

LABORATORY WORKS FOR STUDENTS ON NATURAL AIR RADIOACTIVITY
Kudrya S.¹, Zarochentseva E.², Bukina M.³, Vysotskaya S.⁴, Belov S.⁵
ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ДЛЯ ШКОЛЬНИКОВ ПО ЕСТЕСТВЕННОЙ
РАДИОАКТИВНОСТИ ВОЗДУХА

Кудря С. А.¹, Зароченцева Е. П.², Букина М. Н.³, Высотская С. О.⁴, Белов С. Е.⁵

¹Кудря Светлана Александровна / Kudrya Svetlana - кандидат физико-математических наук, старший преподаватель;

²Зароченцева Елена Петровна / Zarochentseva Elena - кандидат физико-математических наук, старший преподаватель;

³Букина Мария Николаевна / Bukina Maria - кандидат физико-математических наук, доцент;

⁴Высотская Софья Олеговна / Vysotskaya Sofya - кандидат физико-математических наук, доцент,
кафедра общей физики-2, физический факультет,
Санкт-Петербургский государственный университет;

⁵Белов Сергей Евгеньевич / Belov Sergei - кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник,
АО «Радиевый институт им. В. Г. Хлопина», г. Санкт-Петербург

Аннотация: приводится описание лабораторной работы «Естественная радиоактивность воздуха», поставленной в Учебной лаборатории физического эксперимента СПбГУ. Описание предназначено для школьников старших классов общеобразовательных школ с углубленным изучением физики. В описании к работе приведены основные сведения о естественной радиоактивности, ее происхождении; свойствах радионуклидов, видах радиоактивности; рассматривается закон радиоактивного распада. Может быть использовано для постановки опытов в школе или вузах при проведении занятий со школьниками.

Abstract: the laboratory work "The natural radioactivity of the air" is described. This work is developed in St. Petersburg State University and intended for students of secondary schools with in-depth study of physics. Description of the work provides basic information about natural radioactivity, properties of radionuclides, the kinds of radioactivity; it considered the law of radioactive decay. It can be used for design of experiments in school. Laboratory work can be done with a simple and inexpensive equipment which is available to schools.

Ключевые слова: лабораторная работа, радиоактивность воздуха, период полураспада.

Keywords: laboratory work, air radioactivity, half-life.

Введение

Человек находится в условиях природного (естественного) облучения, обусловленного как пришедшими из космоса частицами (космические лучи), так и внешним излучением от почвы, воды, воздуха, пищи и строительных материалов (создаётся радиоактивными нуклидами, широко распространёнными в природе). Это облучение называется *фоновым облучением*.

Космические лучи приходят к Земле в основном из межзвездного пространства и, взаимодействуя с ядрами элементов, находящимися в верхних слоях атмосферы на высоте более 15 км, практически полностью поглощаются. В результате в атмосфере образуются радиоактивные ядра и вторичные частицы, которые в свою очередь тоже могут создавать радионуклиды [1].

В период формирования нашей планеты, т.е. около 4,6 млрд лет назад, в земле образовались изотопы ^{40}K , ^{87}Rb , ^{237}Np и др.). Часть из них были радиоактивными изотопами с относительно коротким временем жизни и по этой причине уже распались. Поэтому за естественную радиоактивность ответственными являются лишь те элементы, периоды полураспада которых сравнимы с возрастом Земли. Почти все эти радиоактивные элементы связаны с тремя радиоактивными рядами, или «семействами», первые родительские элементы которых имеют период полураспада порядка миллиарда лет. Серия последовательных распадов, содержащих иногда до 15 промежуточных элементов в каждом из трех радиоактивных рядов, в конце концов заканчивается образованием стабильного изотопа свинца (Pb). В каждом семействе обязательно присутствует изотоп радона (Rn , $Z=86$), который существует лишь в газообразном состоянии и относится к инертным газам. Инертные газы практически не способны к химическим реакциям и поэтому свободно выходят из земной коры и попадают в атмосферу, что в свою очередь обуславливает естественную радиоактивность атмосферного воздуха наряду с пришедшим из космоса излучением. Радиоактивные изотопы из земной коры попадают в почву, вымываясь грунтовыми водами, и поступают в организм человека вместе с пищей. В своей жизнедеятельности человек использует материалы, добываемые из недр Земли, которые также содержат радиоактивные элементы.

Уровни естественного облучения в определённом месте практически остаются неизменными во времени, но от района к району в зависимости от геологических условий они могут различаться. Эволюция всего живого на Земле происходила в условиях этой естественной радиации. Однако, в

Цель настоящей работы: познакомиться с понятием радиоактивности, основным законом радиоактивного распада, активностью источника; провести наблюдение естественной радиоактивности воздуха, обусловленной распадом радона и оценить средний период полураспада смеси изотопов во взятой пробе.

Естественная радиоактивность. Основные виды радиоактивности

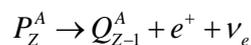
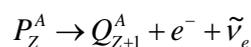
Ядра атомов могут самопроизвольно (спонтанно) испускать частицы, превращаясь в другие ядра. Это явление получило название радиоактивность. Распадающиеся ядра называют материнскими, а образующиеся после распада ядра — дочерними. Некоторые дочерние ядра оказываются стабильными, другие — радиоактивными [3].

Существуют два вида распада: альфа-распад и бета-распада. Вид распада определяется испускаемой из ядра частицей. В процессах альфа-распада испускаемой частицей является ядро гелия:

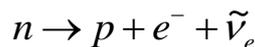


Впервые α -излучение обнаружил А.А. Беккерель в 1896 г. Альфа-распад наблюдается у тяжёлых ядер, для большинства из которых число Z больше 82.

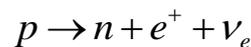
В процессах бета-распада ядро испускает электрон и антинейтрино или же позитрон и нейтрино по следующей схеме:



Этот вид радиоактивности возможен для ядер с любыми значениями атомного числа, включая нейтрон ($Z=0$), являющийся самым лёгким из всех радиоактивных объектов. При β -распадах в ядре происходит превращение нейтрона в протон, электрон и электронное антинейтрино



Или превращение протона в нейтрон, позитрон и нейтрино



При этих превращениях количество нуклонов A в ядре не изменяется, а зарядовое число Z изменяется на ± 1 .

Распада ядер обычно сопровождается испусканием электромагнитного коротковолнового излучения, так называемых гамма-лучей.

Основной закон радиоактивного распада, активность источника

Если взять некоторое количество радиоактивного вещества, т. е. такого, которое испускает альфа- или бета-частицы, то наблюдая за изменением этого количества можно установить, что каждый раз по прошествии вполне определенного интервала времени вещества становится меньше и меньше. То же оказывается верным и для количества испускаемых веществом частиц. Оказывается, что количество испускаемых за единицу времени частиц прямо пропорционально имеющемуся в настоящее время количеству вещества [4]:

$$dN = -\lambda \cdot N \cdot dt \quad (1)$$

где N — полное число тождественных нестабильных ядер, имеющих в образце в момент времени t , dN — полное число испущенных частиц за малый промежуток времени dt . Константа λ называется постоянной радиоактивного распада для данного вида радиоактивности.

Эксперимент подтверждает формулу (1). Поэтому имеем

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}, \quad (2)$$

где N_0 — число нестабильных ядер в начальный момент времени.

В качестве примера рассмотрим ядро Ra , для которого $\lambda = 1,357 \cdot 10^{-11} \text{ с}^{-1}$. Из данного значения λ следует, что в среднем за каждую секунду распадается одно ядро из приблизительно семидесяти миллиардов ($1/\lambda$).

Постоянная распада λ не зависит от внешних условий, в которых находится источник (температура, давление, внешнее магнитное поле, химическое состояние элемента в момент распада и т.д.), поскольку ядро защищено от внешних воздействий электронной оболочкой атома. В некоторых случаях защита не столь совершенна, и тогда значения λ могут несколько различаться в зависимости от условий опыта. Например, на величину λ влияет химическая структура соединения, величина ($\Delta\lambda/\lambda$) практически прямо пропорциональна давлению и пр. Последнее явление используется для измерения очень больших

давлений.

Период полураспада

В практической деятельности неудобно пользоваться величиной λ , гораздо удобнее характеризовать радиоактивные элементы их периодами полураспада $T_{1/2}$. Период полураспада — это такое время, за

которое распадается половина взятых начальных радиоактивных ядер $N = N_0 / 2$. Эта величина связана с

постоянной λ следующим соотношением:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \approx \frac{0,693}{\lambda} = 0,693 \cdot \tau.$$

Закон радиоактивного распада (2) через период полураспада имеет вид:

$$N = N_0 \cdot e^{-\frac{0,693t}{T_{1/2}}}.$$

По истечении времени, в k раз большего периода полураспада, число нераспавшихся ядер будет равно

$$N = N_0 \cdot e^{-\frac{0,693kt}{T_{1/2}}} = \frac{N_0}{2^k}.$$

Т.е. через каждый интервал времени $T_{1/2}$ распадается половина имеющихся ядер. По тому же закону падает и интенсивность испускаемых альфа- и/или бета-частиц [5] (см. рис.1).

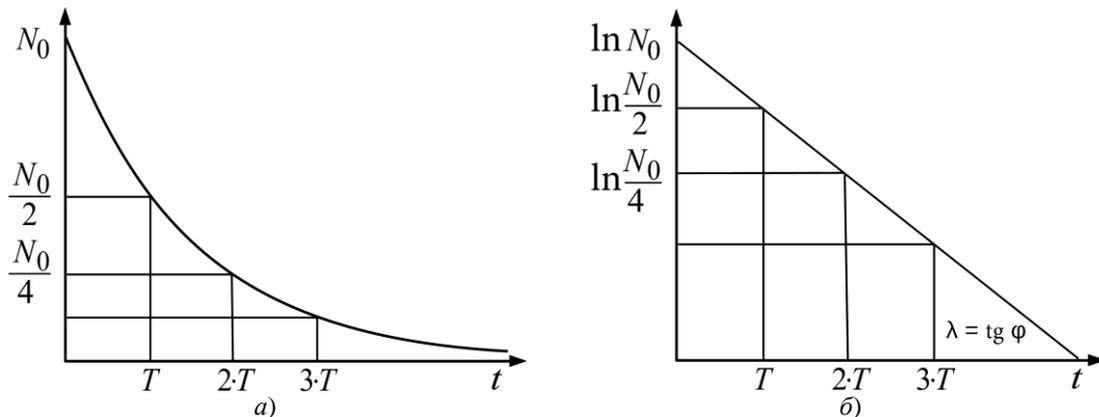


Рис. 1. Экспоненциальное убывание активности во времени: а – линейный масштаб по оси ординат; б – логарифмический масштаб по оси ординат

Активность источника радиоактивного излучения

Уравнением (1) определяется активность (A) радиоактивного препарата: это число распадов в 1 секунду. За единицу измерения активности принимается 1 распад в секунду, что соответствует $dN / dt = 1$. Определённая таким образом единица активности называется беккерелем (Бк). Эта единица измерения очень мала. Чаще пользуются кратными ей величинами — килобеккерелем (кБк), мегабеккерелем (МБк) и гигабеккерелем (ГБк). Для радиоактивного источника с заданной активностью требуется тем меньшее количество радиоактивного препарата, чем меньше его период полураспада. Приведём порядки величин

активности некоторых радиоактивных источников. Радон Rn^{222} , содержащийся в 1 м³ атмосферного воздуха, имеет активность около 4 Бк. Урановая руда массой 1 кг с 10% содержанием чистого урана обладает активностью 130 кБк. Промышленные источники имеют активность от 4 до 40 ГБк.

Радиоактивные препараты на основе Co^{60} , используемые в медицине для радиотерапии, имеют активность от 75 до $200 \cdot 10^6$ ГБк. Активность источников при проведении химического анализа образцов, составляет около 10^6 ГБк. Атомная бомба, эквивалентная 20 кг тринитротолуола (ТНТ), через минуту после взрыва создаёт активность $\sim 7,4 \cdot 10^{13}$ ГБк.

Изучение естественной радиоактивности атмосферного воздуха

Несмотря на малые концентрации естественных радиоактивных изотопов в атмосферном воздухе, их

присутствие может быть обнаружено сравнительно простыми методами. Например, чтобы в лабораторных условиях обнаружить и исследовать естественную радиоактивность атмосферного воздуха, достаточно сконцентрировать содержащиеся в воздухе радиоактивные изотопы на какой-нибудь поверхности и затем измерить её активность.

Рассмотрим метод фильтрации, суть которого состоит в следующем: некоторый объем воздуха пропускается через специальные фильтры, активность которых затем измеряется.

Естественная радиоактивность атмосферного воздуха обусловлена распадом радона. Продукты распада радона являются металлами. Атомы металлов могут находиться в атмосфере в свободном состоянии непродолжительное время. При соприкосновении с твёрдыми нерадиоактивными частицами пыли или капельками воды, всегда присутствующими в воздухе, эти атомы (продукты распада радона) присоединяются к ним, образуя радиоактивные аэрозоли (центры) больших размеров. Твёрдые частицы такого размера при пропускании воздуха через фильтр улавливаются фильтром и таким образом можно сконцентрировать естественную радиоактивность некоторого исследуемого объёма атмосферного воздуха в небольшом объёме фильтра. В качестве фильтров можно использовать фильтровальную бумагу или плотную вату.

Последующее измерение активности фильтра не является сложной задачей и может быть осуществлено детекторами ядерных излучений.

В данной работе предлагается провести измерение уровня естественной радиоактивности воздуха в помещении лаборатории и/или на открытом воздухе и определить период полураспада смеси изотопов, осевших на фильтрах. Во всех случаях обнаружение и исследование естественной радиоактивности проводится методом фильтрации с дальнейшим измерением активности фильтра.

Итак, в результате продувания воздуха через фильтр радон будет проходить через фильтр, а пылинки с радиоактивными ядрами будет задерживаться в объёме фильтра. Иными словами, в небольшом объёме

фильтра будут сконцентрированы бета-радиоактивные ядра ${}_{82}^{214}\text{Pb}$ и ${}_{83}^{214}\text{Bi}$, а также альфа-

радиоактивные ядра ${}_{84}^{218}\text{Po}$ и ${}_{84}^{214}\text{Po}$. Фильтр после продувания воздуха помещают в детектирующее

устройство и измеряют его активность, т.е. измеряют число испущенных частиц за некоторый промежуток времени. Поскольку нас интересует не только количество распадов, но и убывание радиоактивности со временем, измерение активности фильтра нужно провести в течение 1,5 – 2 часов, записывая показания счётчика каждые 5 – 10 минут. В первые минуты (порядка 16 мин) после завершения продувки устанавливается равновесие, поэтому в начале измерений активность фильтра может не уменьшаться, а немного возрастать. По результатам измерений строят графики зависимостей N и $\ln N$ от времени. За начало отсчёта по времени нужно принять момент завершения продувания воздуха. Анализ графиков позволяет определить *эффективный* период полураспада смеси изотопов, осевших на фильтре. Не следует забывать, что необходимо провести измерение активности фильтра перед началом продувания воздуха, так называемое измерение фона. Время измерения фона 5 – 15 минут.

Таким образом, последовательность действий такова:

1. Измерить активность фильтра до продувания через него воздуха, поскольку при измерениях радиоактивности необходимо вводить поправку на излучение, создаваемое космическими частицами и естественной радиоактивностью окружающих предметов. Принять это значение активности за фон.

2. Прокачать воздух через фильтр. Время продувания воздуха не менее 10-15 минут.

3. Сразу после продувания воздуха поместить фильтр в детектирующее устройство и записывать показания счётчика каждые 5-10 минут.

4. Построение графиков, вычисления и анализ результатов.

По результатам измерений получим таблицу 1.

Таблица 1. Результаты измерений

t , мин	N изм	$N = N_{\text{изм}} - N_{\text{ф}}$	$\sigma = (N_{\text{изм}} - N_{\text{ф}})^{\frac{1}{2}}$
5			
10			
и т.д.			

По данным из таблицы следует построить график зависимости счета N от времени t . Если масштаб позволяет, то для каждой точки следует указать вертикальной чертой неопределённость измерения σ (см. рис. 2).

Используя график зависимости $N(t)$ определить время, за которое активность фильтра с пробой уменьшается в два раза, в четыре, в восемь раз [5]. Также можно проследить, как изменяется эффективное значение периода полураспада в зависимости от времени, прошедшего от начала измерений (см. рис. 2). По полученным результатам вычислить среднее значение периода полураспада и оценить неопределённость полученного значения.

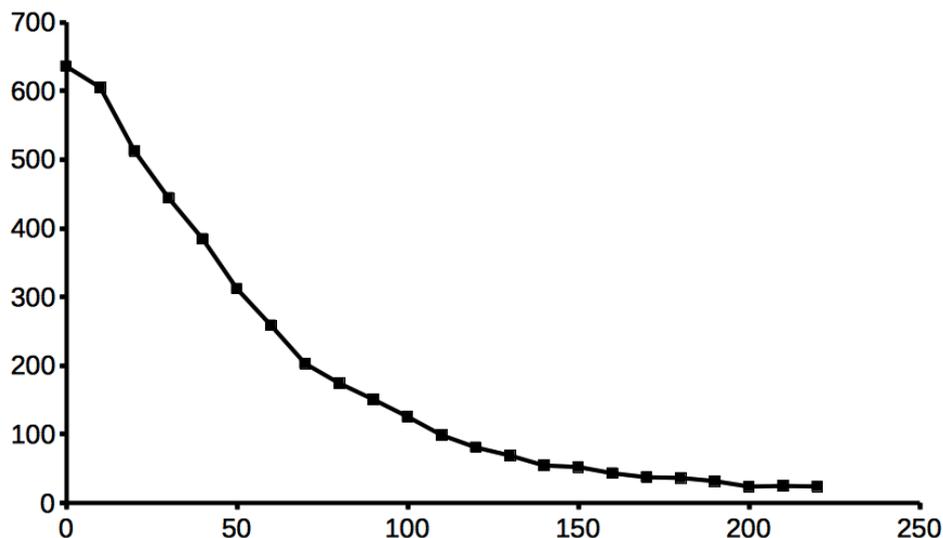


Рис. 2. Экспериментальные данные измерения радиоактивного распада в линейном масштабе. Ошибки измерений показаны вертикальными линиями.

Контрольные вопросы

- 1) Что такое естественное (фоновое) облучение?
- 2) Что такое космические лучи и из чего они состоят?
- 3) Какие элементы ответственны за естественную радиоактивность и откуда они появились?
- 4) Что такое радиоактивное семейство элементов?
- 5) Чем обусловлена естественная радиоактивность почвы и воздуха? От чего зависит уровень излучения?
- 6) Назовите три изотопа радона. Который из них вносит наибольший вклад в радиоактивность воздуха?
- 7) Как влияет режим использования помещения на уровень естественной радиоактивности в нём?
- 8) Что такое естественная радиоактивность. Назовите основные виды радиоактивных превращений.
- 9) Каков основной закон радиоактивного распада? Что такое постоянная распада, период полураспада, активность источника?
- 10) Как зарегистрировать естественную радиоактивность воздуха?

Литература

1. Гусев Н. Г. и др. Защита от ионизирующих излучений. М.: Атомиздат, 1969.
2. Баранов В. И. и др. Лабораторные работы и задачи по радиометрии. М.: Атомиздат, 1964.
3. Блан Д. Ядра, частицы, ядерные реакторы. М.: Мир, 1989.
4. Ландсберг Г. С. Элементарный учебник физики. М.: Наука, 1973.
5. Сергеев В. О. и др. Практикум по ядерной физике. СПб.: СОЛО, 2006.