

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4.13

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА РАДОНА

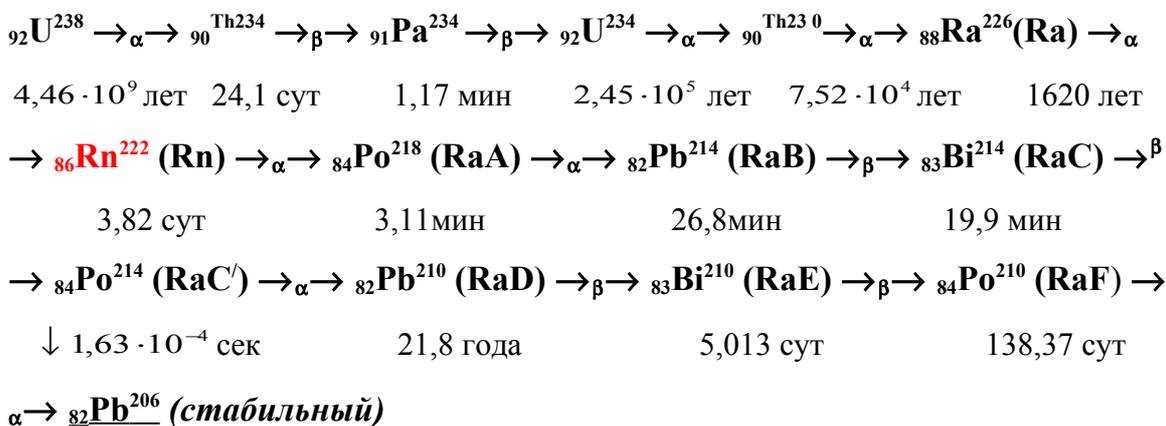
Цель работы: Определение концентрации радона и продуктов его распада в воздухе, оценка эффективного периода полураспада смеси изотопов.

Приборы и принадлежности: индикатор ионизирующих частиц, счетное устройство, стабилизированный источник питания, пылесос, таймер, волокнистые фильтры, крепежные устройства для фильтров.

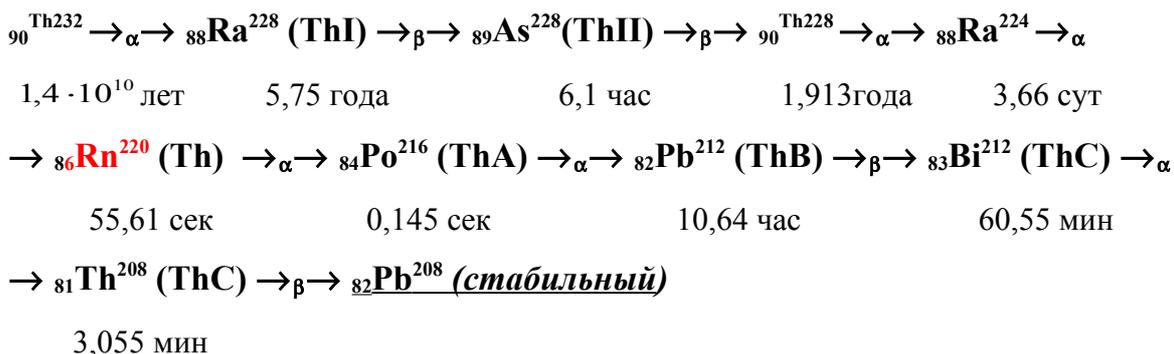
ВВЕДЕНИЕ

I. Основную часть радиоактивного облучения население земного шара получает от естественных источников. На протяжении всей истории существования Земли разные виды излучения попадают на ее поверхность из космоса и поступают от радиоактивных веществ, находящихся в земной коре. Последние, в основном, и ответственны за облучение, которому подвергается человек от естественной радиации. Радиационный фон, создаваемый космическими лучами, дает меньше трети всего внешнего облучения, получаемого населением от естественных источников радиации.

Основные радиоактивные изотопы, встречающиеся в горных породах Земли, – это калий-40, рубидий-87 и члены двух радиоактивных семейств, берущих начало от урана-238 и тория-232, долгоживущих изотопов, образовавшихся во время рождения Земли. Наиболее значимым из всех естественных источников радиации является радон (Rn) – невидимый, не имеющий вкуса и запаха, тяжелый (в 7,5 раз тяжелее воздуха) газ. Радон вместе со своими дочерними продуктами распада ответственен примерно за 3/5 годовой эквивалентной дозы облучения, получаемой населением от земных источников радиации. Этот источник радиации, связанной с получением дозы облучения поверхностью легких при вдыхании воздуха, не признавали до относительно недавнего времени. В природе радон встречается в двух основных формах: в виде Rn-222, члена радиоактивного ряда, образуемого продуктами распада урана-238:



и в виде Rn²²⁰, члена радиоактивного ряда Th²³²:



По вкладу в суммарную дозу облучения Rn^{222} примерно в 20 раз весомее, чем Rn^{220} (торон), однако, как правило, оба изотопа рассматриваются вместе и называются просто *радоном*. Строго говоря, большая часть излучения происходит от дочерних продуктов распада радона, а не от него самого.

Радон высвобождается из земной коры повсеместно. Удельная активность радона в атмосферном воздухе в зависимости от места и времени наблюдения колеблется в пределах от 10^{-15} до $5 \cdot 10^{-13}$ Ки/л. Попадая внутрь организма вместе с вдыхаемым воздухом и частично оседая в легких, α - и β - радиоактивные изотопы радоновой цепочки могут приводить к возникновению местных очагов облучения. Основную часть дозы облучения от радона человек получает, находясь в закрытом, непроветриваемом помещении. В зонах с умеренным климатом концентрация радона в закрытых помещениях в среднем примерно в 8 раз выше, чем в наружном воздухе. Радон концентрируется в воздухе внутри помещений тогда, когда они в достаточной мере изолированы от внешней среды. В результате в помещении может возникнуть довольно высокий уровень радиации, особенно если дом построен на грунте с повышенным содержанием радионуклидов, или если при его постройке использовались материалы с повышенной радиоактивностью. Наиболее распространенные строительные материалы – дерево, кирпич и бетон – выделяют относительно немного радона. Гораздо большей удельной радиоактивностью обладают гранит, пемза, фосфогипс и красный кирпич. Однако основной источник радона в закрытых помещениях – это грунт. Поэтому, как правило, концентрация радона в верхних этажах многоэтажных домов ниже, чем на первом этаже. Герметизация помещений с целью их утепления только усугубляет ситуацию, поскольку выход радиоактивного газа из помещения при этом еще более затрудняется. Эффективным средством уменьшения количества радона, просачивающегося через щели в полу, являются вентиляционные установки в подвалах. При облицовке стен пластиковыми материалами, после покрытия стен слоем краски на эпоксидной основе или тремя слоями масляной краски эмиссия радона из них уменьшается примерно в 10 раз. Даже при оклейке стен обоями скорость эмиссии радона уменьшается примерно на 30%. Проветривание помещений также приводит к существенному снижению в них концентрации радона (рис.4.13.1).

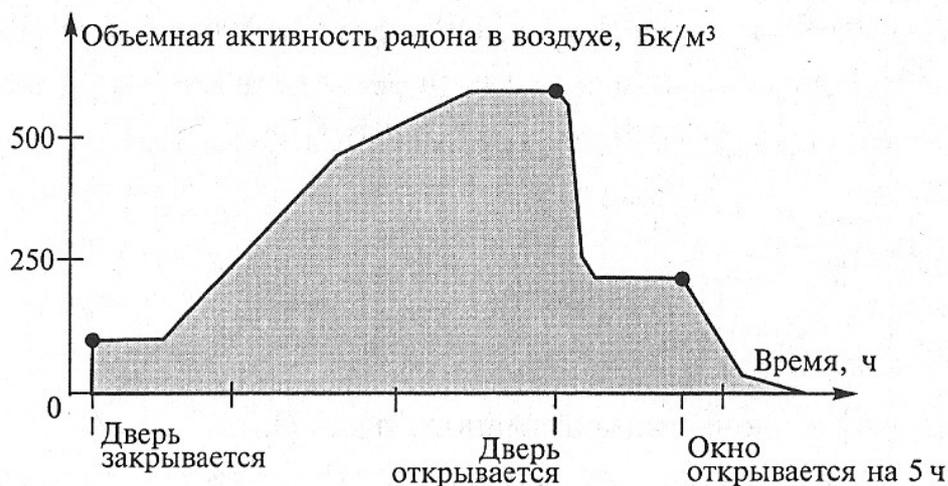


Рис. 4.13.1

Менее важным источником поступления радона в жилые помещения является вода. Концентрация радона в обычно используемой воде, мала, но вода из глубоких колодцев и артезианских скважин содержит очень много радона. Большую опасность представляет попадание паров воды с высоким содержанием радона в легкие вместе с вдыхаемым воздухом, что чаще всего происходит в ванной комнате. Радон проникает также в

природный газ под землей. В результате переработки и в процессе хранения газа значительная часть его улетучивается, но концентрация радона в помещениях может существенно возрасти, если нагревательные устройства, в которых сжигается газ, не снабжены вытяжкой. При наличии же вытяжки, которая сообщается с наружным воздухом, пользование газом практически не влияет на концентрацию радона в помещении.

Эффективная эквивалентная доза облучения от радона и его дочерних продуктов составляет в среднем около 1,3 мЗв/год, то есть больше половины всей годовой дозы, получаемой человеком в среднем от всех естественных источников радиации.

II. Естественная радиоактивность – спонтанный процесс, так что распад каждого отдельного ядра является случайным событием, имеющим определенную вероятность. Число ядер, распавшихся за промежуток времени dt , пропорционально dt и числу наличных нераспавшихся ядер N :

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

Знак “минус” появляется в связи с тем, что число нераспавшихся ядер уменьшается в процессе распада. Постоянная распада λ представляет собой относительную убыль числа ядер в единицу времени. Интегрируя уравнение (1) с начальным условием $N = N_0$ при $t = t_0$, получаем закон радиоактивного распада:

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

Вводя понятие активности образца:

$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N (c^{-1}), \quad (3)$$

закон радиоактивного распада можно представить в виде:

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (4)$$

Из уравнений (2) или (4) устанавливается связь между постоянной распада и периодом полураспада, под которым понимают время, в течение которого распадается половина первоначального числа ядер:

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda} \quad (5)$$

Графическое представление закона радиоактивного распада показано на рис. 4.13.2. и 4.13.3.

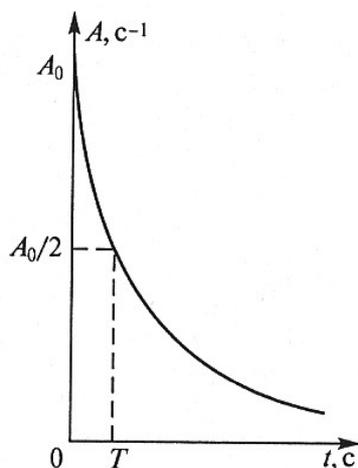


Рис. 4.13.2

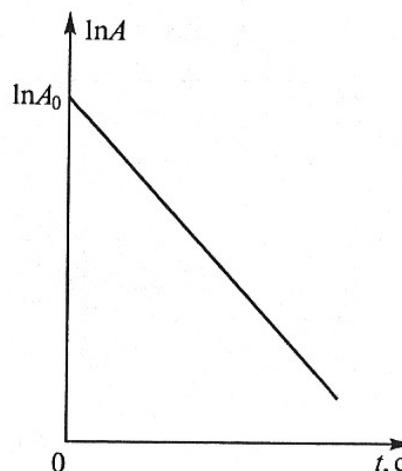


Рис. 4.13.3

При определении постоянной распада можно воспользоваться экспериментально полученными кривыми и формулой:

$$\lambda = \frac{\ln A_0 - \ln A_i}{t_i - t_0} \quad (6)$$

Если ядра N_2 , возникающие в результате радиоактивного распада ядер N_1 , в свою очередь являются радиоактивными, то для описания процесса этих двух последовательных превращений вместо уравнения (2) надо написать систему двух дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{dN_1}{dt} &= -\lambda_1 N_1(t) \\ \frac{dN_2}{dt} &= -\lambda_1 N_1(t) - \lambda_2 N_2(t), \end{aligned} \quad (7)$$

где λ_1 и λ_2 – постоянные распада ядер N_1 и N_2 . Первое уравнение описывает процесс распада первичного (материнского) изотопа. Второе уравнение определяет общее изменение количества ядер вторичного (дочернего) изотопа и содержит два слагаемых. Первое слагаемое дает прирост радиоактивных ядер вторичного изотопа из-за распада первичного и поэтому в точности равно $\lambda_1 N_1(t)$, то есть числу распавшихся ядер первичного изотопа. Второе слагаемое равно числу распавшихся ядер вторичного изотопа. Решение системы уравнений (7) имеет вид:

$$\begin{aligned} N_1(t) &= N_1(0) \cdot e^{-\lambda_1 t} \\ N_2(t) &= N_2(0) \cdot e^{-\lambda_2 t} + \frac{\lambda_1 N_1(0)}{\lambda_2 - \lambda_1} \left(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t} \right), \end{aligned} \quad (8)$$

где $N_1(t)$ и $N_2(t)$ – количество нераспавшихся ядер первичного и вторичного изотопа к моменту времени t ; $N_1(0)$ и $N_2(0)$ – количества ядер при $t=0$.

Если в момент $t=0$ существовал лишь материнский изотоп, то в этом случае $N_2(0)=0$. Характер зависимости количества ядер дочернего изотопа $N_2(t)$ от t определится соотношением констант λ_1 и λ_2 . Если ядра материнского изотопа распадаются значительно быстрее дочернего ($\lambda_1 \gg \lambda_2$), то $N_2(t)$ вначале быстро нарастает, достигает максимума, а затем спадает по экспоненциальному закону (рис. 4.13.4.), определяемому постоянной распада λ_2 .

Аналогичным образом можно рассмотреть последовательный распад трех, четырех и т.д. изотопов.

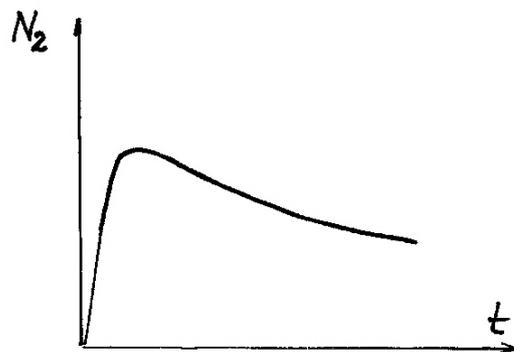


Рис. 4.13.4

III. В данной работе проводится сравнительный анализ уровней естественной радиоактивности воздуха на открытой местности и в помещении, а также опытная проверка закона радиоактивного распада с использованием короткоживущих дочерних продуктов распада радона.

Для того, чтобы в лабораторных условиях проводить обнаружение и исследование естественной α - или β -радиоактивности атмосферного воздуха, необходимо сконцентрировать содержащиеся в воздухе радиоактивные изотопы. Это оказывается возможным, если использовать метод фильтрации, суть которого состоит в том, что определенный объем воздуха прогоняется через бумажные или слоистые волокнистые фильтры. Поскольку все члены радиоактивного семейства урана за радоном являются

металлами, они не могут находиться в атмосфере в свободном состоянии продолжительное время. При встречах с твердыми частицами дыма, пыли (радиусом от 10^{-6} до 10^{-7} см) или капельками тумана, которые всегда присутствуют в атмосферном воздухе, атомы металлов оседают на их поверхности. При оценке уровня естественной радиоактивности атмосферного воздуха обычно учитывают распад таких изотопов, как $^{84}\text{Po}^{218}$, $^{82}\text{Pb}^{214}$, $^{83}\text{Bi}^{214}$, $^{84}\text{Po}^{214}$. Дальнейшие продукты распада радона по радиоактивному ряду можно не рассматривать, так как они имеют большие периоды полураспада и, следовательно, осаждаются или вымываются из атмосферы, не достигая равновесных концентраций. Пропуская воздух через фильтр, улавливающий твердые частицы, можно сконцентрировать в небольшом объеме фильтра радиоактивные изотопы металлов, содержащиеся в исследуемом объеме атмосферного воздуха. Последующее измерение α - или β -активности фильтра может быть осуществлено с помощью сцинтилляционных или газоразрядных счетчиков.

В предлагаемой работе используется счетчик β -частиц, поэтому будет измеряться активность фильтра, определяемая изотопами $^{82}\text{Pb}^{214}$ и $^{83}\text{Bi}^{214}$. Материнскими ядрами этой цепочки являются ядра короткоживущего изотопа $^{84}\text{Po}^{218}$.

Если в момент прекращения прокачки воздуха через фильтр $t=0$ активность вещества, собранного фильтром, была равна A_0 , то в момент времени t его активность $A_\beta(t)$ будет описываться следующей формулой:

$$A_\beta(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda_{\text{эфф}} t} \quad (9)$$

где $A_\beta(t) = A_1(t) + A_2(t)$, с учетом схемы распада радона-222, а $\lambda_{\text{эфф}}$ – эффективная постоянная распада смеси изотопов, находящихся на фильтре.

Так как число частиц, попавших в счетчик, пропорционально β -активности исследуемого фильтра, то

$$n_\beta(t) = n_\beta(0) \cdot e^{-\lambda_{\text{эфф}} t} \quad (10)$$

Таким образом, сняв график зависимости количества β -частиц, попавших в счетчик, от времени, можно по формуле (5) определить эффективный период полураспада $T_{\text{эфф}}$ смеси радионуклидов, осевших на фильтре.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная установка изображена (рис. 4.13.5) состоит из детектора ионизирующих излучений – счетчика Гейгера, расположенного в измерительном блоке 1 (фото 1), стабилизированного источника питания 2, счетного устройства 3 (фото 2) и набора фильтров 4, изготовленных из специального волокна. Для сбора радиоактивного аэрозоля используется пылесос 5, откачная труба 6 для забора пробы с улицы, крепежное устройство 7 на шланг пылесоса для забора пробы в помещении и патрон 8 для фильтров. Сигналы со счетчика регистрируются пересчетным устройством и фиксируются через заданный интервал времени на электронном табло.

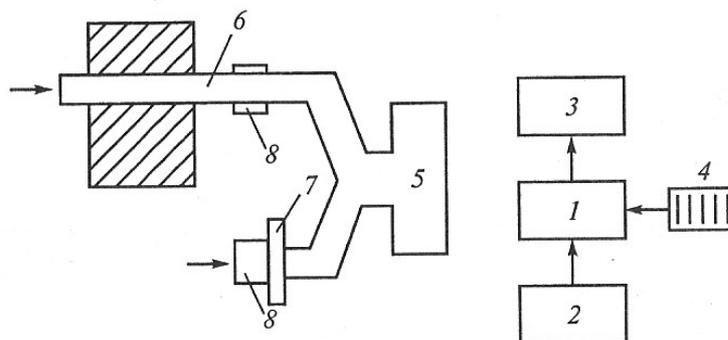


Рис. 4.13.5

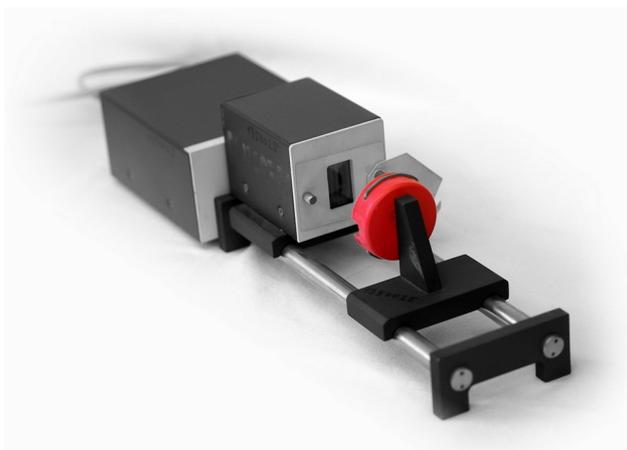


Фото 1



Фото 2

ИЗМЕРЕНИЯ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Задание 1. Определение сравнительного содержания радона и продуктов его распада в воздухе закрытого помещения и на открытом воздухе.

1. Включите пересчетное устройство и подготовьте его к проведению измерений. Включите источник питания счетчика. Проведите измерение уровня естественного радиоактивного фона в лаборатории n_{ϕ} (имп/мин). Рекомендуемое время одного измерения 5 минут.

Измерения повторите не менее 5 раз и вычислите среднее значение $n_{\phi \text{ ср}}$ (имп/мин).

2. Проведите сбор радиоактивного аэрозоля на открытом воздухе. Для этого патрон с фильтром №1 закрепите в выходящей на улицу откачной трубе, которую затем соедините с пылесосом и проведите прокачку воздуха через фильтр в течение 15 минут. По окончании прокачки установите исследуемый фильтр над счетчиком частиц и определите скорость счета от него, проведя последовательно 5 измерений (рекомендуемое время одного измерения 100с). Вычислите среднее значение $n_{1 \text{ ср}}$ (имп/мин).

3. Определите активность $A_{1 \text{ ср}}$ исследуемого фильтра по формуле:

$$A_{1 \text{ ср}} \cong n_{1 \text{ ср}} - n_{\phi \text{ ср}}$$

4. Проведите сбор радиоактивного аэрозоля из воздуха лаборатории. Для этого установите патрон с фильтром №2 в крепежном устройстве. Наденьте крепежное устройство на шланг пылесоса и проведите в течение 10 минут в лаборатории прокачку воздуха через фильтр. По окончании прокачки расположите фильтр напротив счетчика частиц. Определите скорость счета импульсов от исследуемого фильтра, проведя последовательно 5 измерений (время каждого измерения 100 с) и вычислите среднее значение $n_{2 \text{ ср}}$ (имп/мин).

5. Определите активность $A_{2 \text{ ср}}$ исследуемого фильтра по формуле:

$$A_{2 \text{ ср}} \cong n_{2 \text{ ср}} - n_{\phi \text{ ср}}$$

6. Сравните активности фильтров A_1 и A_2 и сделайте выводы.
ТАБЛИЦА 1.

$N_{\text{ф}}$ имп/300 с	$n_{\text{ф ср}}$ имп/мин	n_1 имп/100 с	$n_{1 \text{ ср}}$ имп/мин	n_2 имп/100 с	$n_{2 \text{ ср}}$ имп/мин	$A_{2 \text{ ср}}$ имп/мин	$A_{1 \text{ ср}}$ имп/мин	$\frac{A_2}{A_1}$
1.		1.		1.				
.....					
5.		5.		5.				

Задание 2. Оценка эффективного периода полураспада смеси изотопов

1. Не убирая от счетчика фильтр №2, снимите зависимость активности фильтра от времени. Установив “непрерывный” режим работы счетного устройства, проведите последовательно ~40 измерений (длительность каждого измерения 100с). По результатам измерений и вычислений заполните таблицу 2.

ТАБЛИЦА 2.

№ №	$t, (с)$	$n_{\text{фона ср}}$ (имп/мин)	n_2 (имп/мин)	$A_{\text{фильтра №2}}$ (имп/мин)	$\ln A$	$\lambda, с^{-1}$	$T_{1/2}$ (мин)
1.	0– 100						
...							
40.	3900-4000						

2. Постройте на миллиметровой бумаге графики зависимости $A = f(t)$ и $\ln A = f(t)$. Объясните полученные кривые.

3. По формулам (5) и (6) оцените величину постоянной распада и эффективного периода полураспада исследуемой смеси изотопов. Расчеты λ и $T_{1/2}$ проводите для участка $t > 1000$ с.

ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ.

При наличии резервного времени рекомендуется провести в течение 10-15 минут проветривание помещения, в котором проводится эксперимент, а затем вновь провести забор радиоактивной аэрозоли в помещении и сравнить активности фильтров. Сделать выводы об эффективности проветривания помещений для снижения концентрации в воздухе радона и продуктов его распада.

ВОПРОСЫ И УПРАЖНЕНИЯ

1. В чем физический смысл постоянной распада? Что называется периодом полураспада?
2. Каково происхождение α - и β -частиц, возникающих при радиоактивных превращениях?
3. Что называется радиоактивным семейством? Какие радиоактивные семейства встречаются в природе?
4. В чем состоит условие переходного равновесия в радиоактивной цепочке?
5. Какой изотоп получится из ${}_{86}\text{Rn}^{222}$ после двух α - и двух β -распадов?
6. Сколько α - и β -распадов испытывает U^{238} , превращаясь в конечном счете в стабильный изотоп Pb^{206} ?
7. В каких двух основных формах встречается радон в природе?
8. Назовите основные источники поступления радона в помещения.
9. Почему радон и продукты его распада особенно опасны для внутреннего облучения

организма?

10. Какие меры принимаются для снижения уровня концентрации радона в помещениях?
11. В чем заключается метод фильтрации? Какие радиоактивные изотопы оседают на фильтре?
12. Почему при расчетах активности препарата необходимо учитывать радиоактивный фон?
13. Почему рекомендуется проводить расчеты λ и $T_{1/2}$ по графикам для участка $t > 1000\text{с}$?