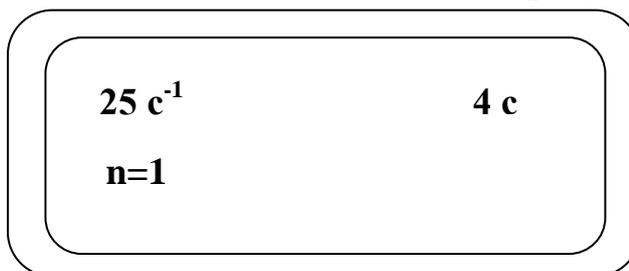


Рис.8. Табло электронного блока дозиметра-радиометра МКС/СРП-08 А при подключении к нему блока детектирования БДБС-25-01А в режиме измерения фотонного ионизирующего излучения

В первой строке отображается текущая скорость счёта и продолжительность цикла измерения (время интегрирования) – 4 секунды. Продолжительность цикла измерения при измерении фона не может быть изменена оператором. Во второй строке отображается число циклов измерений.

4. Провести не менее пяти измерений скорости счёта фона и вычислить среднее арифметическое полученных значений N_{ϕ} .
5. Блок детектирования БДБС-25-01А установить вертикально на контрольный источник Cs-137, входящий в комплект поставки прибора. К детектору должна быть обращена сторона источника с надписью «Гамма контрольный источник Cs-137». Нажать клавишу [М] для перехода в режим поиска и сравнения источников фотонного излучения по величине скорости счёта. На табло появится сообщение вида, показанного на рисунке 9.

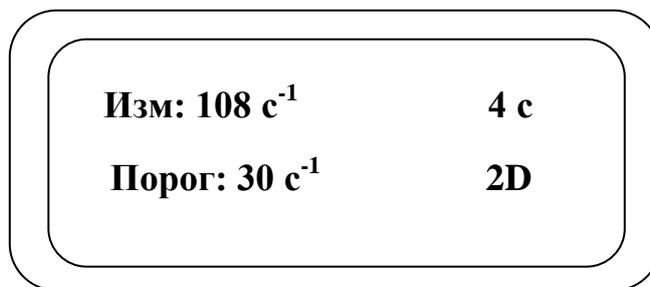


Рис.9. Табло электронного блока дозиметра-радиометра МКС/СРП-08 А при переходе в режим поиска и сравнения источников фотонного ионизирующего излучения по величине скорости счёта

Провести не менее пяти измерений скорости счета от контрольного источника, вычислить среднее арифметическое $N_{ИЗМ}$

6. Определить действительное значение скорости счета от контрольного источника N_K по формуле:

$$N_K = N_{ИЗМ} - N_{\Phi} \quad (8)$$

Если действительное значение скорости счета N_K в пределах $\pm 15\%$ совпадает со значением скорости счета от контрольного источника, указанным на оборотной стороне в свидетельстве о поверке, то прибор готов к работе.

Задание 3

Проверка правильности функционирования дозиметра-радиометра МКС/СРП-08А с блоком детектирования БДБС-25-02

1. Подключить к электронному блоку блок детектирования БДБС-02А.
2. Включить питание прибора, проверить уровень зарядки аккумулятора. На табло появится сообщение вида, показанного на рисунке 10.

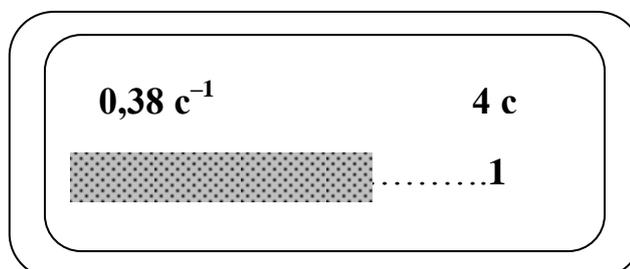


Рис.10. Табло электронного блока дозиметра-радиометра МКС/СРП-08 А при подключении к нему блока детектирования БДБС-02А

3. На входном окне блока детектирования закрепить фильтр.

4. Провести пять измерений фоновой скорости счета и вычислить среднее арифметическое полученных значений N_{ϕ} .
5. Блок детектирования БДБС-02А установить вертикально на контрольный источник Cs-137, входящий в комплект поставки прибора. К детектору должна быть обращена сторона источника с надписью «Бета контрольный источник Cs-137». Провести не менее пяти измерений скорости счёта от контрольного источника, вычислить среднее арифметическое $N_{ИЗМ}$.
7. Определить действительное значение скорости счета от контрольного источника N_K по формуле:

$$N_K = N_{ИЗМ} - N_{\phi} \quad (8)$$

Если действительное значение скорости счета N_K в пределах $\pm 15\%$ совпадает со значением скорости счета от контрольного источника, указанным на оборотной стороне в свидетельстве о поверке, то прибор готов к работе.

На основании проведенных измерений сделать выводы о правильности функционирования дозиметра-радиометра МКС/СРП-08А с блоками детектирования БДБС-25-01А и БДБС-25-02.

Лабораторная работа №2. Изучение условий, влияющих на скорость счета радиоактивных препаратов

При измерении радиоактивности нужно учитывать все обстоятельства, влияющие на скорость счета и уметь проводить определение активности препарата в наиболее выгодных условиях. Выяснение того, какие факторы могут влиять на скорость счета нужно еще и потому, что сравнение активности разных препаратов следует проводить в максимально тождественных условиях.

Массовые измерения активности осуществляют в основном относительными методами, сравнивая измеряемые источники с образцовыми (откалиброванными с высокой точностью радиоактивными растворами, жидкостями, газами, при создании которых используют методы абсолютных измерений активности). Относительный метод измерения активности заключается в сравнении скорости счета исследуемого препарата со скоростью счета стандартного препарата (эталоны), содержащего известное количество того же изотопа, или в сравнении между собой регистрируемой активности двух препаратов, содержащих одинаковые изотопы. Достоинство относительных измерений в их простоте. Если эталоном является препарат с известной абсолютной активностью, то от результата относительных измерений легко перейти к абсолютной активности исследуемого образца. Для правильного проведения измерений относительной активности исследуемых препаратов необходимо, чтобы форма и размеры препаратов (их площадь, толщина) были одинаковы. Препараты должны одинаково располагаться относительно счетчика. Радиоактивное вещество должно быть равномерно распределено по всему объему препаратов. Перед измерением препараты следует тщательно высушивать. Подложки, на которые нанесены измеряемые препараты, должны быть выполнены из одинакового материала и иметь равную толщину. Все измерения должны проводиться на одной установке с одним и тем же счетчиком и держателем для препаратов. Следует стремиться к тому, чтобы измерения всех образцов были выполнены с одинаковой статистической точностью. Для устранения ошибок, обусловленных различиями в толщине измеряемых препаратов α - и β -излучателей, пользуются либо бесконечно тонкими препаратами, либо препаратами, толщина которых превосходит толщину слоя насыщения. В качестве подложек используют тонкую органическую пленку, фильтровальную бумагу или слои вещества толщиной, соответствующей толщине слоя насыщения. Для снижения погрешности, вносимой неравномерным распределением радиоактивного вещества в объеме препарата, проводят несколько измерений, поворачивая препарат на 90 , 180 , 270° вокруг оси; полученные результаты усредняют. Если на практике не удастся осуществить совершенно одинаковые условия измерения, то при выполнении относительных измерений приходится учитывать ряд поправок.

В каждом случае число необходимых поправок стараются свести к минимуму. При сравнительных измерениях учитываются лишь поправки на разрешающее время счётной установки и фон, а при длительной работе – также и поправки на непостоянство воспроизводимости показаний прибора. Существенное достоинство относительных измерений заключается в их чрезвычайной простоте и высокой точности, если сравнение активности препаратов производится в строго тождественных условиях.

Вероятность регистрации излучения счетчиком зависит от того, в какую часть счетчика попадет излучение. Одинаковая вероятность регистрации излучения во всех частях счетчика предполагает, что нить и стенки счетчика совершенно однородны и что между нитью и корпусом существует одинаковое распределение электрического поля по всей длине счетчика. Однако на концах счетчика есть искажения поля, которые могут вызвать уменьшение чувствительности. Относительную чувствительность во всех частях счетчика можно легко определить сравнением скоростей счета, регистрируемых счетчиком при облучении его в разных точках радиоактивным препаратом.

Значение имеет и материал подложки. Сделать препарат совсем без подложки невозможно. Сделать подложку из неплотного материала, например, бумаги, не всегда удобно. Очевидно, надо учитывать, что обратное рассеяние будет тем больше, чем больше плотность материала подложки, чем толще (до известного предела) эта подложка и чем больше (также до известного предела) энергия β -частиц.

Важным является правильный выбор счетной трубки. Проникающая способность бета частиц напрямую связана с их энергией. Очевидно, что стенки алюминиевого счетчика, толщина которого равна 35 мг/см^2 , и слюдяное окошко (толщина 3 мг/см^2) в разной мере будут препятствовать попаданию частиц во внутренний объем счетчика.

Процессы регистрации частицы и возвращение аппаратуры в исходное состояние занимает конечное время, в продолжение которого установка не способна к счету других частиц. Минимальный интервал времени между двумя последовательными импульсами, при котором они сосчитываются отдельно, называется разрешающим временем установки. Наличие у счетной установки конечного разрешающего времени приводит к тому, что при большой скорости счета некоторое количество частиц не будет зарегистрировано. С этим обстоятельством необходимо считаться и уметь правильно вводить поправку на «просчеты» при обработке результатов измерений.

Чем меньше разрешающее время установки, тем больше ее пропускная способность или разрешающая способность, характеризуемая максимальным числом частиц, регистрируемых без просчетов в единицу времени. Для того, чтобы вычислить поправку на просчеты, необходимо опытным путем определить «мертвое время» данного счетчика, зависящее в свою очередь от ряда причин. «Мертвым временем» счетчика ($\tau_{сч}$)

называется время полной нечувствительности после регистрации отсчета, в течение которого счетчик не может реагировать на новые акты ионизации, происходящие внутри его объема. То есть, под $\tau_{сч}$ понимается время, в течение которого в счетчике вообще невозможна вспышка самостоятельного разряда.

После окончания активной стадии разряда в счетчике напряженность электрического поля около нити падает до минимального значения, при котором невозможно образование новой лавины электронов. Это связано с экранирующим действием положительного пространственного разряда. По мере его удаления от нити к катоду напряженность поля постепенно возрастает, и как только положительные ионы отойдут на достаточное расстояние от нити, в счетчике может вспыхнуть новый разряд. Таким образом, «мертвое время» определяется временем прохождения положительного пространственного заряда от нити до некоторого «критического расстояния» ($r_{кр}$), при котором напряженность электрического поля у нити достигает величины, необходимой для вспышки и самостоятельного разряда.

Если в момент времени, соответствующий приходу ионов на «критическое» расстояние, в счетчик попадает новая частица, она будет сосчитана, хотя амплитуда возникающего при этом импульса напряжения будет значительно меньше полной величины. В течение дальнейшего времени продвижения положительных ионов от $r_{кр}$ до цилиндра напряженность поля у нити продолжает возрастать, одновременно восстанавливается потенциал нити и растет амплитуда импульса, который возникает, если в это время в счетчик попадает частица.

Интервал времени между началом регистрации импульса и тем моментом, когда импульс, вызываемый следующим ионизирующим событием в счетчике, достигает полной величины, называется «временем восстановления». Оно равно времени движения положительных зарядов от $r_{кр}$ до катода.

Если число частиц, попадающих в счетчик в единицу времени, велико (высокая активность препарата), то многие из них попадают в период восстановления поля и создают относительно мало ионов (слабый импульс). Чем меньше созданный в счетчике положительный пространственный заряд, тем на меньшее расстояние он должен отойти от нити, чтобы стала возможной новая вспышка разряда. Поэтому при больших скоростях счета «мертвое время» счетчика уменьшается. И, наоборот, если частицы приходят редко, то практически все они попадают в счетчик после восстановления поля, создают импульсы максимальной амплитуды и соответственно большее число положительных ионов, что приводит к увеличению «мертвого времени».

Экспериментальная часть

Оборудование и материалы: радиометр МКС/СПР-08А, штатив, набор пластин из различных металлов (алюминий, медь, латунь, свинец), закрытые источники ^{36}Cl и ^{137}Cs .

Задание 1

Исследование скорости счета радиоактивного препарата в зависимости от толщины фильтра, стоящего перед детектором

Измерить скорость счета закрытого источника ^{137}Cs , помещая на него блок детектирования при наличии и отсутствии фильтров (алюминиевый и лавсановый фильтры) перед детектором. Регистрировать скорость счета препарата в течение 8 секунд. Провести не менее 10 измерений. Выразить результаты счета в процентах, приняв за 100% число отсчетов, полученное без фильтра. Сделать выводы.

Задание 2

Исследование влияния расположения радиоактивного препарата относительно детектора радиометра по горизонтали на скорость счета

Радиоактивный препарат перемещать по горизонтали относительно детектора и регистрировать скорость счета в течение 8 секунд. Провести не менее 10 измерений в трёх повторностях. Полученные результаты занести в таблицу 3.

Таблица 3

Изменение скорости счета радиоактивного препарата при его перемещении по горизонтали относительно детектора радиометра

Расположение препарата относительно счетной трубки по горизонтали	Скорость счета при экспозиции 8 секунд, сек ⁻¹				
	1 измерение	2 измерение	3 измерение	среднее значение	стандартное отклонение
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

По полученным данным построить график, в котором по оси ординат отложить скорость счета (сек⁻¹), а по оси абсцисс – расположение препарата вдоль счетной трубки (1, 2, 3 и т.д.). Сделать выводы.

Задание 3

Исследование влияния расположения радиоактивного препарата относительно детектора радиометра по вертикали на скорость счета

Радиоактивный препарат перемещать по вертикали относительно детектора и регистрировать скорость счета в течение 8 секунд. Провести не менее 10 измерений в трёх повторностях. Выразить результаты в процентах, приняв за 100% число отсчетов, полученное при наименьшем расстоянии между радиоактивным препаратом и детектором радиометра. Полученные результаты занести в таблицу 4.

% изменяется скорость счета в присутствии подложек, изготовленных из разных материалов. Полученные результаты занести в таблицу 5.

Таблица 5

Зависимость скорости счета от материала подложки препарата

Материал подложки	Скорость счета при экспозиции 8 секунд, сек ⁻¹				
	1 измерение	2 измерение	3 измерение	среднее значение	результат счета в %
«Воздух»					
Медь					
Алюминий					
Латунь					
Свинец					

На основании полученных данных построить диаграмму, в котором по оси абсцисс будет материал подложек, а по оси ординат – скорость счета в процентах для каждой из подложек. Сделать выводы.

Задание 5

Определение «мертвого» времени счетчика методом двух источников. Расчет поправки на мертвое время

Пусть N_0 — среднее число частиц, попавших в счетчик за 1 секунду – «истинная» скорость счета; N — число частиц, зарегистрированных за 1 секунду установкой; τ — общее разрешающее время установки (в секунду), которое принимается постоянным. Тогда истинную скорость счета (N_0) можно вычислить по формуле:

$$N_0 = \frac{N_1}{1 - N_1 \cdot \tau_{сч}} \quad (9)$$

Поместить под счетчик два радиоактивных препарата, имеющих приблизительно одинаковую активность. Принять следующие обозначения:

N_{01} — истинное число частиц, попадающих в счетчик от 1-го препарата;

N_{02} — то же от 2-го препарата;

$N_{01,2}$ — то же для 1-го и 2-го препаратов вместе.

N_1 - измеренная скорость счета для 1-го препарата;

N_2 - измеренная скорость счета для 2-го препарата;

$N_{1,2}$ - то же для 1-го и 2-го препаратов вместе.

На основании соотношения (9) будем иметь:

$$N_{01} = \frac{N_1}{1 - N_1 \cdot \tau_{сч}} ; N_{02} = \frac{N_2}{1 - N_2 \cdot \tau_{сч}} ; N_{01,2} = \frac{N_{1,2}}{1 - N_{1,2} \cdot \tau_{сч}} \quad (10)$$

Так как $N_{01,2} = N_{01} + N_{02}$, то

$$\frac{N_{1,2}}{1 - N_{1,2} \cdot \tau_{сч}} = \frac{N_1}{1 - N_1 \cdot \tau_{сч}} + \frac{N_2}{1 - N_2 \cdot \tau_{сч}} \quad (11)$$

Решая это уравнение относительно $\tau_{сч}$, и пренебрегая членами, содержащими квадрат малой величины $\tau_{сч}$, мы получаем окончательно:

$$\tau_{сч} = \frac{N_1 + N_2 - N_{1,2}}{2N_1N_2}, \text{ сек} \quad (12)$$

Поскольку в сумму $N_1 + N_2$ дважды входит фон, а член $N_{1,2}$ включает в себя фон один раз, нужно еще произвести вычитание фона в числителе:

$$\tau_{сч} = \frac{N_1 + N_2 - N_{1,2} - N_{\phi}}{2N_1N_2}, \text{ сек} \quad (13)$$

Определив количество импульсов за 1 секунду при экспозиции 16 секунд от первого источника, от второго источника и от обоих источников вместе, рассчитать мертвое время счетчика по формуле (13).

Ввести поправку на просчеты по формуле (10) для обоих радиоактивных источников.

Найти процент потери скорости счета в результате наличия мертвого времени счетчика, приняв N_0 за 100%, а N за x %.

Сделать выводы.

Лабораторная работа №3

Статистические ошибки измерений

Радиоактивный распад – явление статистическое, и к нему применимы законы статистики. При обработке результатов измерений активности радиоизотопа существенную роль играют флуктуации числа распадов в единицу времени и, следовательно, числа частиц, регистрируемых счетчиком. Характеристикой изучаемого статистического процесса могут служить данные, полученные путем усреднения результатов большого числа наблюдений. Увеличение числа отдельных измерений повышает достоверность окончательного результата. К этому же приводит увеличение общего числа частиц, регистрируемых в опыте, которое достигается повышением времени отдельного измерения. Иначе говоря, получение результата высокой точности требует большого статистического материала. Помимо статистических особенностей явления радиоактивного распада, при обработке измерений нужно принять во внимание действие случайных вариаций в условиях опыта, неизбежных в каждом эксперименте. Сюда следует добавить также флуктуации фона, то есть числа импульсов, вызванных в счетчике частицами постороннего происхождения. Все эти случайные причины отклоняют результаты измерений от истинного значения измеряемой величины. Оценка величины этой ошибки является необходимой частью экспериментальной работы. Различают систематические и случайные ошибки.

Систематические ошибки возникают из-за нарушения работы аппаратуры, несовершенства методики измерений, от постоянного одностороннего внешнего воздействия и других факторов, которые действуют регулярно либо в сторону увеличения, либо уменьшения значения измеряемой величины. При производстве измерений систематические ошибки должны быть устранены.

Случайные ошибки возникают в связи с вариациями восприятия органов чувств наблюдателя, с неполной воспроизводимостью всех условий опыта, с флуктуациями значений самой измеряемой величины. Одинаково возможны случайные ошибки в ту и другую стороны от истинного значения. Для анализа случайных ошибок следует применять законы, установленные теорией вероятности по отношению к многократному повторению случайных ошибок. Следует различать два источника происхождения случайных ошибок:

- ошибки, возникающие при измерениях неизвестной величины, имеющей определенное значение (измерение длины стержня, веса тела, определение частоты переменного тока и т.д.);
- ошибки измерения величины, которая сама подвержена статистическим колебаниям (определение среднего количества осадков, измерение активности препарата и т.д.)

Если систематические ошибки устранены, то задача сводится к тому, чтобы учесть влияние случайных ошибок на результаты измерений. Решение этой задачи дает статистическая теория ошибок. Кратко напомним основные понятия и определения, вытекающие из теории ошибок и необходимые для обработки данных.

Основные понятия, применяющиеся при статистической обработке данных по общей теории случайных ошибок (распределение Гаусса)

Основным понятием при анализе результатов измерений является понятие среднего значения измеряемой величины. Обозначим измеряемую величину за x , истинное значение которой составляет X . Примем, что в ходе эксперимента было произведено k измерений этой величины, результаты которых записаны в виде набора значений: $x_1, x_2, x_3, \dots, x_k$.

Для большинства исследуемых процессов и явлений, а также «простых» измерений среднее значение может быть вычислено как *среднее арифметическое* из всех полученных значений:

$$\bar{x} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k x_i \quad (14)$$

Среднее является наиболее вероятным значением измеряемой величины x и тем точнее приближается к X , чем больше k .

Отклонения наблюдаемых (измеряемых) значений от среднего арифметического называются *абсолютными ошибками отдельных измерений*:

$$\varepsilon_i = x_i - \bar{x} \quad (15)$$

Величина конкретной ошибки отдельного измерения не имеет большого значения. Гораздо более важным параметром, характеризующим точность полученного при многократных измерениях результата, является *стандартное (среднеквадратическое) отклонение*, обозначаемое σ и определяемое выражением:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum \varepsilon_i^2}{k-1}} \quad (16)$$

Величина σ даёт возможность исследователю оценить рассеивание измеряемых значений вокруг среднего значения.

Однако на практике чаще всего используют другую величину, известную как *стандартная ошибка среднего значения* (m), определяемую по формуле:

$$m = \sqrt{\frac{\sum \varepsilon_i^2}{k(k-1)}} = \frac{\sigma}{\sqrt{k}}, \quad (17)$$

которая при больших значениях k может быть ассоциирована с *дисперсией* – одной из основных характеристик случайных процессов.

Для обеспечения наглядности при оценке величины погрешности измерений часто пользуются *относительными ошибками результата измерений*, которые определяются как отношение соответствующей ошибки к среднему и выражаются в долях либо процентах:

$$\delta_m = \frac{m}{\bar{x}} \cdot 100\% = \sqrt{\frac{\sum \varepsilon_i^2}{k(k-1)}} \frac{100\%}{\bar{x}} \quad (18)$$

В приведённом в выражении (18) примере определяется величина относительной стандартной ошибки среднего значения m , что подчёркивается соответствующим подстрочным индексом после символа δ .

Окончательный результат измерений записывают в таком виде:

$$x = \bar{x} \pm m = \bar{x} \pm \sqrt{\frac{\sum \varepsilon_i^2}{k(k-1)}} \quad (19)$$

Статистические ошибки при измерении радиоактивности

Выше рассмотрен случай, когда измеряемая величина x имеет некоторое истинное значение X , а результаты измерений дают совокупность значений, которые уклоняются от истинного значения по законам случайных величин. В явлении радиоактивного распада сама измеряемая величина не постоянна и флуктуирует вблизи некоторого среднего значения. Такие процессы описываются *распределением Пуассона*, которое моделирует поведение случайной величины, представляющей собой число событий, произошедших за фиксированное время, при условии, что данные события происходят с *некоторой фиксированной средней интенсивностью* и *независимо друг от друга*. Как следствие, при большом количестве измерений среднее арифметическое является наилучшим приближением величины скорости счёта препарата, а мерой точности измерения является стандартная ошибка среднего.

Пользуясь устоявшимися обозначениями (N – общее число регистрируемых импульсов за время измерения t (в секундах); n – число импульсов в 1 секунду (скорость счёта)) получим:

$$n = \frac{N}{t} \quad (20)$$

Стандартное (квадратическое) отклонение, характеризующее точность измерения числа импульсов N , может быть определено из теории Пуассона, из которой следует, что оно определяется через корень квадратный от собственно величины зарегистрированных импульсов:

$$D_N = \sqrt{N} \quad (21)$$

В этом случае стандартное отклонение при определении скорости счета также можно выразить как функцию непосредственно фиксируемой величины:

$$D_n = \frac{D_N}{t} = \frac{\sqrt{N}}{t} = \sqrt{\frac{N}{t^2}} = \sqrt{\frac{n}{t}} \quad (22)$$

и времени измерения t .

Относительное стандартное отклонение скорости счета:

$$\delta = \frac{D_n}{n} \cdot 100\% = \frac{1}{\sqrt{n \cdot t}} \cdot 100\% \quad (23)$$

Важно отметить, что обычно под n и N понимают соответствующие значения для препарата и фона, измеряемых вместе. Если обозначить через n_ϕ , ту же величину для фона, а под n_{np} понимать скорость счета при измерении активности препарата без фона, то

$$n_{np} = n - n_\phi, \quad (24)$$

а стандартное отклонение для скорости счёта препарата определится более сложным образом. В статистике показано, что сумма (разность) независимых пуассоновских случайных величин также характеризуется распределением Пуассона. При этом стандартное отклонение для вновь получаемой величины определяется суммой квадратов стандартных отклонений для величин, над которыми производятся операции. Иными словами, для скорости счёта препарата без фона, определяемой как разность измеряемых в эксперименте скоростей счёта препарата и фона (24) стандартное отклонение скорости счета составит

$$D_{n_{np}} = \sqrt{D_n^2 + D_\phi^2} = \sqrt{\frac{n}{t} + \frac{n_\phi}{t}}, \quad (25)$$

где под D_ϕ понимается стандартное отклонение для скорости счета фона:

$$D_{n_\phi} = \sqrt{\frac{n_\phi}{t}} \quad (26)$$

Окончательный результат скорости счёта для определения активности исследуемого препарата записывают в виде

$$n_{np} = \bar{n} - \bar{n}_\phi \quad (27)$$

или

$$A = n_{np} \pm D_{n_{np}} \quad (28)$$

Здесь важно отметить, что, поскольку, в отличие от (24), речь идёт об измеряемых в эксперименте величинах скорости счёта, то и значок среднего над соответствующими величинами опускать не следует.

Этой формулой мы будем пользоваться при обработке результатов измерений активности. Приведём также окончательную формулу для расчёта относительной стандартной ошибки среднего:

$$\delta_{n_p} = \frac{D_{n_p}}{n_{n_p}} \cdot 100\% = \frac{\sqrt{\bar{n} + \bar{n}_\phi}}{\bar{n} - \bar{n}_\phi} \frac{1}{\sqrt{t}} \cdot 100\% \quad (29)$$

Здесь представляется важным отметить тот факт, что при увеличении времени экспозиции t величина ошибки уменьшается, пропорционально $1/\sqrt{t}$, что необходимо учитывать при выборе режима измерения.

Несмотря на то, что величина ошибки среднего уменьшается с увеличением t , не всегда существует возможность увеличивать время проведения измерения. В этом случае проводят несколько отдельных измерений скорости счёта n . Обозначим за k – число измерений, тогда истинная скорость счёта определяется как среднее арифметическое для измеренных средних значений (при условии одинаковости величины временного интервала отдельного измерения t)

$$\bar{n} = \frac{\sum_i \bar{n}_i}{k} = \frac{\sum_i N_i}{kt} \quad (30)$$

а стандартное отклонение в этом случае равно:

$$D_{\bar{n}} = \sqrt{\frac{\bar{n}}{k \cdot t}} \quad (31)$$

То же самое справедливо и при измерении скорости счёта фона.

Из выражений (30)-(31) видно, что проведение нескольких последовательных отдельных измерений эквивалентно проведению одного измерения, но с пропорционально увеличенным временем. Относительная ошибка рассчитывается так же, как и в (29):

$$\delta_{\bar{n}} = \frac{D_{\bar{n}}}{\bar{n}} \cdot 100\% \quad (32)$$

Экспериментальная часть

Оборудование и материалы: радиометр МКС/СРП-08А, закрытый источник β -излучения ^{137}Cs , блок детектирования БДПС-02А (альфа-, бета-излучение).

Задание 1.

Изучение зависимости величины стандартной ошибки среднего значения m и стандартного статистического отклонения D_n от количества

измерений и времени счета и использования данных измерений для проверки правильности работы аппаратуры

При регистрации излучения радиоактивного препарата полезно проводить сравнение величины *стандартной ошибки среднего значения m* , вычисленной по формуле (17) с величиной стандартного отклонения, рассчитанного по формуле (31).

Оба выражения применимы в тех случаях, когда проводят серию отдельных измерений некоторой величины. Первое из них дает суммарную ошибку опыта, а второе учитывает лишь погрешность, вызванную статистическим характером радиоактивности. При стабильной работе аппаратуры и при отсутствии существенных ошибок, не связанных со статистическим характером распада, величины m и $D_{\bar{n}}$ будут иметь близкое значение.

Пример представления результатов измерений для расчета среднего значения и ошибки среднего, $t=1$ секунда

Индекс измерения, i	Скорость счёта, имп/сек, n_i	Среднее арифметическое, $\pi = \sum_i n_i / k$	Абсолютная ошибка, $\varepsilon_i = n_i - \pi$	Квадраты отклонений, ε_i^2
1	488	499	-11	121
2	474		-25	625
3	546		+47	2209
4	550		+51	2601
5	508		+9	81
6	576		+77	5929
7	456		-43	1849
8	460		-39	1521
9	504		+5	25
10	428		-71	5041
$k=10$	$\sum n_i =$		$\sum \varepsilon_i =$	$\sum \varepsilon_i^2 =$

Для приведённых в таблице 6 данных *стандартное (квадратическое) отклонение* отдельного измерения скорости счёта равно:

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\sum \varepsilon_i^2}{k-1}} = 47,1 \text{ имп/сек}$$

Стандартная ошибка среднего арифметического значения равна:

$$m = \pm \sqrt{\frac{\sum \varepsilon_i^2}{k(k-1)}} = \pm \frac{\sigma}{\sqrt{k}} = \pm 14,9 \text{ имп/сек}$$

Относительная квадратичная ошибка результата:

$$\delta = \frac{m}{\bar{x}} \cdot 100\% = \sqrt{\frac{\sum \varepsilon_i^2}{k(k-1)}} \cdot \frac{100\%}{\bar{x}} = \frac{14,9 \times 100\%}{499} \approx 3\%$$

Стандартное статистическое отклонение среднего арифметического скорости счёта определяется по формуле (31):

$$D_n = \pm \sqrt{\frac{499}{10 \cdot 1}} \approx 7,06 \text{ имп/сек}$$

Относительное статистическое отклонение результата по формуле (32):

$$\delta_n = \frac{D_n}{\bar{n}} \cdot 100\% \approx 1.4\%$$

Сравнить величины m и D_n и сделать выводы о стабильности работы аппаратуры. При стабильно работающем оборудовании и отсутствии влияния систематических ошибок величина m не должна превышать $3D_n$.

Аналогично обработать результаты трёх серии измерений при $k = 10; 20, 30$ и при экспозиции 4, 8, 16 секунд и учетом значений скорости счета фона. Сделать выводы.

Задание 2

Определение достоверности различий по t-критерию Стьюдента

Определение достоверности различий по t-критерию Стьюдента t-критерий Стьюдента относится к параметрическим критериям, следовательно, его использование возможно только в том случае, когда результаты эксперимента представлены в виде измерений, которые имеют нормальное распределение (практически все значения нормального распределения случайной величины лежат в интервале $\bar{x} - 3\sigma; \bar{x} + 3\sigma$). Критерий Стьюдента чрезвычайно популярен, он используется более чем в половине медицинских публикаций. Однако следует помнить, что этот критерий предназначен для сравнения именно двух групп, а не нескольких групп попарно.

Проиллюстрируем возможности критерия Стьюдента на конкретном примере. Предположим, необходимо выяснить эффективность радиофармпрепарата А по сравнению с эффективностью радиофармпрепарата препарата Б в эксперименте на лабораторных животных-опухоленосителях. Рабочая гипотеза заключается в том, что радиофармпрепарат А более эффективен, чем радиофармпрепарат Б. Критерием эффективности является коэффициент торможения опухолевого роста (ТОР) относительно контроля (чем выше этот коэффициент, тем выше эффективность противоопухолевого препарата) (табл. 7). Необходимо рассчитать достоверность различий и проверить правильность выдвинутой гипотезы.

Таблица 7

Значения коэффициентов торможения опухолевого роста, %

	1	2	3	4	5	6	7	8
препарат А	65	70	58	62	60	55	73	74
препарат Б	53	50	73	65	45	56	54	58

Что же необходимо сделать для расчета достоверности различий по t-критерию Стьюдента?

1. Вычислить средние арифметические величины (\bar{x}) для каждой группы в отдельности по следующей формуле:

$$\bar{x} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k x_i, \text{ где}$$

x_i – значения измеряемой величины,
 k – число измерений.

Проставив в формулу фактические значения из таблицы 7, получим:

$$\bar{x}_{\text{препарат_А}} = \frac{517}{8} \approx 65$$

$$\bar{x}_{\text{препарат_Б}} = \frac{454}{8} \approx 57$$

Сопоставление среднеарифметических величин показывает, что в группе, которая принимала радиофармпрепарат А, величина ТОР ($\bar{x}_{\text{препарат_А}} \sim 65$) выше, чем в группе, которая принимала радиофармпрепарат Б ($\bar{x}_{\text{препарат_Б}} \sim 57$). Однако для окончательного утверждения о том, что радиофармпрепарат А эффективнее, чем радиофармпрепарат Б, следует убедиться в статистической достоверности различий (t) между рассчитанными среднеарифметическими значениями.

2. Для этой цели дальше необходимо вычислить в обеих группах *стандартное квадратичное отклонение* (σ) по следующей формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum \varepsilon_i^2}{k-1}}, \text{ где}$$

$\varepsilon_1 = x_1 - \bar{x}$; $\varepsilon_2 = x_2 - \bar{x}$; ... ; $\varepsilon_k = x_k - \bar{x}$ – абсолютные ошибки отдельных измерений,

k – число измерений.

подставить полученные значения в формулу и произвести необходимые вычисления:

$$\sigma_{\text{препарат_А}} = \sqrt{\frac{352}{7}} \approx 7,09$$

$$\sigma_{\text{препарат_Б}} = \sqrt{\frac{540}{7}} \approx 8,78$$

3. Следующим этапом является вычисление *стандартной ошибки среднего арифметического значения* (m) по формуле:

$$m = \sqrt{\frac{\sum \varepsilon_i^2}{k(k-1)}} = \frac{\sigma}{\sqrt{k}}, \text{ где}$$

σ – стандартное (квадратическое) отклонение,
 k – число измерений.

Вычислим для каждой группы значения (m):

$$m_{\text{препарат}_A} = \frac{\sigma}{\sqrt{k}} \approx \frac{7,09}{2,83} \approx 2,51$$

$$m_{\text{препарат}_B} = \frac{\sigma}{\sqrt{k}} \approx \frac{8,78}{2,83} \approx 3,1$$

4. Вычислить критерий достоверности t -критерий Стьюдента:

$$t = \frac{|\bar{x}_{\text{препарат}_A} - \bar{x}_{\text{препарат}_B}|}{\sqrt{m_{\text{препарат}_A}^2 + m_{\text{препарат}_B}^2}}, \text{ где}$$

$\bar{x}_{\text{препарат}_A}$ – средние арифметические величины ТОР для группы, принимавший
радиофармпрепарат А,

$\bar{x}_{\text{препарат}_B}$ – средние арифметические величины ТОР для группы, принимавший
радиофармпрепарат Б

$m_{\text{препарат}_A}$ – стандартная ошибка среднего арифметического значения
величины ТОР для группы, принимавший радиофармпрепарат А,

$m_{\text{препарат}_B}$ – стандартная ошибка среднего арифметического значения
величины ТОР для группы, принимавший радиофармпрепарат Б

Проставив в формулу фактические значения, получим:

$$t = \frac{|65 - 57|}{\sqrt{2,51^2 + 3,1^2}} \approx 1,86$$

5. Полученное значение t -критерия Стьюдента необходимо правильно интерпретировать. Для этого необходимо найти число степеней свободы f по следующей формуле:

$$f = (k_1 + k_2) - 2,$$

где $k_1 + k_2$ – количество животных-опухоленосителей, которым вводили радиофармпрепарат А и радиофармпрепарат Б, соответственно.

В нашем случае: $f = (8+8) - 2 = 14$.

По таблице 8 определить достоверность различий. Для этого полученное значение ($t_{\text{эксн}}$) сравнить с граничным при 5%-ном уровне значимости (0,05) при полученном числе степеней свободы f .

Если полученное в эксперименте ($t_{\text{эксн}}$) больше или равно граничному значению ($t_{\text{эксн}} \geq t_{\text{гран}}$), то различия между средними

арифметическими двух групп считаются достоверными при 5%-ном уровне значимости.

Если полученное $t_{эксн}$ меньше граничного значения $t_{гран}$ ($t_{эксн} \leq t_{гран}$), считается, что различия недостоверны, и разница в среднеарифметических показателях групп имеет случайный характер.

В нашем примере граничное (табличное) значение $t_{0,05}=2.145$, сравним это значение с вычисленным $t_{эксн}$, которое равно 1,86, т. е. меньше граничного значения (2,145). Следовательно, различия между полученными в эксперименте средними арифметическими значениями считаются недостоверными, а значит, недостаточно оснований говорить о том, что радиофармпрепарат А оказался эффективнее, чем радиофармпрепарат Б.

В этом случае можно записать: $t=1.86$ при $P > 0,05$, это означает, что в случае проведения 100 аналогичных экспериментов вероятность (P) получения подобных результатов, когда средние арифметические величины экспериментальных групп окажутся выше контрольных, больше 5%-ного уровня значимости или меньше 95 случаев из 100.

Набрать статистический материал, измерив скорости счёта для двух радиоактивных препаратов (при $k = 30$ и при экспозиции 16 секунд).

Определить достоверность различий между вариантами опыта. Для этого найти критерий достоверности t -критерий Стьюдента.

$$t = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{\sqrt{m_1^2 + m_2^2}}, \text{ где}$$

\bar{x}_1 – среднее арифметическое 1 варианта опыта,

\bar{x}_2 – среднее арифметическое 2 варианта опыта,

m_1 – стандартная ошибка среднего арифметического значения 1 варианта опыта,

m_2 – стандартная ошибка среднего арифметического значения 2 варианта опыта.

Таблица 8

Критические значения t-критерия Стьюдента

Степень свободы f	p=0,05	p=0,01	p=0,001	Степень свободы f	p=0,05	p=0,01	p=0,001
1	12,70	63,65	636,61	47	2,012	2,685	3,510
2	4,303	9,925	31,602	48	2,011	2,682	3,505
3	3,182	5,841	12,923	49	2,010	2,680	3,500
4	2,776	4,604	8,610	50	2,009	2,678	3,496
5	2,571	4,032	6,869	51	2,008	2,676	3,492
6	2,447	3,707	5,959	52	2,007	2,674	3,488
7	2,365	3,499	5,408	53	2,006	2,672	3,484
8	2,306	3,355	5,041	54	2,005	2,670	3,480
9	2,262	3,250	4,781	55	2,004	2,688	3,476
10	2,228	3,169	4,587	56	2,003	2,667	3,473
11	2,201	3,106	4,437	57	2,002	2,665	3,470
12	2,179	3,055	4,318	58	2,002	2,663	3,466
13	2,160	3,012	4,221	59	2,001	2,662	3,463
14	2,145	2,977	4,140	60	2,000	2,660	3,460
15	2,131	2,947	4,073	61	2,000	2,659	3,457
16	2,120	2,921	4,015	62	1,999	2,657	3,454
17	2,110	2,898	3,965	63	1,998	2,656	3,452
18	2,101	2,878	3,922	64	1,998	2,655	3,449
19	2,093	2,861	3,883	65	1,997	2,654	3,447
20	2,086	2,845	3,850	66	1,997	2,652	3,444
21	2,080	2,831	3,819	67	1,996	2,651	3,442
22	2,074	2,819	3,792	68	1,995	2,650	3,439
23	2,069	2,807	3,768	69	1,995	2,649	3,437
24	2,064	2,797	3,745	70	1,994	2,648	3,435
25	2,060	2,787	3,725	71	1,994	2,647	3,433
26	2,056	2,779	3,707	72	1,993	2,646	3,431
27	2,052	2,771	3,690	73	1,993	2,645	3,429
28	2,049	2,763	3,674	74	1,993	2,644	3,427
29	2,045	2,756	3,659	75	1,992	2,643	3,425
30	2,042	2,750	3,646	76	1,992	2,642	3,423
31	2,040	2,744	3,633	77	1,991	2,641	3,422
32	2,037	2,738	3,622	78	1,991	2,640	3,420
33	2,035	2,733	3,611	79	1,990	2,639	3,418
34	2,032	2,728	3,601	80	1,990	2,639	3,416
35	2,030	2,724	3,591	90	1,987	2,632	3,402

Степень свободы f	p=0,05	p=0,01	p=0,001	Степень свободы f	p=0,05	p=0,01	p=0,001
36	2,028	2,719	3,582	100	1,984	2,626	3,390
37	2,026	2,715	3,574	110	1,982	2,621	3,381
38	2,024	2,712	3,566	120	1,980	2,617	3,373
39	2,023	2,708	3,558	130	1,978	2,614	3,367
40	2,021	2,704	3,551	140	1,977	2,611	3,361
41	2,020	2,701	3,544	150	1,976	2,609	3,357
42	2,018	2,698	3,538	200	1,972	2,601	3,340
43	2,017	2,695	3,532	250	1,969	2,596	3,330
44	2,015	2,692	3,526	300	1,968	2,592	3,323
45	2,014	2,690	3,520	350	1,967	2,590	3,319
46	2,013	2,687	3,515				

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Какое излучение называют ионизирующим?
2. Что такое «потенциал ионизации»? Чему равна энергия ионизации воды?
3. Что такое нуклон?
4. Раскройте понятие «изотоп».
5. Что отражают ядерные числа A и Z ?
6. Чем естественная радиоактивность отличается от искусственной?
7. Какие электромагнитные излучения вы знаете? Какие из них являются ионизирующими? Назовите их основные физические характеристики (заряд, масса, энергия, проникающая способность или пробег, линейная плотность ионизации).
8. Какие виды ионизирующих излучений имеют корпускулярную природу? Назовите их основные физические характеристики (заряд, масса, энергия, проникающая способность или пробег, линейная плотность ионизации).
9. Что такое радиационный фон и какие компоненты он включает?
10. Что такое «активность» радионуклида? Какие единицы измерения характерны для активности?
11. Запишите закон радиоактивного распада.
12. Что характеризует период полураспада?
13. Какое излучение относят к редкоионизирующему, а какое к плотноионизирующему?
14. Назовите и охарактеризуйте основные виды ядерных превращений.
15. Перечислите и охарактеризуйте дозы ионизирующих излучений (экспозиционная, поглощенная, эквивалентная, эффективная) и их единицы измерения (внесистемные и в Международной системе единиц).
16. Назовите основные типы детекторов ионизирующего излучения.
17. Опишите принцип работы счетчика Гейгера-Мюллера.
18. Перечислите какие условия влияют на скорость счета радиоактивных препаратов и почему.
19. Что такое «мёртвое время» счетчика? Как рассчитать поправку на «мёртвое время»?
20. С чем связаны систематические и случайные ошибки при оценке результатов измерений?

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Какое ядро получится из ядра изотопа ^{238}U после одного альфа-распада и двух электронных бета-распадов?

Пример:

Схема реакции альфа-распада выглядит следующим образом:

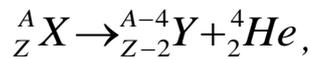
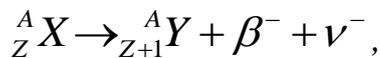
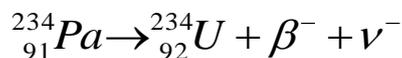
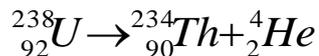


Схема реакции электронного бета-распада выглядит следующим образом:



где A – массовое число, Z – зарядовое число, X – изотоп, который претерпевает альфа-распад (бета-распад), Y – изотоп, который образовался в результате альфа-распада (бета-распада), ${}^4_2\text{He}$ – альфа-частица, β^- – бета-частица, ν^- – антинейтрино.

Таким образом, получим:



2. Определите количество нейтронов в ядре элемента, получившегося в результате трех последовательных альфа-распадов ядра тория ^{234}Th .

3. Ядро какого химического элемента образуется при альфа-распаде ^{226}Ra ?

4. Какое ядро получится из ядра изотопа ^{90}Sr после двух электронных бета-распадов?

5. Ядро какого химического элемента образуется при альфа-распаде ^{210}Po ?

6. Какое ядро получится из ядра изотопа ^{60}Co после электронного бета-распада?

7. Запишите реакцию радиоактивного распада натрия, в результате которого ^{22}Na превращается в магний

8. Запишите реакцию радиоактивного распада плутония, в результате которого плутоний ^{239}Pu превращается в уран ^{235}U .

9. Ядро атома ксенона ^{140}Xe превращается в стабильное ядро атома церия ^{140}Ce . Сколько электронов при этом испускается? Запишите эти реакции.

10. Какова активность (без учета дочерних продуктов) 1 г ^{226}Ra ?
 $T_{1/2}(^{226}\text{Ra})=1600$ лет.

Пример:

$$A=N\lambda, \text{ где}$$

A – активность радионуклида, Бк; N – количество радиоактивных ядер, λ – постоянная распада (вероятность распада в единицу времени), которая связана с периодом полураспада (время, в течение которого количество радиоактивных ядер уменьшается в два раза) $\lambda = \frac{0,693}{T_{1/2}}$

$$N = \frac{mN_A}{M}, \text{ где}$$

N – количество радиоактивных ядер, m – масса образца, г; M – молярная масса, г/моль; N_A – число Авогадро, $6,02 \cdot 10^{23}$ моль $^{-1}$

Таким образом, получим:

$$N = \frac{mN_A}{M} = \frac{1 \cdot 6,02 \cdot 10^{23}}{226} = 2,66 \cdot 10^{21}$$

$$\lambda = \frac{0,693}{T_{1/2}} = \frac{0,693}{1600 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60} = \frac{0,693}{5 \cdot 10^{10}} = 1,37 \cdot 10^{-11} \text{ c}^{-1}$$

$$A=N\lambda = 2,66 \cdot 10^{21} \cdot 1,37 \cdot 10^{-11} = 3,67 \cdot 10^{10} \text{ Бк} = 1 \text{ Ки}$$

Ответ: $3,67 \cdot 10^{10}$ Бк = 1 Ки

11. Какова активность (без учета дочерних продуктов) 1 г ^{238}U ?
 $T_{1/2}(^{238}\text{U})=4.47 \times 10^9$ лет.

12. Источник ^{40}K имеет активность 10^4 Бк. Найти число атомов ^{40}K , содержащихся в этом источнике. $T_{1/2}(^{40}\text{K})=1.2 \times 10^9$ лет

13. Определить массу активных атомов нуклида ^{239}Pu с активностью 10 Бк, $T_{1/2}(^{239}\text{Pu})=2.4 \times 10^4$ лет.

14. Вычислить активность 17 мкг ^{90}Sr . $T_{1/2}(^{90}\text{Sr})=30$ лет

15. Активность препарата Р-32 равна 2 МБк. Сколько весит такой препарат? $T_{1/2}(^{32}\text{P}) = 14.5$ суток.

16. Определить период полураспада $T_{1/2}$ и постоянную распада λ радионуклида, если за сутки его активность уменьшилась на 75 %.

17. Через какое время распадется 15% радиоактивных ядер, период полураспада которых 152 суток?

18. Первоначальная активность ^{60}Co равна 30 Бк. $T_{1/2}(^{60}\text{Co})=5,27$ лет. Определить его активность через 3 года.

19. . Определить период полураспада $T_{1/2}$ и постоянную распада λ радионуклида, если за сутки его активность уменьшилась на 0,01 %?

20. Через какое время распадется 90% радиоактивных ядер, период полураспада которых 30 лет?

ЛИТЕРАТУРА

1. Кудряшов Ю.Б. Радиационная биофизика (ионизирующие излучения) / Под ред. В.К. Мазурика, М.Ф. Ломанова – М.: Физматлит, 2004. – 448 с.
2. Лысенко Н.П. Радиобиология / Под ред. Н.П. Лысенко, В.В. Пак, Л.В. Рогожина, З.Г. Кусурова – Санкт-Петербург: Лань, 2019. – 572 с.
3. Федоренко, Б.С. Радиобиологические эффекты корпускулярных излучений. – М.: Наука, 2006. – 189 с.
4. Ярмоненко С.П., Вайнсон А.А. Радиобиология человека и животных. – М.: Высшая Школа, 2004.– 549с.

Периодическая таблица Д. И. Менделеева

		Г Р У П П Ы Э Л Е М Е Н Т О В																
Период	Ряд	I		II		III		IV		V		VI		VII		VIII		
		Li Литий	Be Бериллий	B Бор	C Углерод	N Азот	O Кислород	F Фтор	Ne Неон	Na Натрий	Mg Магний	Al Алюминий	Si Кремний	P Фосфор	S Сера	Cl Хлор	Ar Аргон	Кобальт
1	1	(H)																
2	2	Li 6,939	Be 9,0122	B 10,811	C 12,01115	N 14,0067	O 15,9994	F 18,9984	Ne 20,179									
3	3	Na 22,9898	Mg 24,305	Al 26,9815	Si 28,086	P 30,9738	S 32,064	Cl 35,453	Ar 39,948									
4	4	K 39,102	Ca 40,08	Sc 44,956	Ti 47,90	V 50,942	Cr 51,996	Mn 54,9380	Fe 55,847									
	5	29 63,546	30 65,37	31 69,72	32 72,59	33 74,9216	34 78,96	35 79,904	36 83,80									
5	6	Rb 85,47	Sr 87,62	Ga 88,905	Zn 91,22	Nb 92,906	Mo 95,94	Tc [99]	Ru 101,07									
	7	47 107,868	48 112,40	49 114,82	50 118,69	51 121,75	52 127,60	53 126,9044	54 131,30									
6	8	Cs 132,905	Ba 137,34	La* 138,91	Hf 178,49	Ta 180,948	W 183,85	Re 186,2	Os 190,2									
	9	79 196,967	80 200,59	81 204,37	82 207,19	83 208,980	84 [210]*	85 [210]	86 [222]									
7	10	Fr [223]	Ra [226]	Ac** [227]	Rf [261]	Db [262]	Sg [263]	Bh [262]	Hs [265]									
	11	111 [272]	112 [285]	113 [286]	114 [286]	115 [286]	116 [286]	117 [294]	118 [294]									

58 140,12	59 140,907	60 144,24	61 147,07	62 150,35	63 151,96	64 157,25	65 158,925	66 162,50	67 164,930	68 167,26	69 168,934	70 173,04	71 174,97
La* Лантаны	Pr Празеодим	Nd Неодим	Pm Прометий	Sm Самарий	Eu Европий	Gd Гадолиний	Tb Тербий	Dy Диспрозий	Ho Гольмий	Er Эрбий	Tm Тулий	Yb Иттербий	Lu Лютеций
90 232,038	91 [231]	92 238,03	93 [237]	94 [241]	95 [243]	96 [247]	97 [247]	98 [252]*	99 [254]	100 [257]	101 [257]	102 [255]	103 [258]
Th Торий	Pa Протактиний	U Уран	Np Нептуний	Pu Плутоний	Am Америций	Bk Берклий	Cf Калифорний	Es Эйнштейний	Fm Фермий	Md Менделеев	No Нобелий	Lr Лоуренсий	

БИОФИЗИКА. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ.
РАЗДЕЛ «РАДИАЦИОННАЯ БИОФИЗИКА»

Авторы:

Наталья Юрьевна **Шилягина**
Анна Владимировна **Масленникова**
Любовь Михайловна **Юдина** и др.

Учебно-методическое пособие

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский
государственный университет им. Н.И. Лобачевского».
603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23.

Подписано в печать _____. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. _____. Уч.-изд. л. ____
Заказ № _____ Тираж экз. ____

Отпечатано в типографии Нижегородского госуниверситета
им. Н.И. Лобачевского
603000, г. Нижний Новгород, ул. Большая Покровская, 37