

## Лабораторная работа №

# ИЗУЧЕНИЕ РАДИОАКТИВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

### Общие сведения

Радиоактивное излучение бывает трех типов: альфа-, бета- и гамма-излучение.

**Альфа-излучение** отклоняется электрическим и магнитным полями, обладает высокой ионизирующей и малой проникающей способностью (например, поглощается слоем алюминия толщиной примерно 0.05 мм.). Это поток ядер гелия.

**Бета-излучение** отклоняется электрическим и магнитным полями. Его ионизирующая способность значительно меньше (примерно на два порядка), а поглощающая, гораздо больше (поглощается слоем алюминия толщиной примерно 2 мм.), чем у альфа-частиц. Это поток электронов или позитронов. Коэффициент поглощения бета-излучения, которое сильно рассеивается в веществе, зависит не только от свойств вещества, но и от размеров и формы тела, на которое падает бета-излучение.

**Гамма-излучение** не отклоняется электрическим и магнитным полями, обладает относительно слабой ионизирующей способностью и очень большой проникающей способностью (например, проходит через слой свинца толщиной 5 см). При прохождении через кристаллическое вещество наблюдается дифракция гамма-излучения. Гамма-излучение – это коротковолновое электромагнитное излучение с чрезвычайно малой длиной волны – меньше  $10^{-10}$  м. Многие радиоактивные процессы сопровождаются излучением гамма-квантов.

В начальный период исследования радиоактивного излучения приходилось иметь дело с проникающим рентгеновским излучением, распространяющимся в воздухе. Поэтому в качестве количественной меры излучения многие годы применяли результат измерений ионизации воздуха вблизи рентгеновских трубок и аппаратов. Позднее была установлена **экспозиционная доза** – количественная характеристика ионизирующего

излучения. Единица экспозиционной дозы – рентген (Р),  $1\text{Р}=2\cdot 10^9$  пар ионов в  $1\text{ см}^3$  воздуха при атмосферном давлении. В практической дозиметрии часто применяется *мощность экспозиционной дозы*, равная экспозиционной дозе в единицу времени.

Изучение последствий облучения живого организма привело к заключению, что радиобиологический эффект зависит не только от поглощенной дозы, т.е. энергии, переданной облученному веществу, но и от других факторов. При одной и той же поглощенной дозе радиобиологический эффект тем выше, чем мощнее ионизация, создаваемая излучением. Для количественной оценки такого влияния вводится понятие *эквивалентной дозы*. Единица эквивалентной дозы – *зиверт* (Зв), названная в честь известного шведского радиобиолога Г.Р. Зиверта. Иногда используется другая единица эквивалентной дозы – *бэр* ( $1\text{Зв} = 100\text{бэр}$ ).

### **Естественные источники радиоактивного излучения**

Основную часть облучения население Земли получает от естественных источников радиоактивного излучения. Большинство из них таковы, что избежать облучения от них совершенно невозможно. На протяжении всей истории существования Земли разные виды излучения падают на ее поверхность из космоса и поступают от радиоактивных веществ, находящихся в земной коре. Человек подвергается облучению двумя путями. Радиоактивные вещества могут находиться вне организма и облучать его снаружи; в этом случае говорят о внешнем облучении. Или же они могут оказаться в воздухе, которым дышит человек, в пище или воде и попасть внутрь организма. Такой способ облучения называют внутренним. Облучению от естественных источников радиации подвергается любой житель Земли, однако одни из них получают большие дозы, чем другие. Это зависит, в частности, от того, где они живут. Уровень радиации в некоторых

местах земного шара, где залегают радиоактивные породы, оказываются значительно выше среднего, а в других местах – соответственно ниже.

Доза облучения зависит, кроме того, от условий жизни людей. Применение некоторых строительных материалов, использование газа для приготовления пищи, открытых угольных жаровень герметизация помещений и даже полеты на самолетах – все это сказывается на уровне облучения за счет естественных источников радиации. Земные источники радиации в сумме ответственны за большую часть облучения, которому подвергается человек за счет естественной радиации. В среднем они дают более 5/6 годовой эквивалентной дозы, получаемой населением в основном вследствие внутреннего облучения. Остальную часть вносят космические лучи, главным образом путем внешнего облучения. Рассмотрим вначале некоторые данные о внешнем облучении от источников космического происхождения.

**Космические лучи.** Естественный радиационный фон, создаваемый космическими лучами, дает чуть меньше половины внешнего облучения, получаемого населением от естественных источников радиации. Космические лучи в основном приходят к нам из глубин Вселенной, но некоторая часть рождается на Солнце во время солнечных вспышек. Космические лучи могут достигать поверхности Земли или взаимодействовать с ее атмосферой, порождая вторичное излучение и приводя к образованию различных радионуклидов. Нет такого места на Земле, куда бы ни падали невидимые космические лучи. Но одни участки земной поверхности более подвержены их действию, чем другие. Северный и Южный полюсы получают большие радиации, чем экваториальные области, из-за наличия у Земли магнитного поля, отклоняющего заряженные частицы, из которых в основном и состоят космические лучи.

Существеннее, однако, то, что уровень облучения растет с высотой, поскольку при этом над ними остается все меньше воздуха, играющего роль защитного экрана. Люди, живущие на уровне моря, получают в среднем из-за

космического лучей эквивалентную дозу около 300 мкЗв/год; для людей, живущих выше 2000 м над уровнем моря, эта величина в несколько раз больше.

Еще более интенсивному, хотя и относительно непродолжительному облучению, подвергаются экипажи и пассажиры самолетов. При подъеме с высоты 4000 м (максимальная высота, на которой расположены поселения людей: деревни шерпов на склонах Эвереста) до 12 000 м (максимальная высота полета трансконтинентальных авиалайнеров) уровень облучения за счет космических лучей возрастает примерно в 245 раз и продолжает расти при дальнейшем увеличении высоты до 20 000 м (максимальная высота полета сверхзвукового реактивных самолетов) и выше. При перелете из Нью-Йорка в Париж пассажир обычного турбореактивного самолета получает дозу около 50 мкЗв, а пассажир сверхзвукового самолета на 20 % меньше, хотя подвергается более интенсивному облучению. Это объясняется тем, что во втором случае перелет занимает гораздо меньше времени.

**Земные радиоактивные источники излучения.** Основные радиоактивные изотопы, встречающиеся в горных породах Земли – это калий-40, рубидий-87 и изотопы двух радиоактивных семейств, берущих начало соответственно от урана-238 и тория-232 –долгоживущих изотопов, входящих в состав Земли с самого ее рождения. Разумеется, уровни земной радиации неодинаковы для разных мест земного шара и зависят от концентрации радионуклидов в том или ином участке земной коры. В местах проживания основной массы населения они примерно одного порядка. Мощность эквивалентной дозы естественного радиоактивного фона на Земле составляет в среднем 1мЗв/год, или около 0.12 мкЗв/час. Для сравнения укажем, что просмотр одного хоккейного матча по телевизору дает дозу около 0.01 мкЗв.

Облучение в 5мЗв за год (или 0.5-0.6 Зв/час) считается допустимым для населения (для персонала АЭС –в 10 раз больше), так же, как и разовая доза 0.1 –0.2 Зв при аварийном облучении.

При получении однократной дозы, начиная с 0.5 Зв, наблюдается кратковременное изменение состава крови и нарушение работы желудочно-кишечного тракта. При дозе в 1 Зв и более развиваются симптомы лучевой болезни различной степени тяжести. Доза в 4.5 Зв является половинной летальной дозой, т.е. при ее получении погибает 50% облученных, а доза 6 Зв безусловно смертельна.

Согласно исследованиям, проведенным во Франции, ФРГ, Италии, Японии и США, примерно 95% населения этих стран живет в местах, где мощность дозы облучения в среднем составляет от 0.3 до 0.6 мЗв/год. Некоторые группы населения получают значительно большие дозы облучения: около 3% получает в среднем 1 мЗв/год, а примерно 1.5 % - более 1.4 мЗв/год.

Есть, однако, такие места, где уровни земной радиации намного выше. Например, на небольшой возвышенности, расположенной в 200 км от Сан-Паулу в Бразилии, уровень радиации в 800 раз превосходит средний и достигает примерно 250 мЗв/год. По каким-то причинам возвышенность оказалась необитаемой. Лишь чуть меньшие уровни радиации была зарегистрированы на морском курорте Гуарапари с населением примерно 12000 человек, расположенном в 600 км к востоку от этой возвышенности. Каждое лето Гуарапари становится местом отдыха примерно 30000 курортников. На отдельных участках его пляжей зарегистрирован уровень радиации 175 мЗв/год. Радиация на улицах города намного ниже – от 8 до 15 мЗв/год, но все же значительно превышает средний уровень.

Сходная ситуация наблюдается в рыбацкой деревушке Меаипе, расположенной в 50 км к югу от Гуарапари. Оба населенных пункта стоят на песках, богатых торием.

В другой части земного шара на юго-западе Индии 70000 человек живут на узкой прибрежной полосе длиной 55 км, вдоль которой также тянутся пески, богатые торием. Исследования, охватившие 8513 человек из числа проживающих на этой территории, показали, что данная группа лиц получает

в среднем 3.8 мЗв/год на человека. Из них более 500 человек получают свыше 8.7 мЗв/год. Около шестидесяти человек годовую дозу, превышающую 17 мЗв/год, что существенно превышает годовую дозу внешнего облучения от земных источников радиации.

Территории в Бразилии и Индии – наиболее хорошо изученные «горячие точки» нашей планеты. Но в Иране, например, в районе городка Рамсер, где бьют ключи, богатые радием, были зарегистрированы уровни радиации 400 мЗв/год. Известны и другие места на земном шаре с высоким уровнем радиации, например во Франции, Нигерии, на Мадагаскаре.

**Источники внутреннего облучения.** В среднем примерно 2/3 эффективной эквивалентной дозы облучения, которую человек получает от естественных источников радиации, поступает от радиоактивных веществ, попавших в организм с пищей, водой и воздухом. Совсем небольшая часть этой дозы приходится на радиоактивные изотопы типа углерода- 14 и трития, которые образуются под действием космических лучей. Все остальное поступает от источников земного происхождения. В среднем, человек получает около 180 мкЗв/год за счет калия- 40, который усваивается организмом вместе с нерадиоактивными изотопами калия, необходимыми для жизнедеятельности организма.

Значительно большую дозу внутреннего облучения человек получает от нуклидов радиоактивного ряда урана- 238 и в меньшей степени- от радионуклидов ряда тория – 232. некоторые из них, например нуклиды свинца и полония, поступают в организм с пищей. Они концентрируются в рыбе и моллюсках, поэтому люди, потребляющие много рыбы и других даров моря, могут получить относительно высокие дозы облучения.

Десятки тысяч людей на Крайнем Севере питаются в основном мясом северного оленя (карибу), в котором радиоактивные изотопы свинца и полония присутствуют в довольно высокой концентрации. Особенно велико содержание полония- 210. Эти изотопы попадают в организм оленей зимой, когда они питаются лишайниками, в которых накапливаются оба изотопа.

Дозы внутреннего облучения человека от полония- 210 в этих случаях могут в 35 раз превышать средний уровень.

В другом земном полушарии люди, живущие в Западной Австралии в местах с повышенной концентрацией урана, получают дозы облучения, в 75 раз превосходящие средний уровень, поскольку едят мясо и требуху овец и кенгуру. Прежде чем попасть в организм человека, радиоактивные вещества, как и в рассмотренных выше случаях, проходят по сложным маршрутам в окружающей среде, и это приходится учитывать при оценке доз облучения, полученных от какого-либо источника.

**Искусственные источники радиоактивного излучения.** За последние несколько десятилетий человек создал сотни искусственных радионуклидов и научился использовать энергию атома в самых разных целях: в медицине, для создания атомного оружия, для производства энергии и обнаружения пожаров, для изготовления светящихся циферблатов часов и поиска полезных ископаемых. Все это приводит к увеличению дозы облучения как отдельных людей, так и населения Земли в целом. Индивидуальные дозы, получаемые разными людьми от искусственных источников радиации, сильно различаются. В большинстве случаев эти дозы весьма невелики, но иногда облучение за счет техногенных источников оказывается во много тысяч раз интенсивнее, чем за счет естественных. Как правило, для техногенных источников радиации упомянутые различия выражены гораздо сильнее, чем для естественных. Кроме того, порождаемое им излучение обычно легче контролировать, хотя облучение, связанное с радиоактивными осадками от ядерных взрывов, почти также невозможно контролировать, как и облучение, обусловленное космическими лучами или земными источниками.

**Источники радиации, используемые в медицине.** Существенный вклад в облучение вносят источники радиации, применяемые в медицине как в диагностических целях, так и для лечения. Один из самых распространенных медицинских приборов – рентгеновский аппарат.

Получают все более широкое распространение и новые сложные диагностические методы, основанные на применении радиоизотопов. Как ни парадоксально, но одним из методов борьбы с раком является лучевая терапия. Понятно, что индивидуальные дозы, получаемые разными людьми, сильно варьируются от нуля (у тех, кто ни разу не проходил даже рентгенологического обследования) до многих тысяч среднегодовых естественных доз (у пациентов, которые лечатся от рака). Иногда для существенного повышения эффективности диагностики нужно лишь слегка увеличить дозу. Как бы то ни было, пациент должен получать минимальную дозу при обследовании и здесь имеются резервы значительного уменьшения облучения. Благодаря техническим усовершенствованиям аппаратуры можно уменьшить дозы, получаемые пациентами. Максимальное уменьшение площади рентгеновского пучка, его фильтрация, убирающая лишнее излучение, использование более чувствительных пленок, правильная экранировка и точная фокусировка радиоактивного пучка – все это уменьшает дозу. Со времени открытия рентгеновских лучей самым значительным достижением в разработке методов рентгенодиагностики стала компьютерная томография, которая находит все большее применение.

### **Методы наблюдения и регистрации радиоактивного излучения**

Практически все методы наблюдения и регистрации радиоактивного излучения и частиц основаны на их способности производить ионизацию и возбуждение атомов среды. Заряженные частицы вызывают такие процессы непосредственно, а гамма-кванты и нейтроны обнаруживаются по ионизации, вызываемой возникающими в результате их взаимодействия с электронами и ядрами атомов среды быстрыми заряженными частицами. Вторичные эффекты, сопровождающие рассмотренные процессы, такие, как вспышка света, электрический ток, потемнение фотопластинки. Позволяют



рассматривать пролетающие частицы, считать их, отличать друг от друга и измерять их энергию.

Приборы, применяемые для регистрации радиоактивного излучения и частиц, делятся на две группы:

- Для регистрации частиц, проходящих через определенную область пространства; в некоторых случаях они способны определять характеристики частиц, например, их энергию; к таким приборам относятся сцинтилляционный счетчик, черенковский счетчик, импульсная ионизационная камера, газоразрядный счетчик, полупроводниковый счетчик;
- Позволяющие наблюдать либо фотографировать следы (треки) частиц в веществе (камера Вильсона, диффузионная камера, пузырьковая камера, ядерные фотоэмульсии).

**Сцинтилляционный счетчик** - детектор ядерных частиц, основными элементами которого являются сцинтиллятор (кристаллофосфор) и фотоэлектронный умножитель, позволяющий преобразовывать слабые световые вспышки в электронные импульсы, регистрируемые электронной аппаратурой. Сцинтилляционные счетчики обладают высоким разрешением по времени ( $10^{-10} - 10^{-5}$  сек), определяемым родом регистрируемых частиц, сцинтиллятором с разрешающим временем используемой электронной аппаратуры. Для данных счетчиков эффективность регистрации – отношение числа зарегистрированных частиц к их полному числу - примерно 100% для заряженных частиц и 30% для гамма-квантов. Для многих сцинтилляторов интенсивность световой вспышки пропорциональна энергии первичной частицы, и счетчики на этих сцинтилляторах могут применяться для определения энергии регистрируемых частиц.

**Черенковский счетчик** регистрирует частицу практически мгновенно (при движении заряженной частицы в среде со скоростью, превышающей фазовую скорость света в данной среде, возникает вспышка,

преобразуемая с помощью фотоумножителя в импульс тока). Он позволяет отделить элементарные частицы друг от друга при энергиях порядка 10 ГэВ. Время разрешения счетчиков достигает  $10^{-9}$  сек. Черенковские счетчики устанавливаются на космических кораблях для исследования космического излучения.

**Импульсная ионизационная камера** – это детектор частиц, действие которого основано на способности заряженных частиц вызывать ионизацию газа. Ионизационная камера представляет собой электрический конденсатор, заполненный газом, к электродам которого подается постоянное напряжение. Регистрируемая частица, попадая в пространство между электродами, ионизирует газ. Ионизационные камеры бывают двух типов: *интегрирующие* (измеряют суммарный ионизационный ток) и *импульсные*, являющиеся по существу счетчиками (они регистрируют отдельную частицу и измеряют ее энергию, правда, с небольшой точностью из-за слабого выходного сигнала).

**Газоразрядный счетчик** обычно выполняется в виде наполненного газом металлического цилиндра (катода) с тонкой проволокой (анодом), натянутой вдоль его оси. Хотя газоразрядные счетчики конструктивно похожи на ионизационную камеру, однако в них основную роль играет вторичная ионизация, обусловленная столкновениями первичных ионов с атомами и молекулами газа и стенок. Различают два вида счетчиков: *пропорциональные* (в них газовый разряд несамостоятельный, т.е. гаснет при прекращении действия ионизатора) и *счетчики Гейгера-Мюллера* ( в них разряд самостоятельный, т.е. поддерживается после прекращения действия ионизатора). Пропорциональные счетчики не только регистрируют частицу, но и измеряют ее энергию. При этом импульсы, вызываемые отдельными частицами, усиливаются в  $10^3 - 10^4$  раз (иногда в  $10^6$  раз). Счетчики Гейгера-Мюллера регистрируют частицу без измерения ее энергии. Коэффициент усиления их составляет около  $10^8$ , а временное разрешение –  $10^{-3} - 10^{-7}$  сек. Для газоразрядных счетчиков эффективность

регистрации равна примерно 100 % для заряженных частиц и примерно 5% для гамма-квантов.

**Полупроводниковый счетчик** – это детектор частиц, рабочим элементом которого служит полупроводниковый диод. Время разрешения их составляет примерно  $10^{-9}$ сек. Полупроводниковые счетчики обладают высокой надежностью и могут работать в магнитных полях. Однако малая толщина их рабочей области (порядка сотни микрометров) не позволяет применять их для регистрации высокоэнергетических частиц.

**Камера Вильсона** – старейший и на протяжении многих десятилетий (вплоть до 50-60 годов) единственный тип трекового детектора. Выполняется обычно в виде стеклянного цилиндра с плотно прилегающим поршнем. Цилиндр наполняется газом (гелием или аргоном), насыщенным парами воды или спирта. При резком адиабатическом расширении газа пар становится перенасыщенным и на траекториях частиц, пролетающих через камеру, образуются треки из тумана. Образовавшиеся треки для воспроизводства их пространственного расположения фотографируются стереоскопически, т.е. под разными углами. По характеру и геометрии треков можно судить о типе прошедших через камеру частиц (например, альфа- частица оставляет сплошной след, бета-частица –тонкий), об энергии частиц ( по длине пробега), о плотности ионизации (по количеству капель на единицу длины трека), о числе участвующих в реакции частиц.

**Диффузионная камера**- Разновидность камеры Вильсона. Рабочим веществом в ней также является перенасыщенный пар, но состояние перенасыщения создается диффузией паров спирта от нагретой (до  $10^0$  С) крышки ко дну, охлажденному (до –  $60^0$  С) твердой углекислотой. Вблизи дна возникает слой пересыщенного пара толщиной примерно 5 см, в котором пролетающие заряженные частицы создают треки.

**Пузырьковая камера** содержит рабочее вещество в виде перегретой (находящейся под давлением) прозрачной жидкости (Жидкий водород,

пропан, ксенон). Запускается камера так же, как и камера Вильсона – резким сбросом давления, переводящим жидкость в жидкое перегретое состояние. Пролетающая через камеру заряженная частица вызывает резкое вскипание жидкости, и траектория частицы обозначается цепочкой пузырьков пара – образуется трек, который, как и в камере Вильсона, фотографируется. Пузырьковая камера работает циклами. Размеры пузырьков камер примерно такие же, как и камеры Вильсона (от десятков сантиметров до 2 м), но их эффективный объем на 2-3 порядка больше, так как жидкости гораздо плотнее газов. Это позволяет использовать пузырьковые камеры для исследования длинных цепей рождения и распадов частиц высоких энергий.

**Ядерные фотозмульсии** – это простейший детектор заряженных частиц. Прохождение заряженной частицы в эмульсии вызывает ионизацию, приводящую к образованию центров скрытого изображения. После проявления следы заряженных частиц обнаруживаются в виде цепочки зерен металлического серебра. Фотозмульсии применяются для изучения реакций, вызываемых частицами в ускорителях сверхвысоких энергий и в космических лучах.

Методы наблюдения и регистрации заряженных частиц и излучений настолько разнообразны, что их детальное описание невозможно. Но тем не менее следует упомянуть еще об одном приборе – *искровой камере*, сочетающей в себе преимущества счетчиков (быстрота регистрации) и трековых детекторов (полнота информации о частицах). По своему принципу действия она представляет собой набор большого числа мелких счетчиков.

Для регистрации мощности экспозиционной дозы широко применяются *бытовые дозиметры*. Рабочим элементом большинства модификаций бытовых дозиметров служит полупроводниковый диод. Бытовые дозиметры позволяют измерять мощность экспозиционной дозы гамма - и бета-излучений. Диапазон измеряемой мощности составляет от



Аналогичные измерения проводят 10 раз в разных точках помещения.

После завершения измерений дозиметр выключается.

Среднее значение мощности экспозиционной дозы естественного фона рассчитывают по формуле:

$$\langle N \rangle = \left( \sum_{i=1}^{10} N_i \right) / 10$$

Вычисляются абсолютная и относительная ошибки.

Окончательный результат следует представить в форме:

<p>Мощность экспозиционной дозы</p> $N = (\langle N \rangle \pm \Delta N) \text{ мкР/ч}$ $E_N = \dots \%$
---

### Контрольные вопросы

1. Назовите три типа радиоактивного излучения.
2. Какой из трех типов радиоактивного излучения обладает наибольшей ионизирующей способностью?
3. Почему гамма-излучение обладает высоко проникающей способностью?
4. Какова длина волны гамма-излучения?
5. Что служит количественной характеристикой ионизирующего излучения?
6. Что такое мощность экспозиционной дозы?
7. В каких единицах измеряется эквивалентная доза?
8. Назовите основные источники радиоактивного излучения

9. От чего зависит доза облучения?
10. Какова природа космических лучей?
11. Как влияет магнитное поле на космические лучи?
12. Какова мощность годовой эквивалентной дозы естественного радиоактивного фона?
13. какова допустимая доза облучения населения?
14. Назовите летальную дозу облучения.
15. Приведите данные, характеризующие повышенную радиацию в некоторых местах земного шара.
16. Что является источником внутреннего облучения?
17. Как ограничивается воздействие искусственных источников радиации при их практическом применении?
18. Назовите основные группы приборов для регистрации радиоактивного излучения и частиц.
19. На чем основан принцип действия сцинтилляционного счетчика?
20. Можно ли определить энергию частицы при ее регистрации счетчиком Гейгера-Мюллера?
21. каковы преимущества полупроводниковых счетчиков?
22. Дайте краткую характеристику бытовых дозиметров.
23. Что обычно определяется с помощью бытового дозиметра?
24. Как влияет естественный радиоактивный фон на живые организмы?
25. Изменяется ли радиоактивный фон со временем?

### **Список литературы**

1. Савельев И.В. курс общей физики. – М.: Наука, 1990, т.2.
2. Карпенков С.Х. Концепции современного естествознания. –ЮНИТИ, 1997.