

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РФ

ФГБОУ ВПО Иркутская государственная сельскохозяйственная академия

Кафедра агроэкологии, агрохимии, физиологии и защиты растений

ПРАКТИКУМ ПО СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ РАДИОЛОГИИ



$$N = N_0 \exp(-\lambda t)$$

$$T_{эф} = T_{1/2} T_{биол} / (T_{1/2} + T_{биол})$$

Иркутск- 2015

Составитель: Новикова Любовь Николаевна

Практикум по сельскохозяйственной радиологии / Л.Н. Новикова: Учебно-методическое пособие. – Иркутск: Изд-во ИрГСХА 2015.-88 с. Табл. 46. Библиогр. 10 назв.

УДК 631:614.76+621.039.8

Практикум по сельскохозяйственной радиологии является учебным пособием и практическим руководством для студентов агрономических, зооинженерных специальностей, а также студентов по специальностям агрохимия, почвоведение, экология, обучающихся на заочном отделении.

Практикум содержит разделы по радиометрии, дозиметрии и прогнозной оценке суммарной дозы облучения населения, проживающего на загрязненной радионуклидами территории.

Практические задания представлены задачами на закон радиоактивного распада, вычисление периода полураспада и средней продолжительности жизни радиоизотопов, определение степени распада радиоизотопа, определение дефекта массы, энергии связи и удельной энергии связи ядра, энергии ядерных реакций, а также ситуационными задачами по:

- определению внутренней и внешней дозы, полученной в условиях радиационного фона и при радиационном загрязнении сельскохозяйственной продукции, воздуха, воды;
- расчёту защиты от радиации.

Данное издание подготовлено с целью совершенствования учебного процесса на кафедре сельскохозяйственной экологии ИрГСХА.

Рецензенты:

Доктор химических наук, профессор А.В. Рохин

Кандидат химических наук Б.Г. Сухов

Печатается по решению научно-методического совета ИрГСХА, протокол № 7 от 26 апреля 2013 г., лицензия ЛР № 070444.

©Иркутская ГСХА, 2015.

©Новикова Л.Н.

ВВЕДЕНИЕ

При изучении курса сельскохозяйственной радиологии студент должен иметь понятие об элементах атомной и ядерной физики и хорошо представлять себе состав атомного ядра, уметь составлять ядерные реакции, рассчитывать дефект массы ядра, энергию и удельную энергию связи ядра.

В процессе изучения радиоактивного распада ядер важно знать, что во всех ядерных реакциях выполняются законы сохранения: энергии, электрического заряда, массы (массового числа). Особое внимание уделяется реакциям синтеза лёгких и делению тяжёлых ядер, вопросам ядерной энергетики и проблемам хозяйствования в условиях радиационной угрозы.

Большое внимание в пособии уделяется практическим заданиям на применение основных принципов защиты от внешнего облучения: времени, расстояния, экранирования, видов экранов, дистанционных инструментов и средств индивидуальной защиты. В результате изучения предмета основы сельскохозяйственной радиоэкологии студенты должны уметь:

- рассчитать уровень безопасных условий работы в поле гамма-излучения;
- оценить дозовые нагрузки при проживании на загрязнённой радионуклидами территории;
- определить коэффициенты накопления и общего выноса радионуклида с растениями для измерений радиоактивности.

1 ФИЗИЧЕСКИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАДИОЛОГИИ

1. 1 Строение атомных ядер. Изотопы

Изотопы □ *разновидности атомов химических элементов, которые занимают одно место в периодической системе элементов Д.И. Менделеева.*

Ядра атомов изотопов содержат одинаковое число протонов и разное - нейтронов. Элементарные частицы: протоны и нейтроны называются **нуклонами**.

Положительный заряд ядра определяется числом протонов (p), которое равно числу электронов (e) и порядковому номеру элемента. Электрон имеет отрицательный заряд $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, равный по абсолютному значению заряду протона. Нейтрон (n) не имеет заряда. Атом электронейтрален.

Масса электрона мала $9,11 \cdot 10^{-31}$ кг, масса протона равна массе нейтрона $1,67 \cdot 10^{-31}$ кг. В атомных единицах массы (а.е. м.) масса электрона практически равна 0, а массы протона и нейтрона 1.

Пример 1. Символ изотопа элемента ${}_{92}^{238}\text{U}$. Указать: а) название элемента; б) число нейтронов и протонов, содержащихся в ядре; в) число электронов, содержащихся в электронной оболочке атома.

Решение: Заряд ядра атома искомого элемента 92 численно совпадает с номером элемента в периодической системе. Элемент № 92 - уран. Число нейтронов в данном ядре $N_n = A - Z = 238 - 92 = 146$. Число электронов в атоме равно заряду ядра; в данном случае число электронов равно 92. Это ${}_{92}^{238}\text{U}$.

Пример 2. В природных соединениях хлор находится в виде изотопов ${}^{35}\text{Cl}$ (75,5% масс.) и ${}^{37}\text{Cl}$ (24,5% масс.). Вычислить среднюю атомную массу природного хлора.

Решение: Обозначив среднюю атомную массу природного хлора за x и учитывая массовые доли, получим: $100x = 35 \cdot 75,5 + 37 \cdot 24,5$, т.е.

$$x = (35 \cdot 75,5 + 37 \cdot 24,5) / 100 = 35,45 \text{ а. е. м.}$$

Задачи для самостоятельного решения

1. Ядро атома некоторого элемента содержит 16 нейтронов, а электронная оболочка этого атома - 15 электронов. Назвать элемент, изотопом которого является данный атом. Привести запись его символа с указанием ядра и массового числа.

2. Массовое число атома некоторого элемента равно 181, в электронной оболочке атома содержится 73 электрона. Указать число протонов и нейтронов в ядре атома и название элемента.

3. Относительная атомная масса рубидия равна 85,47. Природная смесь рубидия состоит из стабильного изотопа ^{85}Rb и радиоактивного изотопа ^{87}Rb . Сколько процентов каждого изотопа находится в природной смеси рубидия, если точные массовые числа изотопов: $^{85}\text{Rb} = 84,911710$, $^{87}\text{Rb} = 86,909180$?

4. В природной смеси кислорода атомы стабильных изотопов кислорода находятся в следующем соотношении: $^{16}\text{O} : ^{17}\text{O} : ^{18}\text{O} = 2545 : 1 : 5$. Чему равна атомная масса кислорода, если точные массовые числа изотопов: $^{16}\text{O} = 15,994914$, $^{17}\text{O} = 16,99933$, $^{18}\text{O} = 17,999159$?

1.2 Ядерные реакции

Преращения, в которых ядро атома изменяет заряд или заряд и массу называются ядерными реакциями.

В природе ядерные реакции происходят:

1) при распаде радиоактивных ядер таких элементов как радий, торий, уран и других;

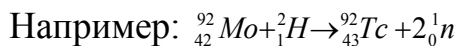
2) при бомбардировке атмосферы и поверхности Земли космическими лучами.

Сложные ядерные реакции идут в недрах Солнца и других звёзд.

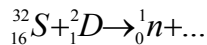
Уравнения ядерных реакций (в том числе и реакций радиоактивного распада) должны удовлетворять правилу равенства сумм индексов:

а) сумма массовых чисел частиц, вступающих в реакцию, равна сумме массовых чисел частиц - продуктов реакции (массы электронов, позитронов и фотонов не учитываются);

б) суммы зарядов частиц, вступающих в реакцию, и частиц - продуктов реакции равны между собой.



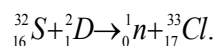
Пример 1. Составьте уравнение ядерной реакции:



Решение: При составлении ядерных реакций соблюдается равенство суммы зарядов и массовых чисел в левой и правой частях уравнения.

При этом заряд электрона учитывается со знаком минус, протона и позитрона - со знаком плюс, Нейтрон и γ -квант заряда не имеют.

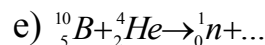
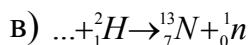
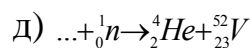
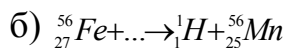
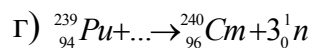
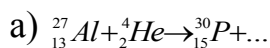
Кроме того, массы электронов, позитронов и γ -квантов не учитываются. В данном примере нужно определить: ядро какого элемента получится в результате ядерной реакции. Сумма массовых чисел частиц в левой части уравнения $32+2=34$, значит массовое число нового элемента 33. Сумма зарядов частиц в левой части уравнения $16+1=17$. Так как нейтрон заряда не имеет, то заряд нового элемента 17. Этим элементом будет изотоп хлора ${}_{17}^{33}\text{Cl}$. Ядерная реакция в полном виде:



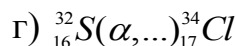
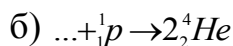
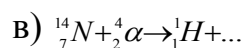
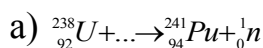
Задачи для самостоятельного решения

5. Составьте уравнение радиоактивного превращения ${}_{93}^{237}\text{Np}$ в ${}_{83}^{209}\text{Bi}$.

6. Закончите уравнения следующих ядерных реакций:



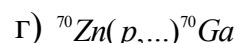
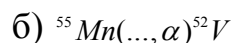
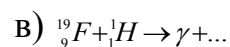
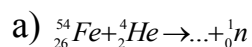
7. Допишите следующие ядерные реакции:



8. При бомбардировке ядер ${}_{92}^{238}\text{U}$ ядрами неона ${}_{10}^{22}\text{Ne}$ были получены ядра изотопа 102 элемента с массовым числом 256, для которого характерен α -распад. Составьте уравнения протекающих реакций.

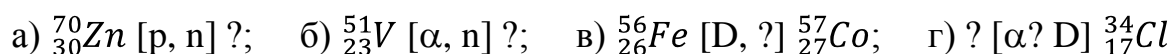
9. При облучении ядер ^{16}O или ^{19}F нейтронами образуются ядра радиоактивного изотопа азота с массовым числом 16. Составьте уравнения ядерных реакций.

10. Закончите уравнения следующих ядерных реакций:



В каких случаях дочерний атом является **изобаром** материнского атома?

11. Написать полные уравнения реакций:



1.3 Типы радиоактивного распада

К основным видам радиоактивного распада относятся:

- 1) α -распад;
- 2) β -превращение (в том числе и электронный захват);
- 3) γ -излучение;
- 4) нейтронное излучение;
- 5) протонная и двухпротонная радиоактивности;
- 6) кластерная радиоактивность и др.

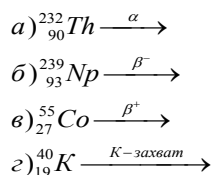
Во всех видах радиоактивных превращений выполняются законы сохранения энергии, импульса, зарядов. При α -распаде и γ -излучении выполняется закон сохранения чётности (при β -превращении он нарушается).

Пример 1. Ядро какого элемента получится, если ядро $^{238}_{92}\text{U}$ потеряет 8 α - и 6 β -частиц?

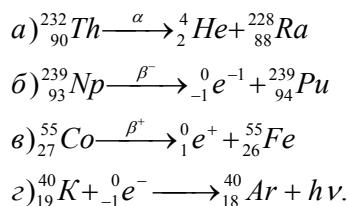
Решение: Излучение ядром атома элемента одной α - частицы приводит к уменьшению его заряда на две единицы, а массового числа на четыре единицы. В результате излучения ядром атома урана 8 α -частиц уменьшается заряд ядра на 16, а массовое число на 32 единицы, т.е. образуется элемент, заряд которого равен $92 - 16 = 76$, а массовое число $238 - 32 = 206$. При излучении ядром урана 6 β -частиц массовое число ядра практически не изменится, а положительный заряд ядра возрастает на шесть единиц.

Следовательно, образовавшийся при радиоактивном распаде элемент имеет заряд ядра 82, а массовое число этого ядра равно 206. Это один из изотопов свинца ${}_{82}^{206}Pb$.

Пример 2. Закончить уравнения реакций радиоактивного распада:

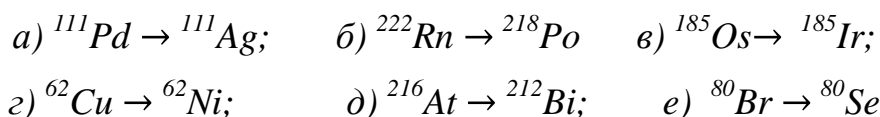


Решение:



Задачи для самостоятельного решения

12. Какой тип радиоактивного распада имел место в следующих переходах ядер:



Напишите полные уравнения происходящих при этом процессов.

13. Какие типы превращений претерпевает ядро ${}_{84}^{218}Po$ при переходе его в ядро ${}_{82}^{210}Pb$?

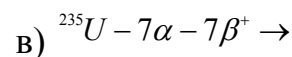
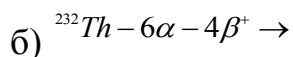
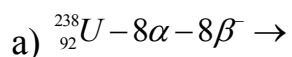
14. Какие элементы подвергались естественному радиоактивному распаду:



Напишите полные уравнения происходящих при этом превращений.

15. При делении ядра урана-238 образуется два осколка (один из них изотоп рубидия ${}_{37}^{87}Rb$) и испускается два нейтрона. Определите заряд и массовое число второго осколка. Для полученных изотопов характерен β^- -распад. Напишите уравнения происходящих при этом превращений.

16. Ядра каких элементов получаются, если ядра следующих элементов потеряют:

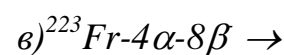
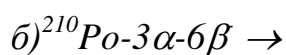
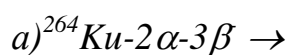


Напишите уравнения соответствующих реакций.

17. При делении ядра ${}^{234}\text{U}$ образуется 4 нейтрона, 2 электрона и 2 равных по заряду и массе осколков. Для полученных изотопов характерен позитронный β^+ - распад. Напишите уравнения соответствующих превращений.

18. Используя радиоактивное свойство тория, укажите, изотопами каких элементов являются все промежуточные члены этого семейства.

19. Ядра каких элементов получаются, если ядра следующих элементов потеряют:



Составьте уравнения соответствующих реакций.

20. При облучении ядер ${}_{13}^{27}\text{Al}$ нейтронами протекает несколько реакций: возможно образование ядер ${}_{13}^{26}\text{Al}$, ${}_{13}^{27}\text{Al}$, ${}_{12}^{27}\text{Mg}$, ${}_{11}^{24}\text{Na}$ с выделением соответствующих вторичных частиц. Напишите полные и сокращённые уравнения возможных ядерных реакций.

21. В результате бомбардировки ядер ${}_{5}^{10}\text{Be}$ α - частицами оно превращается в ядро ${}_{7}^{13}\text{N}$. Напишите полное и сокращённое уравнения ядерной реакции. Какая вторичная частица выделяется в результате этой реакции?

22. При бомбардировке ядра ${}_{29}^{65}\text{Cu}$ протонами образуется неустойчивое промежуточное ядро, для которого характерен β - распад. Составьте полное уравнение ядерной реакции с указанием промежуточного ядра.

23. При бомбардировке ${}_{92}^{238}\text{U}$ ядрами гелия выделяется нейтрон и образуется ядро элемента, для которого характерен электронный β -распад. Напишите уравнения протекающих реакций.

24. При облучении ядер ^{16}O или ^{19}F нейтронами образуются ядра радиоактивного изотопа азота с массовым числом 16. Составьте уравнения ядерных реакций.

25. При делении ядра урана-238 образуется два осколка (один из них изотоп рубидия $^{87}_{37}\text{Rb}$) и испускается два нейтрона. Определите заряд и массовое число второго осколка. Для полученных изотопов характерен β^- - распад

Напишите уравнения происходящих при этом превращений.

26. Запишите реакции образования радиоактивного азота $^{13}_7\text{N}$ из устойчивого изотопа бора $^{10}_5\text{B}$ при искусственной β^- - радиоактивности. Каким превращениям будет подвергаться $^{13}_7\text{N}$?

27. Каким образом искусственная β^- - радиоактивность приводит к образованию $^{30}_{14}\text{Si}$ из алюминия $^{27}_{13}\text{Al}$.

28. Как получить из ртути золото?

1.4 Вычисление энергетического эффекта реакции

Энергия ядерной реакции рассчитывается по уравнению:

$$E = c^2 \cdot [m_1 + m_2 - \Sigma m'_i] \quad (1)$$

где m_1 и m_2 - массы частиц, вступающих в реакцию; $\Sigma m'_i$ - сумма масс частиц, образовавшихся в результате реакции. Если массы частиц выражать в а. е. м., а энергию реакции в МэВ, то формула (1) примет вид

$$E = 931 \cdot [m_1 + m_2 - \Sigma m'_i] \quad (2)$$

Энергию радиоактивного распада измеряют в электронвольтах (эВ). Один электронвольт - это энергия, которую приобретает электрон, пройдя разность потенциалов в 1В; $1\text{эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж. Распад большинства изотопов сопровождается выделением высокой энергии - в мегаэлектронвольтах; $1\text{МэВ} = 10^6$ эВ.

Пример 1. Вычислить энергию ядерной реакции $p + {}^7_3\text{Li} \rightarrow {}^9_4\text{Be} + n$. Выделяется или поглощается энергия при этой реакции?

Решение.

При вычислении энергии ядерной реакции по уравнениям (1, 2) можно использовать массы атомов, а не их ядер. Из справочных данных находим

$$m_{1H} = 1,00783 \text{ а.е.м.};$$

$$m_{3Li} = 7,01601 \text{ а.е.м.};$$

$$m_{4Be} = 7,01693 \text{ а.е.м.};$$

$$m_n = 1,00867 \text{ а.е.м.};$$

Дефект массы реакции $(m_{1H} + m_{3Li} - m_{4Be} - m_n) = -0,00176 \text{ а.е.м.};$

Подставляя числовые значения в (2), получаем

$$E = 931 \cdot (-0,00176) = -1,64 \text{ МэВ}$$

Так как $E < 0$, то энергия в результате реакции поглощается.

Задачи для самостоятельного решения

29. Энергетический эффект ядерной реакции ${}^{14}_7N + {}^4_2He \rightarrow {}^{17}_8O + {}^1_1H$ равен 1,26 МэВ. Вычислите точное массовое число ${}^{14}N$, если известны точные массовые числа остальных изотопов, участвующих в ядерной реакции: $A_{2He} = 4,002603$, $A_{1H} = 1,007825$, $A_{17O} = 16,999133$.

30. Рассчитайте энергетический эффект ядерной реакции ${}^3_1T + {}^2_1D \rightarrow {}^4_2He + {}^1_0n$ если известны точные массовые числа изотопов, участвующих в ядерной реакции $A_{3T} = 3,01604$, $A_{2He} = 4,002603$, $A_{2D} = 2,014102$, $A_{1n} = 1,008665$.

31. Вычислите энергетический эффект ядерной реакции ${}^{238}_{92}U(\alpha, 3n){}^{239}_{94}Pu$ в пересчёте на 1 моль ${}^{238}U$, если известны точные массовые числа изотопов, участвующих в ядерной реакции: $A_{238U} = 238,060760$, $A_{1n} = 1,008665$, $A_{2He} = 4,002603$, $A_{239Pu} = 239,052161$.

32. Определить максимальную кинетическую энергию электрона, испускаемого при распаде нейтрона. Написать уравнение распада.

33. Вычислить энергию ядерной реакции: $n + {}^{10}_5B \rightarrow {}^7_3Li + {}^4_2He$, используя атомные массы элементов без округления (со всеми знаками после запятой).

1.5 Определение точного массового числа ядра элемента, образующегося в результате ядерной реакции

Пример. Вычислить дефект массы, энергию связи и удельную энергию связи ядра ${}^{16}_8\text{O}$.

Решение. Дефект массы определяем по уравнению:

$$\Delta m = Z m_p + (A - Z) \times m_n - m_{\text{я}} \quad (3)$$

где Z - зарядовое число; A - массовое число; m_p - масса протона; m_n - масса нейтрона; $m_{\text{я}}$ - масса ядра. Отсюда:

$$\Delta m = Z m_{{}^1_1\text{H}} + (A - Z) \times m_n - m_a \quad (4)$$

где $m_{{}^1_1\text{H}}$ - масса атома ${}^1_1\text{H}$;

m_a - масса атома, дефект массы ядра которого определяется.

$m_{{}^1_1\text{H}} = 1,00783$ а. е. м.; $m_n = 1,00867$ а. е. м.; $m_{{}^{16}_8\text{O}} = 15,99492$ а. е. м.

Подставляя в (3) числовые данные (для заряда 8, $A=16$), получаем

$\Delta m = 0,13708$ а. е. м.

Энергия связи ядра рассчитывается по уравнению:

$$E_{\text{св.}} = c^2 \Delta m \quad (5)$$

где c - скорость света в вакууме. Если дефект массы Δm выражаем в а. е. м., а энергию связи $E_{\text{св.}}$ в МэВ, то формула примет вид

$$E_{\text{св.}} = 931 \Delta m; \quad (6)$$

$E_{\text{св.}} = 931$ МэВ /а. е. м. $0,13708$ а. е. м. = $127,6$ МэВ.

Удельная энергия связи рассчитывается по уравнению:

$$\varepsilon_{\text{св.}} = \frac{E_{\text{св.}}}{A}; \varepsilon_{\text{св.}} = \frac{127,6 \text{ МэВ}}{16} = 7,98 \text{ МэВ}. \quad (7)$$

Ответ: $\Delta m = 0,13708$ а. е. м.; $E_{\text{св.}} = 127,6$ МэВ; $\varepsilon_{\text{св.}} = 7,98$ МэВ.

Задачи для самостоятельного решения

34. Вычислить дефект массы, энергию связи и удельную энергию связи альфа-частицы.

35. Вычислить дефект массы, энергию связи и удельную энергию связи ядра

${}_{92}^{238}\text{U}$.

36. Найдите энергию связи ядер изотопа водорода, дейтерия и трития. Чему равна энергия связи, приходящаяся на один нуклон?

1.6. Определение константы и степени распада радиоизотопа.

Отношение числа атомов данного радиоактивного элемента, распадающихся в единицу времени, к общему числу атомов есть величина постоянная; она называется **константой распада**, обозначается λ и выражается в с^{-1} . **Среднее время жизни** (τ) - величина, обратная постоянной распада:

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \quad (8)$$

Число актов ядерных превращений можно выразить через число Авогадро:

$$A = N_A \frac{m}{M} \lambda \quad (9),$$

где m - масса радиоактивного изотопа, M - молекулярная масса изотопа; N_A - постоянная Авогадро, равная $6,02 \cdot 10^{23}$; λ - радиоактивная постоянная. Для достаточно малого интервала времени $\Delta t = dt$, $dN = -\lambda N dt$, а при почленном интегрировании получим **экспоненциальный закон радиоактивного распада**:

$$N = N_0 \exp(-\lambda t). \quad \text{или} \quad N_t = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (10)$$

где N_t - число нераспавшихся радиоактивных атомов по прошествии времени t ; N_0 - число атомов радиоактивного элемента в начальный период времени $t=0$; $e = 2,718$ - основание натурального логарифма. Самопроизвольный распад атомных ядер подчиняется этому закону. Закон радиоактивного распада можно выразить через активности:

$$A_t = A_0 e^{-\lambda t} \quad (11),$$

где A_0 - начальная активность образца, а A_t - активность образца в момент времени t . После логарифмирования получим линейную зависимость:

$$\ln A_t = \ln A_0 - \lambda t. \quad (12)$$

Мера количества радиоактивного вещества, выраженная числом актов ядерных превращений в единицу времени называется активностью т.е. это скорость распада неустойчивого ядра:

$$A_t = \left| \frac{\Delta N}{\Delta t} \right| \quad (13)$$

Эта скорость пропорциональна числу нераспавшихся ядер (N) в момент времени t :

$$A_t = -\lambda N, \quad (14)$$

где λ - постоянная радиоактивного распада, характеризующая вероятность распада ядер в единицу времени.

В системе СИ за единицу активности принято одно ядерное превращение в секунду (1 распад/с). Беккерель (Бк) - единица активности изотопа. $1 \text{ Бк} = 1 \text{ расп./сек} = 2,7 \times 10^{-11} \text{ Ки}$. Кюри (Ки) - внесистемная единица активности изотопа.

$$1 \text{ Ки} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Бк}.$$

Активность радионуклидов в единице объёма называется плотностью активности или объёмной активностью (A_v) и измеряется в Бк/м^3 или Ки/л . Активность, отнесённую к единице массы вещества, называют удельной активностью (A_m).

Период полураспада ($T_{1/2}$ или T_{05}). - время, в течение которого распадается половина атомов радиоактивного изотопа (радионуклида) и его активность уменьшается в 2 раза. Периоды полураспада у различных радионуклидов колеблются в очень широких пределах - от долей секунды до миллиардов лет, но для каждого конкретного радионуклида $T_{1/2}$ - величина постоянная. Так, период полураспада для плутония-239 - 24 тыс. лет; для урана-238 - 4470 млн. лет.

$$\frac{1}{2} N_0 = N_0 \exp(-\lambda T_{05}), \text{ откуда}$$

$$T_{05} = \frac{\ln 2}{\lambda} \approx \frac{0,693}{\lambda} \quad (15)$$

В течение первого периода полураспада распадается $1/2$ часть от первоначального числа ядер изотопа N_0 и остаётся $1/2 N_0 = 2^{-1} N_0$ ядер. в течение второго периода полураспада распадается половина от $2^{-1} \cdot N_0$ и остаётся $1/2 \times 2^{-1} \cdot N_0 = 2^{-2} \cdot N_0$ ядер и т.д.

В конце n -го периода полураспада остаётся $2^{-n} \cdot N_0$ ядер исходного изотопа.

Аналогичное выражение справедливо для массы (m) не распавшегося изотопа:

$$m = 2^{-n} \cdot m_0 \quad (16),$$

где m_0 - исходная масса изотопа.

Пример 1. 15 г радия выделяют $5,4 \cdot 10^{11}$ частиц в секунду. Вычислите константу распада радия.

Решение. В 15 г радия содержится $6,02 \cdot 10^{23} \cdot 15 / 226$ атомов.

$$\lambda = 5,4 \cdot 10^{11} \cdot 226 / (6,02 \cdot 10^{23} \cdot 15) = 1,35 \cdot 10^{-11} \text{ с}^{-1}.$$

Пример 2. Константа распада тория составляет $5 \cdot 10^{-11}$ в год. Сколько α -частиц выбрасывает 1 г тория в секунду?

Решение. Определим константу распада тория в секунду

$$5 \cdot 10^{-11} / (365 \cdot 24 \cdot 3600) = 1,58 \cdot 10^{-18} \text{ с}^{-1} \text{ и число атомов в 1 г тория}$$

$6,02 \cdot 10^{23} / 232 = 26 \cdot 10^{20}$. Теперь можно найти число атомов тория, которое распадается в 1 с: $26 \cdot 10^{20} \cdot 1,58 \cdot 10^{-18} = 40 \cdot 10^2$, т.е. примерно 4000 атомов. Следовательно, столько же α -частиц выбрасывается в секунду 1 г тория.

Пример 3. Сколько атомов распадается в 1 г ${}^3_1\text{H}$ за среднее время жизни этого изотопа? Дано: $m = 10^{-3}$ кг; $t = \tau$. Найти: N' .

Решение. По условию задачи $t = \tau$, тогда

$$N = N_0 / e. \quad (17)$$

Число атомов, распавшихся за время t ,

$$N' = N_0 - N = N_0(1 - 1/e). \quad (18)$$

Число атомов, содержащихся в массе m изотопа ${}^3_1\text{H}$

$$N_0 = \frac{m}{M} N_A, \quad (19)$$

где M - молекулярная масса изотопа ${}^3_1\text{H}$; N_A - постоянная Авогадро. С учётом (18)

выражение (17) примет вид

$$N' = \frac{m}{M} N_A \left(1 - \frac{1}{e}\right);$$

Ответ: $N' = 1,27 \cdot 10^{23}$ атомов.

$$N' = \frac{10^{-3} \text{ кг} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}}{3 \cdot 10^{-3} \text{ кг} / \text{ моль}} \left(1 - \frac{1}{2,72}\right) = 1,27 \cdot 10^{23}$$

Пример 4. Определите массу 1Бк ^{210}Po ($T_{1/2}=138$ сут., $A_r=210$), используя зависимость:

$$M=(1 \times T_{1/2}/0,693) (A/6,02 \times 10^{23}) = 0,24 \times 10^{-23} \times A \times T_{1/2}. \quad (20)$$

Решение. Используя зависимость (19), получим:

$$M= 0,24 \times 10^{-23} \times 210 \times 138 \times 24 \times 3600 = 10,6 \times 10^{-14} \text{ мкг.}$$

Задачи для самостоятельного решения

37. Составьте график снижения активности (в усл. ед.) смеси осколков деления с течением времени по данным таблицы 1.

Время, ч	Относительная активность	Время, ч	Относительная активность
1	1000	30	17
1,5	610	40	12
2	440	60	7,3
3	270	100	4,3
5	150	200	1,7
7	97	400	0,75
10	63	600	0,46
15	39	800	0,33
20	27	1000	0,25

Определите константу распада через 20, 100 и 1000 часов.

38. Активность фосфора-31 составляет 100 Ки. Определить, сколько этого изотопа было 3 недели тому назад и чему будет равна его активность через 1, 2 месяца.

39. Радиоактивный эталон – цезий – 137 на 1 января 1989 года имеет активность (при телесном угле $2\pi = 180^\circ$) 1600 БК. Определите, чему была равна активность эталона 2 года тому назад и чему она будет равна через 5 и 15 лет.

40. Для диагностических исследований было получено радиоактивное железо – ^{59}Fe , в количестве 3 мКи. Определить, сколько этого изотопа останется через 15 дней, 5 месяцев и 1 год.

41. Найти массу изотопа ^{81}Sr ($T_{1/2} = 8,5$ ч.), оставшуюся через 25,5 ч хранения, если первоначальная масса его составляла 200 мг.

42. В физической лаборатории используется радиоактивный эталон, изготовленный из кобальта-60 с активностью (при телесном угле $2\pi = 180^\circ$) 18000 расп./мин. Определить, какова была активность спустя 3 года тому назад, а также будет активность через 1 год, 5 лет и 6,5 года.

43. Радиоактивный эталон – цезий – 137 имеет активность (при телесном угле $2\pi = 180^\circ$) 1 мКи. Определить, чему была равна активность эталона через 1, 5 года, 6 лет, 15 лет и 30 лет.

44. Для лечения больных поступило радиоактивное золото – ^{198}Au в количестве 0,1 мКи. Сколько этого радиоизотопа останется через 26 часов, 4 суток и 8 суток.

45. Активность йода ^{125}I составляет 25 мКи. Вычислите, какова активность изотопа была 6 и 12 месяцев тому назад и какова будет через 3 месяца, 10 месяцев.

46. Имеется радиоизотоп бром-82 с активностью 1000 Бк. Рассчитать какова будет активность через 90 часов, 6 и 12 суток.

47. На сегодняшний день активность йода – ^{131}I составляет 5 мКи. Определить сколько этого радиоизотопа останется через 4, 20 и 56 суток, а также спустя 4, 20 и 56 суток тому назад.

48. Найти активность 1 г изотопа $^{226}_{88}\text{Ra}$.

49. Найти активность 1 г изотопа $^{238}_{92}\text{U}$

50. Какая доля первоначального количества радиоактивного изотопа распадается за время жизни этого изотопа?

51. Вычислить постоянную распада, среднее время жизни и период полураспада радиоактивного изотопа, активность которого уменьшается в 1,07 раза за 100 дней.

52. Определить возраст древних деревянных предметов, у которых активность ^{14}C составляет $3/5$ удельной активности этого же изотопа в только что срубленных деревьях.

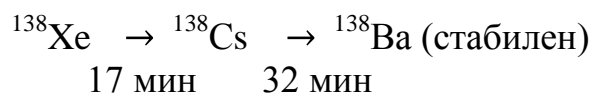
53. Свежеприготовленный препарат содержит 1 мкг радиоактивного изотопа ^{24}Na . Какую активность он будет иметь через сутки?

54. Определить число радиоактивных ядер в свежеприготовленном препарате ^{82}Br , если известно, что через сутки его активность стала равной 0,20 кюри.

55. Сколько миллиграмм β - активного ^{90}Sr следует добавить к 1 мг неактивного стронция, чтобы удельная активность препарата стала равной 1370 кюри/г?

56. Определить массу свинца, который образуется из 1 кг ^{238}U за период, равный возрасту Земли ($2,5 \cdot 10^9$ лет).

57. Радиоизотоп ^{138}Xe , образующийся с постоянной скоростью 10^{10} ядер/сек, испытывает превращения по схеме:



Под стрелками указаны периоды полураспада. Вычислить суммарную активность данного препарата через 1 ч после начала накопления.

58. Определите период полураспада изотопа, если в течение 1 ч распадается 52% начального количества атомов.

59. Средняя продолжительность жизни радиоизотопа свинца ^{210}Pb равна 10^9 с. Вычислите константу радиоактивного распада (с^{-1}) и период полураспада (в годах).

60. Период полураспада изотопа ^{59}Fe равен 47,1 суток. Через сколько суток 1 г железа, взятого в виде указанного изотопа, уменьшится до 0,05 г вследствие β^- - распада?

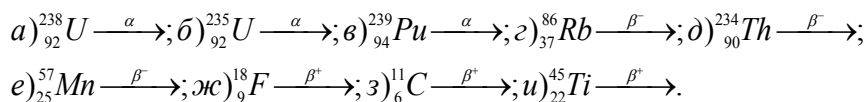
61. Какова масса разложившегося радия-226, если первоначальная масса его равна 1 г, а период полураспада ^{226}Ra равен 1617 лет; время распада 10000 лет?
62. Образец чистого углерода 0,25 г содержит 15% радиоактивного изотопа ^{14}C , период полураспада которого равен 5470 лет. Какова масса образца через 100 лет? Каково будет процентное содержание в нём изотопа ^{14}C ?
63. Какова была первоначальная масса образца ^{60}Co , если после 25 лет его хранения разложилось 1,25 кг? Период полураспада ^{60}Co равен 5,27 лет.
64. Первый международный эталон радия был изготовлен Марией Кюри (1911), он содержал $16,74 \times 10^{-3}$ г чистого радия-226. Какая масса радия содержалась в этом эталоне в 1980 г? Период полураспада радия-226 равен 1617 лет.
65. Найти период полураспада радиоактивного препарата, если за сутки его активность уменьшается в четыре раза.
66. Константа распада урана $1,54 \cdot 10^{-10}$ в год. Сколько частиц выбрасывает 1 г урана в 1 мин? Вычислите период полураспада урана и его среднюю продолжительность жизни.
67. Константа распада радона $7,55 \cdot 10^{-3}$ в час. Вычислите период полураспада радона и его среднюю продолжительность жизни.
68. Константа распада $^{238}_{92}\text{U}$ равна $4,88 \cdot 10^{-18} \text{ с}^{-1}$. Чему равны периоды полураспада и средняя продолжительность жизни радиоизотопа?
69. Миллион атомов полония $^{210}_{84}\text{Po}$ выбрасывает в сутки 5020 α -частиц. Вычислите константу распада полония, его период полураспада и среднюю продолжительность жизни.
70. Вычислите число ядер $^{130}_{53}\text{I}$, распавшихся в течение первых суток, если первоначальное число ядер $N_0 = 10^{22}$.
71. Какова активность препарата, если в течение 10 мин распадается 10000 ядер этого вещества?

72. Период полураспада радиоактивного фосфора ${}_{15}^{30}\text{P}$ равен 3 мин. Чему равна постоянная распада этого элемента?

Контрольная работа 1

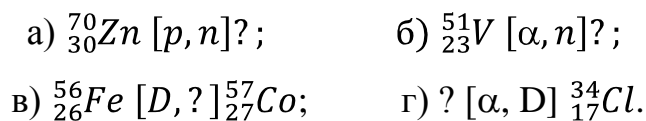
Вариант 1

1. Закончить уравнения реакций радиоактивного распада:



В каких случаях дочерний атом является изобаром материнского атома?

2. Написать полные уравнения реакций:



3. Как изменяются массовое число и заряд атома изотопа: а) при последовательном испускании α -частицы и двух β^- -частиц; б) при поглощении ядром двух протонов и испускании двух нейтронов; в) при поглощении одной α -частицы и выбрасывания двух дейтронов?

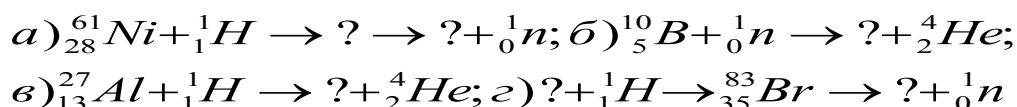
4. Период полураспада β^- -радиоактивного изотопа ${}^{24}\text{Na}$ равен 15 ч. Написать уравнение реакции распада и вычислить, сколько граммов дочернего продукта образуется из 24 г ${}^{24}\text{Na}$ за 30 ч?

5. Природный галлий состоит из изотопов ${}^{71}\text{Ga}$ и ${}^{69}\text{Ga}$. В каком количественном соотношении находятся между собой числа атомов этих изотопов, если средняя атомная масса галлия равна 69,72?

6. Вычислить энергию ядерной реакции ${}^4_2\text{He} + {}^{14}_7\text{N} \rightarrow {}^{17}_8\text{O} + p$.

Вариант 2

1. Записать уравнения ядерных реакций в полной и сокращённой форме:



2. Сколько α - и β^- -частиц должно потерять ядро ${}_{88}^{226}\text{Ra}$ для получения дочернего элемента с массовым числом 206, принадлежащего IV группе периодической системы элементов? Назвать этот элемент.

3. Какой процент от первоначального числа атомов в образце изотопа ^{128}I ($T_{1/2} = 25$ мин.) останется нераспавшимся после хранения в течение 2,5 ч?

4. В природной смеси хлора на 1 атом нестабильного изотопа ^{37}Cl приходится приблизительно 3 атома стабильного изотопа ^{35}Cl . Какова относительная атомная масса хлора, если точные массовые числа изотопов: $^{37}\text{Cl} = 36,965895$, $^{35}\text{Cl} = 34,968854$?

5. За какое время распадается 75% атомов $^{45}_{20}\text{Ca}$?

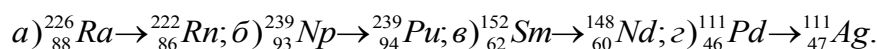
6. Вычислить энергию ядерной реакции: $p + {}^1_5\text{B} \rightarrow 3 {}^4_2\text{He}$.

Вариант 3

1. Сколько атомов $^{222}_{86}\text{Rn}$ распадается за сутки, в 1 г этого изотопа?

2. Ядро атома изотопа $^{238}_{92}\text{U}$ в результате радиоактивного распада превратилось в ядро $^{226}_{88}\text{Ra}$. Сколько α - и β^- -частиц испустило при этом исходное ядро?

3. Какой тип радиоактивного распада наблюдается при следующих превращениях:



4. Найти период полураспада радиоактивного препарата, если за сутки его активность уменьшается в четыре раза.

5. Природный магний состоит из изотопов ^{24}Mg , ^{25}Mg и ^{26}Mg . Вычислить среднюю атомную массу природного магния, если содержание отдельных изотопов в атомных процентах соответственно равно 78,6; 10,1 и 11,3.

6. Вычислить энергию ядерной реакции ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + n$.

Вариант 4

1. Символ одного из изотопов элемента $^{52}_{24}\text{Э}$. Указать: а) название элемента; б) число протонов и нейтронов в ядре; в) число электронов в электронной оболочке атома.

2. Закончить уравнения ядерных реакций: а) ${}^{52}_{24}\text{Cr} + {}^2_1\text{D} \rightarrow {}^1_0n + \dots$, б) ${}^{19}_9\text{F} + {}^1_1\text{p} \rightarrow \dots + \gamma$.
Записать в полной и сокращённой форме.

3. Вследствие радиоактивного распада $^{238}_{92}\text{U}$ превращается в $^{206}_{86}\text{Pb}$. Сколько альфа- и бета-превращений он при этом испытывает?

4. Период полураспада некоторого радиоактивного изотопа равен 3 ч. Какая масса его останется нераспавшейся через 18 ч, если первоначальная масса изотопа составляла 200 г?

5. Вычислить дефект массы, энергию связи и удельную энергию связи ядра



6. Вычислить энергию ядерной реакции: $p + {}_3^7\text{Li} \rightarrow 2 {}_2^4\text{He}$.

2 ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

2.1 Поглощение гамма-излучения

При проникновении γ -лучей в какую-либо среду уменьшается не только их скорость, но и интенсивность. Взаимодействие γ -лучей со средой называется поглощением и описывается законом Бугера:

$$\lg \frac{J}{J_0} = -0,4343 \varepsilon c x = D, \quad (21)$$

где ε - молярный коэффициент экстинкции;

c - концентрация поглощающего вещества;

x - толщина поглощающего слоя;

J_0 - интенсивность падающего луча;

J - интенсивность луча, прошедшего через слой вещества, толщиной x ;

D - оптическая плотность вещества.

Закон поглощения излучения (экспоненциальный):

$$J = J_0 \cdot e^{-kx}, \quad (22)$$

где k - коэффициент поглощения данного вещества, k выражается в см^{-1} если x в см и k выражают в $(\text{г}/\text{см}^2)^{-1}$, если x в $\text{г}/\text{см}^2$. Часто используют величину толщины слоя половинного ослабления. Так, для γ -излучения радия слой свинца половинного ослабления составляет 13 мм.

Длина пробега γ -лучей составляет: в газах - сотни метров; в свинце - до 5 см; тело человека пронизывается насквозь.

γ -Излучение наиболее эффективно ослабляется материалом с высокой плотностью (свинец, сталь, бетон, железо, свинец, свинцовое стекло и др.).

Пример 1. На поверхность воды падает γ -излучение с длиной волны 0,414 нм.

На какой глубине интенсивность излучения уменьшится в два раза?

Согласно закону поглощения γ -излучения веществом,

$$N = N_0 \exp(-\mu x). \quad (23)$$

где N_0 - интенсивность падающего излучения; N - интенсивность излучения на глубине x ; μ - коэффициент линейного поглощения

Решая относительно x , находим

$$x = \frac{1}{\mu} \ln \frac{I_0}{I} \quad (24)$$

Для определения коэффициента линейного ослабления вычислим энергию γ -фотонов:

$$\varepsilon = hc / \lambda \quad (25)$$

где λ - длина волны излучения,

h - постоянная Планка;

c - скорость света в вакууме.

$$\varepsilon = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{4,14 \cdot 10^{-13} \text{ м}} = 4,8 \cdot 10^{-13} \text{ Дж} = 3 \text{ МэВ}.$$

Для данной энергии $\mu = 0,04 \text{ см}^{-1}$. Подставляя числовые значения в выражение (23), получаем

$$x = \frac{\ln 2}{0,04 \text{ см}^{-1}} = 17,3 \text{ см}.$$

Пример 2. Рабочий в течение 6 ч должен находиться в 2 м от точечного источника γ -излучения. Какова должна быть активность источника γ -излучения, чтобы можно было работать без защитного экрана? γ -Постоянная 1,35 Р м²/час Ки. Допустимая доза равна 0,1 Р.

Решение: Экспозиционная доза от источника без защиты равна

$$X = A \Gamma t / r^2 \cdot 10^4 \quad (26)$$

$$A = 0,1 \cdot 4 \cdot 10^4 / 1,35 \cdot 6 = 493,8 \text{ Ки}$$

Пример 3. Определить, какую мощность экспозиционной дозы, создаваемую γ -излучением в воздухе, можно измерить сцинтилляционным счётчиком.

Сцинтиллятором служит антрацен. Анодный ток фотоумножителя $I_a=10^{-6}$ А, коэффициент усиления ФЭУ $\zeta=10^6$, масса кристалла $M=20$ г. Для сцинтиллятора можно принять $f=2/h$, где h - световой выход относительно антрацена. Для антрацена $h=1$.

Решение. 1 Р соответствует энергии 87,7 эрг/г воздушно-эквивалентного сцинтиллятора. Следовательно:

$$1P / \text{гас} = \frac{87,7}{3600 \cdot 1,6 \cdot 10^{-9}} = 1,52 \cdot 10^7 \text{ кэв} / (\text{г} \cdot \text{с})$$

Мощность дозы:

$$X_{\text{в}} = \frac{I_a \cdot f}{2,44 \cdot 10^{-12} \zeta \cdot M} = \frac{10^{-6} \cdot 2}{2,44 \cdot 10^{-12} \cdot 10^6 \cdot 20} =$$

$$= 0,04 \cdot P / \text{гас} = 0,282 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Кл}}{\text{кг} \cdot \text{с}}$$

$$f=2/h=2/1=2.$$

Задачи для самостоятельного решения.

73. Рассчитать толщину свинцового слоя, который ослабляет интенсивность излучения γ -фотонов с энергией 2 МэВ в 100 раз.

74. Вычислить толщину слоя половинного поглощения свинца для γ -лучей, длина волны которых равна 0,775 пм.

75. Во сколько раз изменится интенсивность γ -фотонов с энергией 2 МэВ при прохождении экрана, состоящего из двух плит: свинцовой толщиной 2 см и алюминиевой толщиной 5 см?

76. Рабочий в течение 10 ч должен находиться в 2 м от точечного источника гамма-излучения. Какова должна быть активность источника гамма-излучения, чтобы можно было работать без защитного экрана? Гамма-постоянная 1,35 Р м²/час Ки. Допустимая доза равна 0,1 р.

77. Вычислить толщину слоя половинного ослабления узкого пучка рентгеновских лучей с длиной волны 6,2 $\cdot 10^{-2}$ А для свинца, воды и воздуха.

78. Интенсивность γ - излучения уменьшилась в шесть раз при прохождении через слой вещества толщиной 5 см. Найдите линейный коэффициент ослабления вещества.

79. Определить величину экспозиционной дозы рентгеновского излучения во внесистемных единицах (Р), если в 1 см^3 воздуха при 0°C и нормальном атмосферном давлении образуется $2,08 \times 10^9$ и $1,04 \times 10^9$ пар ионов.

80. Вычислите поглощённую дозу в радах, если при рентгеновском облучении лёгких человека при 0°C и нормальном атмосферном давлении образуется $2,08 \times 10^9$ и $1,04 \times 10^9$ пар ионов.

81. Определите количество пар ионов, образующихся в 1 см^3 воздуха при 0°C и нормальном атмосферном давлении, если при исследовании желудка собак экспозиционная доза рентгеновских лучей была равна $2,58 \times 10^{-4}$ и $2,58 \times 10^{-5}$ Кл/кг.

82. Во сколько раз увеличится экспозиционная доза при прохождении γ - излучения от точечного источника с энергией 1 МэВ, если источник расположен в слое воды и вне его. Толщина водного экрана 28,3 см. Коэффициент линейного поглощения $0,0706 \text{ см}^{-1}$ при $E_\gamma = 1 \text{ МэВ}$.

83. Определить γ - эквивалент, соответствующий активности ^{24}Na $A = 6 \text{ мКи}$, если $\Gamma\delta \text{ } ^{24}\text{Na} = 18,13 \text{ Р см}^2/\text{ч мКи}$.

84. Определить экспозиционную дозу, создаваемую препаратом в 20 г-экв Ra за 30 мин на расстоянии 1 м.

85. Определить мощность экспозиционной дозы, создаваемой источником ^{60}Co активностью 900 мКи на расстоянии 0,5 м от препарата.

86. Определить мощность поглощённой дозы в воздухе, создаваемую препаратом в 20 г-экв Ra на расстоянии 1 м.

2.2 Поглощение β - излучения

β -Частицы в электрическом и магнитном поле отклоняются сильнее, чем α -частицы; сильно рассеиваются веществом; ионизирующая способность их в сотни

раз меньше, чем у α -частиц, поэтому их пробег больше: в газах - десятки метров; в металлах - несколько миллиметров; в биологических тканях - до 15 мм. Для защиты от β -частиц используют металлические или пластмассовые экраны. Торможение β -частиц в веществе вызывает рентгеновское излучение.

Линейный коэффициент ослабления

$$\mu = 0,693 / \Delta_{1/2\beta}, \text{ см}^{-1} \quad (27)$$

Массовый коэффициент ослабления:

$$M\mu = 22 E_{\beta\text{max}} - 1,33 \text{ см}^2/\text{г}. \quad (28)$$

Для γ -излучения

$$\mu = 1/N \times dN/dt \quad (29)$$

Пример 1. Определить максимальную длину пробега β -частиц в воздухе и алюминии, если $E_{\beta\text{max}} = 3,15$ МэВ (КaC).

Решение: Используем зависимости:

$$R_{\beta\text{max}} (\text{воздух}) = 400 \times E_{\beta\text{max}}, \text{ см} \quad (30)$$

$$R_{\beta\text{max}} (\text{алюминий}) = 0,542 \times E_{\beta\text{max}} - 0,133 \text{ (г/см}^3\text{)} \quad (31)$$

$$R_{\beta\text{max}} (\text{воздух}) = 400 \cdot 3,15 = 1260 \text{ см} = 12,6 \text{ м}$$

$$R_{\beta\text{max}} (\text{алюминий}) = 0,542 \cdot 3,15 - 0,133 = 1,57 \text{ г/см}^3.$$

Пример 2. Определить пробег β -частиц в алюминии, если известен пробег в воздухе ($\rho (\text{воздух}) = 1,293 \times 10^{-3} \text{ г/см}^3$; $\rho (\text{алюминий}) = 2,7 \text{ г/см}^3$):

Решение: Используем зависимость:

$$R_1 / R_2 = \rho_2 / \rho_1 [(Z_2 / A_2) / (Z_1 / A_1)] \quad (32)$$

$$R_2 = 12,6 \times 1,293 \cdot 10^{-3} / 2,7 = 6,03 \times 10^{-3} \text{ м} = 0,6 \text{ см}.$$

Пример 3. Определить максимальную длину пробега β -частиц в алюминии если $E_{\beta\text{max}} = 3,15$ МэВ (КaC).

$$R_{\beta\text{max}} (\text{алюминий}) = 0,2 \times E_{\beta\text{max}} (\text{ см}). \quad (33)$$

$$R_{\beta\text{max}} (\text{алюминий}) = 0,2 \cdot 3,15 = 0,63 \text{ см}$$

Пример 4. Радионуклид, активностью (C) 2 мкКи, испускающий β -частицы со средней энергией (E_{β}) 0,07 МэВ (выход β -частиц считать равным 1), помещён в ионизационную камеру, заполненную воздухом, объёмом 200 см³. Определить мощность экспозиционной дозы источника β -излучения, создающего такой же ионизационный ток, как и источник γ -излучения.

Решение. Определяем число пар ионов, образующихся в 1 см^3 , при средней энергии ионообразования (W), равной 33,85 эВ.

$$N = \frac{E_{\beta} C}{W} = \frac{0,07 \cdot 10^6 \cdot 2 \cdot 3,7 \cdot 10^4}{33,85} = 152 \cdot 10^6 \text{ пар.ионов} / \text{см}^3 \cdot \text{с} \quad (34)$$

Этому числу пар соответствует ионизационный ток (с учётом объёма камеры)

$$I_{\text{нас}} = \frac{NeV}{3 \cdot 10^9} = \frac{152 \cdot 10^6 \cdot 4,8 \cdot 10^{-10} \cdot 200}{3 \cdot 10^9} = 4,86 \cdot 10^{-9} \text{ А}. \quad (35)$$

Определяем мощность экспозиционной дозы:

$$\times = \frac{3 \cdot 10^9 \cdot I_{\text{нас.}}}{V} = \frac{3 \cdot 10^9 \cdot 4,86 \cdot 10^{-9}}{200} = 0,073 \text{ Р} / \text{с} \quad (36)$$

Задачи для самостоятельного решения.

87. Пучок β -частиц от радиоактивного источника ^{90}Sr падает на поверхность воды. Плотность потока $I = 10^4$ частиц/($\text{см}^2 \text{ с}$). Определить дозу, поглощённую водой вблизи поверхности за 1 ч. Среднюю энергию β -частиц считать равной $E_{\beta\text{-макс}}/3$.

88. Вычислить толщину слоя половинного поглощения β -частиц испускаемых радиоактивным препаратом ^{32}P для воздуха, алюминия и свинца.

89. Радионуклид, активностью 4 мКи, испускающий β - частицы со средней энергией 0,06 МэВ (выход β -частиц считать равным 1), помещён в ионизационную камеру, заполненную воздухом, объёмом 300 см^3 . Определить мощность экспозиционной дозы источника β - излучения, создающего такой же ионизационный ток, как и источник γ - излучения.

90.Какая доля β -частиц, испускаемых ^{32}P , поглощается в алюминиевой фольге толщиной $20 \text{ мг}/\text{см}^2$?

91. Средняя продолжительность жизни радиоизотопа свинца ^{210}Pb равна 10^9 с. Вычислите константу радиоактивного распада (с^{-1}) и период полураспада (в годах).

92. Какая доля первоначального количества ядер ^{90}Sr останется через 10 и 100 лет; распадётся за один день, за 15 лет?

93. Определить максимальную длину пробега β - частиц в алюминии для источнику β - частиц $R_{\alpha c}$.

94. Определить пробег β - частиц в алюминии, если известен пробег в воздухе 12,6 м, $\rho_{\text{возд.}} = 1,293 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3$, $\rho_{\text{Al}} = 2,7 \text{ г/см}^3$.

2.3 Поглощение α - излучения

α - Частицы обладают большой ионизирующей, но малой проникающей способностью. Поэтому пробеги α -частиц даже в воздухе при нормальных условиях не превышают 11 см. В более плотных средах они ещё меньше, например, в мягких тканях человека пробег α -частицы измеряется микронами и полностью задерживаются листом обычной бумаги. Полная ионизация α -частиц составляет несколько сот тысяч пар ионов. Если на один акт ионизации атома необходимо затратить около 35 эВ энергии, то α -частица с энергией 7 МэВ образует $2 \cdot 10^5$ пар ионов. Чем больше энергия α -частиц, тем больше её пробег и больше образованных пар ионов.

Пробег α -частиц практически прямолинеен, в связи с влиянием большой массы. Можно определить пробег α – частиц в различных веществах, используя пробег в воздухе и тормозную способность вещества. Относительная линейная тормозная способность (S_L) равна:

$$S_L = S_b / S_z = R_{\alpha \text{ в}} / R_{\alpha z} \quad (37)$$

Относительная массовая тормозная способность (S_m) равна:

$$S_m = \rho_b R_{\alpha \text{ в}} / \rho_z R_{\alpha z} \quad (38)$$

Относительная атомная тормозная способность (S_a) равна:

$$S_a = A_z \rho_b R_{\alpha \text{ в}} / A_b \rho_z R_{\alpha z} \quad (39)$$

$A_b = 14,4$ - атомная масса воздуха;

Пример 1. Определить длину пробега α -частиц с энергией $E_{\alpha} = 5 \text{ МэВ}$ в воздухе. Для энергий от 4 до 7 МэВ:

$$R_{\alpha}(\text{воздух}) = \frac{1}{3} \sqrt[2]{E^3}; \quad (40)$$

$$R_c(\text{воздух}) = 1/3 \times \sqrt{125} = 3,73 \text{ см.}$$

Пример 2. Определить количество пар ионов, образуемых α -частицами в воздухе:

$$N = \frac{7 \text{ МэВ}}{33,85 \text{ эВ}} = 0,21 \times 10^6 \text{ пар.}$$

В других средах:

$$R_\alpha = 10^{-4} \sqrt{AE_\alpha^3} / \rho \quad (41)$$

$$\text{или} \quad R_\alpha = 10^{-4} \sqrt{AE_\alpha^3} / \rho^3 \sqrt{Z^2} \quad (42)$$

ρ (воздух) = $1,293 \times 10^{-3}$; ρ (вода) = 1; ρ (мышцы) = 1; ρ (жир) = 0,91; ρ (кости) = 1,5.

Пример 2. Определить длину пробега α -частиц с энергией $E_\alpha = 5$ МэВ в биологической ткани, если A ткани = 15,7; $Z\phi\phi.$ = 7,5; ρ (мышцы) = 1 г/см³. По формуле (26):

$$R_\alpha(\text{ткани}) = 10^{-4} \times \sqrt{(15,7 \times 5^3)} / 1 = 44,5 \times 10^{-4} \text{ см, а по формуле:}$$

$$R_\alpha(\text{ткани}) = 10^{-4} \times \sqrt{15,7 \times 5_\alpha^3} / 1^3 \sqrt{7,5^2} = 46,3 \times 10^{-4} \text{ см.}$$

Задачи для самостоятельного решения.

95. Определить длину пробега α -частиц с энергией $E_\alpha = 5$ МэВ в биологической ткани, если $A_{т.к.} = 15,7$, $R_{т.к.} = 6,17$ см, $A_z = A_v = 14,4$.

96. Какое количество α -частиц с энергией 4,4 МэВ, поглощённых в 1 г биологической ткани, соответствует поглощённой дозе 50 бэр? Для α -частиц $KK = 10$.

97. Найти пробег α -частицы в свинце, если её энергия соответствует пробегу 17 мкм в алюминии.

98. На расстоянии 5 см от радиоактивного препарата, испускающего α -частицы с энергией 9 МэВ, помещают алюминиевую фольгу. Какой минимальной толщины должна быть эта фольга, чтобы она задерживала все α -частицы?

Окружающая среда – воздух.

99. Поглощённая доза 10 рад = 0,1 Гр. Определить эквивалентную дозу от а) γ -излучателя, б) α -излучателя при внешнем излучении 3 Р/ч.

2.4 Взаимодействие нейтронов с веществом

Нейтроны не ионизируют атомы или молекулы среды, они вступают во взаимодействие с ядрами, передают им часть своей энергии (возникают ядра отдачи) при этом сами тормозятся и рассеиваются. Наибольшее количество энергии они передают ядрам, масса которых близка их массе (протоны, дейтрона). Нейтроны соединяются с ядрами, делая их неустойчивыми, способными к испусканию α -, β -частиц и γ -лучей. Таким образом, поглощение нейтронов веществом порождает ядра отдачи, имеющие значительную энергию и вызывает наведённую радиоактивность атомов. Это приводит к сильной ионизации вещества. **Нейтронное излучение обладает высокой проникающей способностью. Защита от него практически невозможна.**

Источниками нейтронов являются атомная бомба, ядерный реактор. Нейтрон обладает энергией от долей до десятков миллионов электрон-вольт.

Быстрые нейтроны эффективно замедляются веществами с малым атомным номером, такими как водородсодержащие вещества (вода, тяжёлая вода, пластмассы, полиэтилен, парафин), графит и др.

Медленные нейтроны поглощаются материалом содержащим бор (борная сталь, бораль, борный графит, карбид бора), кадмий, бетон и др.

В конструкционных материалах под действием потока нейтронов возникает высокая наведённая активность. Наведённая активность $A_{нав.}$ определяется в зависимости от плотности потока нейтронов φ , времени облучения t , периода полураспада $T_{1/2}$ данного РН эффективного сечения активации $\sigma_{акт.}$ элемента и количества атомов, находящихся в 1 г поглощающего вещества.

Если облучение материала происходит за время во много раз превышающее $T_{1/2}$, то полученная наведённая активность называется насыщенной наведённой активностью $A_{нас.}$, расп./(г с) и определяется как $A_{нас.} = \varphi \sigma_{акт.} n$.

После прекращения облучения нейтронами наведённая активность материала уменьшается со временем по закону экспоненты

$$A_{нав.} = A_{нас.} \exp(-0,693 t/T_{1/2}) \quad (43)$$

При коротком времени облучения наведённая активность будет меньше активности насыщения:

$$A_{нав.} = A_{нас.} [1 - \exp(-\lambda t)] = p(\varphi \sigma_{акт.} L_0 M/A) [1 - \exp(-0,693t/T_{1/2})] \quad (44)$$

Пример 1. Радионуклид ^{31}P массой 7 г облучается потоком медленных нейтронов плотностью 10^{13} т. нейтронов/(см²с) в течение 60 сут. Определить наведённую активность ^{32}P , пренебрегая поглощением нейтронов в источнике и выгоранием атомов фосфора ($T_{1/2}=14,3$ сут; $\sigma_{акт.} = 0,19 \cdot 10^{-24}$ см²; $p=1$).

Решение: 1) Определим наведённую активность:

$$A_{нас.} = p \times (\varphi \times \sigma_{акт.} \times L_0 \times M/A) \times [1 - \exp(-0,693t/T_{1/2})] \quad (45)$$

$$\begin{aligned} A_{нав.} &= 1 \cdot 0,19 \cdot 10^{-24} \times 10^{13} \times 6,02 \cdot 10^{23} \times 7/32 \times [1 - \exp(-0,693 \times 60 / 14,3)] \\ &= 23,6 \times 10^{10} \text{ Бк} \end{aligned}$$

Пример 2. Определить кратность ослабления плотности потока быстрых нейтронов от плоского мононаправленного источника на расстоянии от источника $y=200$ см, если в водную среду опущены железные пластины с суммарной толщиной $t=50$ см. Для микроскопического сечения выведения железа равного $2 \cdot 10^{-24}$ см² находим, что при толщине слоя воды 150 см кратность ослабления $K_{в.} = 10^9$. Тогда суммарная величина выведения железа составит:

$$\Sigma_{выв.}^{Fe} = \sigma_{выв.}^{Fe} n = \sigma_{выв.}^{Fe} L_0 \rho/A = 2 \cdot 10^{-24} \times 6,02 \cdot 10^{23} \times 7,85/55,8 = 0,17 \text{ см}^{-1}$$

Кратность ослабления для железа $= e^{0,17 \cdot 50} = 5 \times 10^3$. Общая кратность ослабления $= 10^9 \times 5 \times 10^3 = 5 \times 10^{12}$.

Пример 3. Кратность ослабления плотности потока быстрых нейтронов деления плоского мононаправленного источника равна 107. определить толщину бетонной защиты ($\lambda_6=16$ см).

Решение. $k=10^7 = \exp(x_6/16)$

$$x_6/16 = 7 \ln 10; x_6 = 257 \text{ см.}$$

Пример 4. Определить кратность ослабления плотности потока быстрых нейтронов деления слоем воды толщиной 2 м. Источник нейтронов плоский изотропный ($\lambda_{\text{H}_2\text{O}}=10$ см)

Решение: $k = \exp(x_{\text{H}_2\text{O}}/\lambda_{\text{H}_2\text{O}}) = \exp(200/10) = \exp 20 = 2,2 \cdot 10^4 \cdot 2,2 \cdot 10^4 = 4,84 \cdot 10^8$.

Задачи для самостоятельного решения.

100. Нейтроны впервые были получены в лабораторных условиях при бомбардировке α - частицами ядер бериллия ${}^9_4\text{Be}$. Запишите эту реакцию.

101. Какова должна быть толщина кадмиевой пластинки, чтобы поток тепловых нейтронов при прохождении через неё уменьшился в 100 раз?

102. При облучении нейтронами опухоли, избирательно накопившей радиоактивный бор ${}^{10}_5\text{B}$ образуется ${}^7_3\text{Li}$ и некоторое излучение, воздействующее на опухоль. Что это за излучение?

103. Во сколько раз ослабится узкий пучок тепловых нейтронов при прохождении слоя тяжёлой воды толщиной 1 см?

104. Тонкую индиевую фольгу ${}^{115}\text{In}$ с массой 0,2 г облучали изотропным потоком тепловых нейтронов в течение 2 ч. Через 0,5 ч после окончания облучения активность фольги 0,1 мКи. Определить плотность потока нейтронов.

105. Удельная активность золотой фольги, предварительно активированной нейтронами, равна $1,1 \times 10^8$ расп./сек г = 3 мКи/г. Сколько времени необходимо дополнительно облучать эту фольгу в поле тепловых нейтронов с плотностью 10^{10} нейтрон / (см² сек) чтобы увеличить её активность в $\eta = 10$ раз?

Контрольная работа 2

Вариант 1

1. Вычислить толщину слоя половинного поглощения свинца для γ -лучей, длина волны которых равна 0,9 пм.

2. Одна α -частица создаёт в воздухе около 150 тысяч пар ионов. Найдите ионизационный ток, создаваемый препаратом, который испускает 100 α -частиц в 1 с.

3. В организм человека попало 0,1% изотопа йода -131 от его суточной потребности 150 мг.

Сколько атомов этого изотопа распадается в организме ежесекундно в течение первого часа (считать, что в первый час скорость распада постоянна).

4. Известно, что при облучении ядер атомов азота $^{14}_7N$ потоком нейтронов может образоваться бор $^{11}_5B$, углерод $^{12}_6C$, литий 7_3Li . Какие частицы сопровождают такого рода превращения?

Вариант 2

1. Чему равна энергия γ -фотонов, если при прохождении через слой железа толщиной 3 см интенсивность излучения ослабляется в три раза?

2. Почему ОБЭ для α -частиц существенно больше, чем для β -частиц?

3.. В организм человека попало 1% изотопа калия -40 от его суточной потребности 21 мг. Сколько атомов этого изотопа распадается в организме ежесекундно в течение первого часа (считать, что в первый час скорость распада постоянна).

4. При облучении нейтронами опухоли, избирательно накопившей радиоактивный бор $^{10}_5B$, образуется 7_3Li и некоторое излучение, воздействующее на опухоль. Что это за излучение?

Вариант 3

1. Рассчитать толщину свинцового слоя, который ослабляет интенсивность излучения γ -фотонов с энергией 2 МэВ в пять раз.

2. Определить длину пробега α -частиц с энергией $E_\alpha = 7$ МэВ в биологической ткани, если $A_{т.к.} = 15,7$, $R_{т.к.} = 6,17$ см, $A_z = A_b = 14,4$.

3. В организм человека попало 2% изотопа калия -40 от его суточной потребности 21 мг. Сколько атомов этого изотопа распадается в организме ежесекундно в течение первого часа (считать, что в первый час скорость распада постоянна).

4. При облучении нейтронами опухоли, избирательно накопившей радиоактивный бор $^{10}_5B$, образуется 7_3Li и некоторое излучение, воздействующее на опухоль. Что это за излучение?

2.5 Дозиметрия излучений

Регистрация излучений производится с помощью следующих методов: -

ионизационный:

$$Xв = 3 \cdot 10^9 \times \frac{I_{нас.}}{Vt}, \quad (46)$$

$Xв$ - мощность экспозиционной дозы в воздухе, Р/с;

Vt - ионизационный объём воздуха, см³;

-люминесцентный: сцинтилляционный, по стимулированию и тушению нормальной люминесценции. Мощность экспозиционной дозы определяют по формуле:

$$Xв = \frac{I_a f}{2,44 \times 10^{-12} \xi M}, \quad (47)$$

где $Xв$ – мощность дозы;

I_a – анодный ток фотоумножителя;

f - коэффициент, характеризующий отношение поглощённой энергии, кэВ, затраченной на образование одного фотона, к выходу фотоэлектронов с катода ФЭУ на один испускаемый сцинтиллятором фотон.

ξ - коэффициент усиления ФЭУ ($\xi = 10^5 \div 10^{10}$);

M - масса кристалла.

- фотографический: устанавливают связь между степенью почернения плёнки S и экспозиционной дозой X ;

- нейтронной: наведённая активность $A_{нав.}$. Определяется по формуле:

$$A_{нав.} = \phi \sigma_{акт.} n [1 - \exp(-\lambda t)], \quad (48)$$

где ϕ - плотность потоков нейтронов;

$\sigma_{акт.}$ – сечение активации (реакция захвата нейтрона);

n - число атомов, находящихся в 1 г поглощающего вещества;

t - время облучения.

Пример 1. Мощность экспозиционной дозы, измеренная дозиметром от точечного источника γ -излучения ⁶⁰Со ($E\gamma=1,25$ МэВ) на рабочем месте равна $X=77,2$ мкР/с. Определить толщину свинцовой защиты $X_{Рв}$, если продолжительность работы с источником для лиц категории облучения А составляет $t=6$ ч.

Решение: Допустимая мощность экспозиционной дозы

$$X_{\text{дмда}} = 4,63/t = 4,63/6 = 0,772 \text{ мкР/с.}$$

Необходимая кратность ослабления $K = X/X_{\text{дмда}} = 77,2/0,772 = 100$.

Зная E_{γ} и K определяем толщину свинцовой защиты $X_{\text{Pb}} = 8,45$ см свинца.

2.5.1 Расчёт доз от точечного источника при внешнем облучении

Доза облучения прямо пропорциональна мощности дозы облучения и времени воздействия

$$D = P \times t, \quad (49)$$

где D – доза облучения; P – мощность дозы облучения; t – время облучения.

Доза облучения от внешних точечных источников прямо пропорциональна мощности дозы облучения и обратно пропорциональна квадрату расстояния до него.

$$D = P \times t / R^2, \quad (50)$$

где R - расстояние до источника излучения, см.

Существует взаимосвязь между активностью (A) радиоизотопов и мощностью дозы излучения, создаваемой их гамма- излучением. Поэтому мощность дозы излучения (P) можно заменить выражением ($P = \Gamma \delta \times A$) и формула примет вид:

$$D = \Gamma \delta \times A \times t / R^2, \quad (51)$$

где $\Gamma \delta$ - гамма-постоянная данного радиоизотопа ($\text{Р} \times \text{см}^2 / \text{ч} \times \text{мКи}$);

A - активность данного радиоизотопа, мКи; t – время облучения, часы; R - расстояние до источника, см.

Для расчёта поглощённых доз облучения от внешних гамма- источников можно использовать следующую формулу:

$$D = 0,93 \times K \times A \times t / R^2, \quad (52)$$

где 0,93 – коэффициент перевода рентгена в рад.

2.5.2 Расчёт доз при внутреннем облучении

Для оценки дозы внутреннего облучения, тяжести радиационного поражения и прогнозирования исхода важное значение имеет продолжительность периода полувыведения радиоактивного изотопа за счёт метаболических процессов – $T_{\text{биол}}$. Уменьшение радиоактивности в организме происходит не только за счёт выделения изотопа, но и в результате процесса физического распада его ($T_{\text{физ}}$).

Эти два процесса протекают одновременно и составляют эффективный период полувыведения, продолжительность которого определяется формулой:

$$T_{эфф.} = (T_{биол.} \times T_{физ.}) / (T_{биол.} + T_{физ.}) \quad (53)$$

Поглощённая доза за счёт **гамма-излучения**, накапливающаяся от момента поступления изотопа до полного его распада, может быть рассчитана по формуле:

$$D_{\gamma} = 0,032 \times \Gamma \delta \times A \times T_{эфф.}, \quad (54)$$

а на момент времени t по формуле:

$$D_{\gamma} = 0,032 \times \Gamma \delta \times A \times T_{эфф.} \times (1 - e^{-0,693 \times t / T_{эфф.}}), \quad (55)$$

где D_{γ} - поглощённая доза облучения, рад; 0,032 – постоянный расчётный коэффициент поглощённых доз; $\Gamma \delta$ - гамма-постоянная радиоизотопа; A – количество радиоизотопа в ткани, мКи; $T_{эфф.}$ – эффективный период полувыведения радиоизотопа из организма или органа; e – основание натурального логарифма ($e=2,72$).

Поглощённая доза за счёт **бета-излучения**, накапливающаяся от момента поступления изотопа до полного его распада, может быть рассчитана по формуле:

$$D_{\beta} = 73,8 \times A \times E_{\beta} \times T_{эфф.}, \quad (56)$$

а на момент времени t по формуле:

$$D_{\beta} = 73,8 \times A \times E_{\beta} \times T_{эфф.} \times (1 - e^{-0,693 \times t / T_{эфф.}}), \quad (57)$$

где D_{β} - поглощённая доза, рад; 73,8 – постоянный расчётный коэффициент поглощённых доз; A – количество радиоизотопа в ткани, мКи; E_{β} - средняя энергия бета-частиц, МэВ; $T_{эфф.}$ – эффективный период полувыведения радиоизотопа из организма.

Поглощённая доза за счёт **альфа-излучения**, накапливающаяся от момента поступления изотопа до полного его распада, может быть рассчитана по следующей формуле:

$$D_{\alpha} = 73,8 \times A \times E_{\alpha} \times T_{эфф.} \times KK (ОБЭ), \quad (58)$$

а на момент времени t по формуле:

$$D_{\alpha} = 73,8 \times A \times E_{\alpha} \times T_{эфф.} \times KK (ОБЭ) \times (1 - e^{-0,693 \times t / T_{эфф.}}), \quad (59)$$

где $D\alpha$ - поглощённая доза, бэр;

A – количество радиоизотопа в ткани, мКИ;

E_{α} - энергия альфа-частиц, МэВ;

KK (ОБЭ) – относительная биологическая эффективность излучения;

$T_{эфф}$. – эффективный период полувыведения радиоизотопа.

Если организм одновременно подвергается внутреннему облучению различными видами облучения, то рассчитанные дозы от каждого вида суммируются.

Задачи для самостоятельного решения.

106. Рассчитать экспозиционную дозу в единицах системы СИ, если поглощённая доза, полученная коровой равна 10,5 и 120,0 Гр.

107. Определить экспозиционную дозу в рентгенах, если поглощённая доза равна 1) 10 и 20 рад; 2) 50 и 100 мрад.

108. Определить мощность экспозиционной дозы гамма-излучения в единицах СИ, если она равна, Р/ч: 1,0, 15,0, 5,0, 3,0, 0,1, 0,05.

109. Определить поглощённую дозу в единицах системы СИ, если экспозиционная доза составила $2,58 \cdot 10^{-4}$ и $12,9 \cdot 10^{-4}$ Кл/кг.

110. Выразить поглощённую дозу в радах, если она составила: 1,0, 0,5 и 0,05 Гр; 10 и 20 мГр; 75 и 300 мкГр

111. Определить мощность поглощённой дозы гамма-излучения в единицах СИ, если экспозиционная доза равна: 1,0 и 15,0 Р/ч, 5,0 и 15 кР/ч.

112. Определить мощность поглощённой дозы гамма-излучения в рад/ч, если экспозиционная доза равна: 3,0 и 15,0 Р/ч, 100,0 и 50 мР/ч.

113. Определить мощность эквивалентной (биологической) дозы рентгеновского излучения, создаваемой в биологическом объекте, если экспозиционная доза равна 1,0 и 20,0 Р/ч; 15,0 и 200,0 мкР/ч.

114. Определить мощность поглощённой дозы рентгеновского излучения в рад/час, если мощность экспозиционной дозы равна $2,58 \times 10^{-4}$ и $1,29 \times 10^{-3}$ А/кг; $2,58 \times 10^2$ и 2,58 А/кг.

115. Вычислить мощность поглощённой дозы в единицах СИ, если она равна 1,0 и 40,0 рад/ч; 18,0 и 250,0 мрад/ч.

116. Рассчитать уровень гамма -фона в единицах СИ, если мощность поглощённой дозы равна 1,0 и 20 рад/ч; 10,0 и 40,0 мрад/ч.

109. Вычислить уровень радиации на местности в Р/ч, если мощность поглощённой дозы равна 1,0 и 50,0 рад/ч; 10,0 и 40,0 мрад/ч.

110. Вычислить мощность поглощённой дозы в единицах СИ, если она равна 1,0 и 40,0 рад/ч; 18,0 и 250 мрад/ч.

111. Рассчитать мощность эквивалентной дозы в бар/ч, создаваемую гамма-излучением в биологическом объекте, если мощность поглощённой дозы равна: 1,0 и 200 рад/ч; 25,0 и 5,0 мрад/ч.

112. Вычислить мощность эквивалентной дозы в бэр/ч рентгеновского излучения, создаваемую бета-излучением, если она равна 1,0 и 0,2 Гр/ч; 10,0 и 0,1 мГр/ч.

113. Рассчитать эквивалентную дозу в бэрах, полученную организмом при гамма – облучении, если 1) экспозиционная доза равна 1,0 и 25,0 Р; 100,0 и 25,0 мГр/ч; 2) поглощённая доза равна 0,5 и 5,0 рад; 10,0 и 25,0 мрад.

114. Рассчитать эквивалентную дозу в бэрах, полученную биологическим объектом при нейтронном облучении, если поглощённая доза равна 0,5 и 5,0 Гр; 10,0 и 25,0 мГр.

115. Вычислить эквивалентную дозу в единицах СИ, полученную животным при облучении быстрыми нейтронами, если поглощённая доза равна 0,5 и 5,0 рад; 0,1 и 0,4 крад.

116. Вычислить эквивалентную дозу в единицах СИ, полученную животным при облучении медленными нейтронами, если поглощённая доза равна 0,1 и 10,0 Гр; 10 и 200 Гр.

117. Рассчитайте поглощённую дозу, используя следующие данные (табл. 2):

Радиоизотоп	Количество изотопа	Доза за 1 час на расстоянии от источника, рад		Доза за 1 сутки на расстоянии от источника, рад	
		1 см	10 см	0,5 м	1 м
1. ^{90}Sr	1 мКи	1 см	10 см	0,5 м	1 м
	0,1 мКи	1 см	10 см	0,5 м	1 м
2. ^{137}Cs	1 мКи	1 см	10 см	0,5 м	1 м
	0,1 мКи	1 см	10 см	0,5 м	1 м

118. Рассчитать суммарную эквивалентную дозу, полученную биологическим объектом от смешанного источника излучения, если поглощённые дозы составили: А) от гамма-излучения – 10 рад, бета-излучения – 1 рад, альфа-излучения – 1 рад, быстрых нейтронов – 10 рад;

Б) от бета- излучения – 10 Гр, альфа-излучения – 1 Гр, гамма- излучения – 10 Гр, медленных нейтронов – 10 Гр.

119. Препарат радия $^{220}_{88}\text{Ra}$ с начальной активностью 0,5 Ки хранился в течение двух лет. Чему равна мощность экспозиционной дозы излучения препарата на расстоянии 2 м по истечении этого срока?

120. Мощность экспозиционной дозы на расстоянии 10 см от источника составляет 85 мР/ч. На каком расстоянии от источника можно находиться без защиты, если допустимая мощность дозы равна 0,017 мР/ч?

121. Какую экспозиционную дозу создаёт препарат радиоактивного кобальта с активностью 10 Ки за 30 мин на расстоянии 2 м?

122. В 10 г воды было поглощено 10^{20} протонов с энергией 5 МэВ. Чему равна поглощённая доза в радах?

123. Мягкие ткани человека подвергаются радиоактивному облучению в течение 2 часов, при этом экспозиционная доза составила 0,5 рентгена. Чему равна поглощённая доза в радах? Как соотносятся между собой биологическая и поглощённая дозы?

124. Средняя мощность экспозиционной дозы облучения в рентгеновском кабинете равна $6,45 \times 10^{-12}$ Кл/(кг*с). Врач находится в течение дня 5ч в этом кабинете. Какова его доза облучения за шесть рабочих дней?

125. Радиационный фон в г. Иркутске составляет 15 мкР/ч. Определите поглощённую и экспозиционную дозы, полученные жителями этого города в течение года.

126. При исследовании радиочувствительности живых организмов крыс облучали рентгеновскими лучами в течение 4 ч. При этом полученная ими суммарная доза составила 300 бэр. Найдите мощность экспозиционной и поглощённой дозы в этом эксперименте (в единицах СИ).

127. Смертельная доза для человека массой 70 кг при облучении всего тела рентгеновскими или γ -лучами равна 600 рад. На сколько градусов от нормальной поднимется температура тела человека при таком облучении, если считать его однородным фантомом с удельной теплоёмкостью 3,33 кДж/(кг*К)?

128. Мощность экспозиционной дозы γ -излучения на расстоянии 1 м от точечного источника составляет $2,15 \times 10^{-7}$ Кл/кг. Определите минимальное расстояние от источника, на котором можно ежедневно работать по 6 ч без защиты. Предельно допустимой эквивалентной дозой при профессиональном облучении считать 5×10^{-2} Дж/кг в течение года. Поглощение γ -излучения воздухом не учитывать.

129. Определить, какую мощность экспозиционной дозы, создаваемую γ -излучением в воздухе, можно измерить сцинтилляционным счётчиком (без учёта хода с жёсткостью). Сцинтиллятором служит антрацен. Анодный ток фотоумножителя $I_a = 10^{-7}$ А, коэффициент усиления ФЭУ $\zeta = 10^6$, масса кристалла $M = 100$ г. Для сцинтиллятора можно принять $f = 2/h$, где h - световой выход относительно антрацена. Для антрацена $h = 1$.

130. Определить, какую мощность экспозиционной дозы, создаваемую γ -излучением в воздухе, можно измерить сцинтилляционным счётчиком (без учёта

хода с жёсткостью). Сцинтиллятором служит антрацен. Анодный ток фотоумножителя $I_a=10^{-5}$ А, коэффициент усиления ФЭУ $\zeta=10^6$, масса кристалла $M=150$ г. Для сцинтиллятора можно принять $f=2/h$, где h - световой выход относительно антрацена. Для антрацена $h=1$.

131. В 10 г ткани поглощается 10^9 α - частиц с энергией около 5 МэВ. Найдите поглощённую и эквивалентную дозы. Коэффициент качества k для α - частиц равен 20.

132. Телом массой 60 кг в течение 6 ч поглощена энергия 1 Дж. Найдите поглощённую дозу и мощность поглощённой дозы в единицах СИ и во внесистемных единицах.

133. Мощность экспозиционной дозы на расстоянии 10 см от источника составляет 85 мР/ч. На каком расстоянии от источника можно находиться без защиты, если допустимая мощность дозы равна 0,017 мР/ч?

134. Препарат радия ${}^{220}_{88}\text{Ra}$ с начальной активностью 0,5 Ки хранится в течение двух лет. Чему равна мощность экспозиционной дозы излучения препарата на расстоянии 2 м по истечении этого срока?

135. Вычислить поглощённые дозы облучения по вариантам. Данные оформить в виде таблицы 3:

	Радио-изотоп	Количество РН	Вид излучения	Г δ или энергия излучения	Критический орган	Тэфф., сут.	Доза, бэр
Вариант 1	Au-198 Po-210 P-32	1 мКи 1 мкКи 1 мКи	гамма альфа бета	Г δ = 2,3 E = 5,3 E = 1,73	Всё тело Всё тело Всё тело, кости	2,6 25,0 13,5 14,1	
Вариант 2	Co-60 Po-210 S-35	1 мКи 1 мкКи 1 мКи	гамма альфа бета	Г δ = 12,9 E = 5,3 E = 0,17	Всё тело почки Всё тело, кожа	9,5 46,0 44,3 82,4	
Вариант 3	Cs-137 Po-210 Ba-140	1 мКи 1 мкКи 1 мКи	гамма альфа бета	Г δ = 3,1 E = 5,3 E = 1,02	Всё тело селезёнка Всё тело мышцы	70,0 42,0 10,07	
Вариант 4	I-131 Po-210 Ce-144	1 мКи 1 мкКи 1 мКи	гамма альфа бета	Г δ = 2,3 E = 5,3 E = 0,32	Всё тело печень Всё тело кости	7,6 32,0 191,0 243,0	
Вариант 5	Na-24 Po-210 Ru-106	1 мКи 1 мкКи 1 мКи	гамма альфа бета	Г δ = 18,5 E = 5,3 E = 3,7	Всё тело, кости Всё тело, кости	0,6 20,0 7,2 15,0	

136. Определить а) энергию, выделяющуюся при сгорании 1 кг изотопа ^{235}U ; какое количество нефти с теплотворной способностью 10 ккал / г выделяет при сгорании такую энергию?

б) электрическую мощность атомной электростанции, если расход изотопа ^{235}U в год составляет 192 кг при к.п.д. 20%;

в) массу изотопа ^{235}U , подвергшуюся делению при взрыве атомной бомбы с тротиловым эквивалентом 30 килотонн, если тепловой эквивалент тротила равен 1 ккал/г.

137. В 1 мл морской воды содержится 10^{-15} г радона $^{226}_{86}\text{Rn}$. Какое количество воды имеет активность, равную 10 мКи?

138. Во сколько раз уменьшится количество ядер радиоактивного цезия за 10 лет?

139. В ампуле находится радиоактивный иод $^{131}_{53}\text{I}$ активностью 100 мКи. Чему равна активность препарата через сутки?

140. Какое количество радиоактивного кобальта $^{60}_{27}\text{Co}$ надо взять, чтобы получить источник излучения с той же активностью, которой обладает 5 г иода $^{131}_{53}\text{I}$?

141. Мягкие ткани человека подвергаются радиоактивному облучению в течение 1,5 часа, при этом экспозиционная доза составила 0,6 рентгена. Чему равна поглощённая доза в радах? Как соотносятся между собой биологическая и поглощённая дозы?

142. Найдите удельную массовую активность урана $^{238}_{92}\text{U}$.

143. В 500 г воды было поглощено 10^{20} протонов с энергией 5 МэВ. Чему равна поглощённая доза в радах?

144. При делении 1 г урана выделяется энергия $8,28 \times 10^{10}$ Дж. Какое количество нефти должно сгореть для получения такой энергии?

145. Почему ОБЭ для α - частиц существенно больше, чем для β - частиц?

Контрольная работа 3

Вариант 1

1. Определить экспозиционную дозу в единицах системы СИ, если поглощённая доза равна 1) 1,0 и 20,0 рад; 2) 50,0 и 100 мрад, 3) 10 и 13 мР; 4) 20 и 25 Р.

2. Вычислите поглощённую дозу в единицах СИ, если при облучении животного гамма-лучами при 0 °С и нормальном атмосферном давлении образуется $2,08 \times 10^4$ и $1,04 \times 10^4$ пар ионов.

3. Радионуклид, активностью 5 мкКи, испускающий β -частицы со средней энергией 0,06 МэВ (выход β -частиц считать равным 1), помещён в ионизационную камеру, заполненную воздухом, объёмом 100 см³. Определить мощность экспозиционной дозы источника β -излучения, создающего такой же ионизационный ток, как и источник γ -излучения.

4. Рассчитать гамма-фон в Р/ч, если мощность экспозиционной дозы равна $2,58 \times 10^{-4}$ и $1,29 \times 10^{-3}$ А/кг; $2,58 \times 10^2$ и 2,58 А/кг.

5. Вычислить уровень радиации на местности в Р/ч, если мощность поглощённой дозы равна: 1,0 и 50,0 рад/ч; 10,0 и 40,0 мрад/ч.

6. В источнике минеральной воды активность радона составляет 1000 Бк на 1 л. Какое количество атомов радона попадёт в организм пациента, выпившего стакан минеральной воды объёмом 0,2 л?

Вариант 2

1. Рассчитать эквивалентную дозу в бэрах, полученную биологическими тканями при альфа облучении, если поглощённая доза равна 0,5 и 5,0 рад; 10,0 и 25,0 рад.

2. На каком расстоянии от препарата с радием активностью 100 мКи можно находиться, чтобы эквивалентная доза за шестичасовой рабочий день не превышала допустимую за сутки для профессионалов?

3. Определить, какую мощность экспозиционной дозы, создаваемую γ -излучением в воздухе, можно измерить сцинтилляционным счётчиком (без учёта хода с жёсткостью). Сцинтиллятором служит антрацен. Анодный ток фотоумножителя $I_a=10^{-8}$ А, коэффициент усиления ФЭУ $\zeta=10^6$, масса кристалла $M=50$ г. Для сцинтиллятора можно принять $f=2/h$, где h - световой выход относительно антрацена. Для антрацена $h=1$.

4. Определить величину экспозиционной дозы гамма-излучения в единицах СИ, если в 1 см^3 воздуха при 0°C и нормальном атмосферном давлении образуется $2,08 \times 10^5$ и $1,04 \times 10^5$ пар ионов.

5. Вычислите поглощённую дозу в единицах СИ, если при облучении животного гамма-лучами при 0°C и нормальном атмосферном давлении образуется $2,08 \times 10^4$ и $1,04 \times 10^4$ пар ионов.

6. Радионуклид, активностью 3 мкКи, испускающий β -частицы со средней энергией 0,06 МэВ (выход β -частиц считать равным 1), помещён в ионизационную камеру, заполненную воздухом, объёмом 500 см^3 . Определить мощность экспозиционной дозы источника β -излучения, создающего такой же ионизационный ток, как и источник γ -излучения.

Вариант 3

1. Рассчитать уровень гамма-фона в единицах СИ, если мощность поглощённой дозы равна 10 и 200 рад/ч; 10,0 и 40,0 мрад/ч.

2. Вычислить уровень радиации на местности в Р/ч, если мощность поглощённой дозы равна: 1,0 и 20 рад/ч; 25,0 и 5,0 мрад/ч.

3. Для исследования щитовидной железы больному ввели 20 мл 10%-ного раствора глюкозы с радиоактивным иодом. Удельная активность иода в момент введения составляла 0,08 мкКи/мл. Найдите массу иода в растворе. Учтеть, что каждая молекула глюкозы связывает один иод.

4. Рассчитать эквивалентную дозу в зивертах, полученную биологическим объектом при гамма-облучении, если поглощённая доза равна 0,5 и 5,0 рад; 0,1 и 0,4 крад.

5. Мощность экспозиционной дозы γ -излучения на расстоянии 1 м от источника составляет 0,1 Р/мин. Рабочий находится 6 ч в день на расстоянии 10 м от источника. Какую эквивалентную дозу облучения он получает за один рабочий день?

6. Определить, какую мощность экспозиционной дозы, создаваемую γ -излучением в воздухе, можно измерить сцинтилляционным счётчиком (без учёта хода с жёсткостью). Сцинтиллятором служит антрацен. Анодный ток фотоумножителя $I_a=10^{-6}$ А, коэффициент усиления ФЭУ $\zeta=10^6$, масса кристалла $M=70$ г. Для сцинтиллятора можно принять $f=2/h$, где h - световой выход относительно антрацена. Для антрацена $h=1$.

4 РАДИОНУКЛИДЫ В АГРОСФЕРЕ

4.1 Транспорт радионуклидов по сельскохозяйственным цепочкам с участием растений

Для прогноза уровня загрязнения конкретной культуры радионуклидами цезия или стронция необходимы коэффициенты, рассчитанные для плотности загрязнения почв 1 Ки/км² (37 Бк/м²), умножить на величину плотности физической загрязнённости почвы:

$$A=B \times K \times 37, \quad (60)$$

где A – уровень загрязнённости растениеводческой продукции, Бк/кг; B – плотность загрязнения почвы, Ки/км²; K – коэффициент пропорциональности (удельная радиоактивность 1 кг продукции при плотности загрязнения почв 1 Ки/км², нКи/кг; 37 – коэффициент для перевода нКи в Бк. Сопоставляя полученную величину с нормативной, определяем возможность использования корма.

Для определения содержания ^{90}Sr в растениях пользуются формулой:

$$A = КП \times a/c, \quad (61)$$

где A – содержание ^{90}Sr в почве, стронцевые единицы); c – содержание Ca на 100 г почвы, мг \times экв.; a – плотность загрязнения почвы радионуклидом ^{90}Sr , мКи/км² или Бк/м²; $КП$ – комплексный показатель Клечковского (табл. 4)

Таблица 4 - Величина комплексного показателя (КП) для сельскохозяйственной продукции

Вид продукции	Значения КП	
	экстремальные	средние
Сено естественных лугов	30-200	60
клевера	13-16	15
люцерны	11-14	12
Силосные культуры и солома	9-16	14
Зерно-злаковые и злаково-бобовые	7-11	9

Одна стронциевая единица (1 с.е.) – отношение концентрации ^{90}Sr (пКи/кг продукции) к концентрации в нём кальция (г/кг). При поверхностном загрязнении естественных кормовых угодий ^{90}Sr , равном 1мКи/км^2 (37 Бк/м^2), 1 кг сухого вещества естественных трав содержит 4,9 с.е. сеяных злаковых трав – 1,5 с.е., свеклы 1,7 с.е., клубней картофеля – 1,56 с.е., а в 1 кг зерна пшеницы – 0,8 с.е. ^{90}Sr .

Необходимость описания совокупности процессов миграции РН в агрофере обусловила широкое применение системного подхода с использованием модели. Например, Научным комитетом ООН по действию атомной радиации для описания переноса РН по наиболее важным пищевым трофическим цепям от радиоактивных выпадений до организма человека используется блочная модель транспорта РН в окружающей среде:

Внешнее облучение



Миграция РН в системе оросительная **вода-почва-растение** усиливается в условиях орошаемого земледелия, т.к. исключается сорбция РН твёрдой фазой. При этом большее усиление отмечается для менее мобильных РН.

Загрязнение растительной массы после одноразового выпадения на посевы можно определить по формуле:

$$A_t = \sigma \left(\alpha_0 - \frac{\text{ПП}_t}{100} \right), \quad (62)$$

где A_t – содержание РН в растительной массе через t дней после загрязнения посева, Ки/м²;

σ – плотность радиоактивных выпадений, Ки/м²,

α_0 – коэффициент первичного удерживания (в долях единицы),

ПП_t – полевые потери, процент первоначально задержанных растениями количества радиоактивных веществ за время t .

Чтобы оценить возможность использования загрязнённой растительной продукции для пищевых и технических целей нужно знать содержание радиоактивных веществ на единицу массы урожая или на единицу массы продукции:

$$C = A_t / U, \quad (63)$$

где C – концентрация радиоактивных веществ в растительной массе, Ки/кг;

A_t - содержание радиоактивных веществ в растительной массе, Ки/м²;

U – запас биомассы (урожайность) кг/м².

Определение содержания ⁹⁰Sr в растениеводческой продукции проводят методом проростков. Для этого берут образцы почвы с глубины пахотного слоя конкретного поля, тщательно перемешивают, затем на таком усреднённом образце высевают пророщенные семена. Через 20 дней надземную массу растений срезают на уровне почвы, промывают проточной водой, высушивают и в воздушно-сухом материале определяют содержание радионуклидов радиохимическим методом (табл.5).

Таблица 5 - Коэффициенты пересчёта содержания радионуклида в 20-ти дневных растениях для прогноза загрязнённости урожая в расчёте на воздушно-сухую массу урожая

¹³⁷ Cs			⁹⁰ Sr		
культура	зерно, клубни	солома, ботва	культура	зерно, клубни	солома, ботва
Овёс	0,20	0,45	Овёс	0,050	0,70
Ячмень	0,20	0,50	Ячмень	0,035	0,50
Яровая пшеница	0,22	0,46	Озимая пшеница	0,060	0,60
Гречиха	0,21	0,39	Яровая пшеница	0,045	0,70
Вика	0,35	0,70	Горох	0,040	1,25
Картофель	0,56	0,70	Картофель	0,035	0,70

Пример 1. Оценить содержание РН в растительной массе пшеницы через 10 и 35 суток после выпадений 100 мкКи, если коэффициент первичного удерживания 0,5 и 0,32, а полевые потери (%) – 10 и 20.

Решение:

$$A_t = 100 \left(0,5 - \frac{10}{100} \right) = 40 \text{ мкКи} \quad A_t = 100 \left(0,32 - \frac{20}{100} \right) = 12 \text{ мкКи}$$

Пример 2. Оценить концентрацию радионуклидов в зерне пшеницы, если

$$A_t = 40 \text{ мКи/м}^2, \text{ а } Y = 16 \text{ ц/га} = 1600/10000 = 0,16 \text{ кг/м}^2,$$

Решение: $C = 40/0,16 = 250 \text{ мКи/кг}$.

Пример 3. Определить уровень радиоактивной загрязнённости сена многолетнего злаково-бобового (по ^{137}Cs) на дерново-подзолистой суглинистой почве. Плотность загрязнения почвы по данным радиохимических исследований равна 15 Ки/км^2 при содержании обменного калия 150 мг/кг почвы. Коэффициент пропорциональности равен $0,57 \text{ нКи/кг}$.

Решение: $A = 15 \times 0,57 \times 37 = 316 \text{ Бк/кг}$.

Аналогично делают расчёты для прогноза содержания ^{90}Sr в сельскохозяйственных культурах с учётом кислотности почв (Приложение Л).

Пример 4. Дать прогноз концентрации ^{90}Sr в сене клевера, если известно, что плотность загрязнения почвы по данным радиохимических исследований равна 15 Ки/км^2 , содержание ^{90}Sr в почве равно 40 мКи/км^2 (1480 Бк/м^2 , а содержание обменного Са – 10 мг-экв/100 г почвы).

Решение: $A = 15 \times (40/10) = 60 \text{ с.е.}$ (метод применим при содержании Са в пахотных землях от 4 до 25 мг-экв/100 г почвы).

Задачи для самостоятельного решения

144. Составить диаграмму вертикального распределения ^{137}Cs в лесной почве спустя 15 лет после загрязнения (Юг Калужской области, дерново-подзолистая легкосуглинистая почва, 2001) по следующим данным (табл.6):

Глубина, см	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12
Запас в слое, кБк/м ²	9	18	62	39	7	3

145. 1 кормовая единица это концентрация РН (в Ки) в расчёте на 1 кг овса, выращенного на чернозёмах с плотностью загрязнённой территории стронцием-90 и цезием-137 1 Ки/км². Загрязнение стронцием-90 4×10^{-10} ; цезием-137- 3×10^{-11} Ки/км². Выразить концентрацию стронция-90 и цезия-137 в сене естественного сенокоса, если содержание в 1 кормовой единице 31,7 и 67,4 Ки, соответственно. За единицу принимают содержание радионуклида на 1 кг массы растений на обыкновенном чёрнозёме при содержании обменного кальция свыше 20-25 мэкв на 100 г почвы поступление стронция-90 мало зависит от изменения содержания

146. Оценить во сколько раз увеличивается поступление стронция-90 в солому и зерно пшеницы и овса из дерново-подзолистой почвы: а) разного гранулометрического состава при одинаковой величине рН 4,8; б) одинаковом гранулометрическом составе, но разном рН.

147. В хозяйстве имеется 5 т грубого корма (сена). Сено загрязнено йодом -131 в количестве 20 мКи. Определить, сколько этого радиоизотопа останется в сене через 16, 24 и 32 дня и можно ли скармливать его мясному и молочному скоту и в каком количестве. ПДУ загрязнения радиоактивными веществами в суточном рационе: для молочных животных – 4 мкКи, для мясных животных – 10 мкКи.

148. В хозяйстве имеется комбикорм, загрязнённый цезием – 134 в количестве 1,5 мкКи/кг. Определить, сколько цезия -134 останется в комбикорме через 2,5 месяца, 12 месяцев и 2 года и когда этот комбикорм можно скармливать мясным животным (ПДУ загрязнения комбикорма $0,8 \times 10^{-6}$ Ки/кг).

149. Грубый корм (сено) загрязнено фосфором – 32 в количестве 78 мкКи/кг. Определить сколько радиофосфора было в сене 7 и 58 дней тому назад, а сколько будет через 29 и 115 дней.

150 На складе хранится 10 ц овечьей шерсти, загрязнённой серой -35 в количестве 100 мКи. Вычислить, сколько в шерсти было радиосеры 175 и 218 дней тому назад и сколько останется её через 175 и 218 дней.

151. Загрязнение зернового корма рутением-106 составляет 5 мКи. Определить, сколько этого радиоизотопа останется через 15 суток, 2,5 месяца, 0,5 года, 1 год.

152. При закладке силоса зелёная трава была загрязнена сурьмой – 124 в количестве 3 мКи/кг. Определите, сколько этого радиоизотопа останется в силосе через 6 и 10 месяцев.

153. Пастбищная трава загрязнена теллуром -127 в количестве 0,5 мКи/кг. Определите, сколько этого радиоизотопа останется через 1 2, 6, 12 месяцев.

154. Загрязнение корма барием-140 составляет 12 мКи/кг. Определить, сколько радиобария было в корме 2 недели тому назад и сколько будет через 7 суток и 1,5 месяца.

155. Зерновой корм загрязнён полонием 210 в количестве 15 мКи/кг. Определите сколько этого радиоизотопа останется через 70, 280 и 350 дней.

156. Радиоэкологическая информация может быть представлена в форме двух показателей: а) в единицах удельной активности почвы $a_{п}$, обычно в Бк/кг или б) в единицах плотности поверхностного загрязнения $a_{с}$ в Ки/км². Найти пересчётный коэффициент, если 1 Ки = $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк, а масса пахотного слоя почвы на площади 1 км² принимается равной $3 \cdot 10^8$ кг.

157. Плотность атмосферных выпадений ¹³⁷Cs в Иркутской области 175 мКи/км² на шестой день после чернобыльской аварии, что в 10 раз выше уровня регионального фона и в 3,5 раза выше среднего уровня глобального фона. Рассчитайте уровни регионального и глобального фона и выразите их в Беккерелях (Бк/км²).

4.2 Транспорт радионуклидов по сельскохозяйственным цепочкам с участием животных

Транспорт РН по сельскохозяйственным цепочкам с участием животных описывают с помощью ряда показателей.

Кратность накопления (F) соотносит содержание РН в определённом органе или ткани животного и количество РН, поступившее в организм в условиях длительного введения радиоактивных веществ. Величина F зависит от выведения этого РН из организма. При продолжительном кормлении животных загрязнёнными кормами:

$$F = CM/Q, \quad (64)$$

где C - концентрация РН в органе или ткани, Бк/г; M - масса органа или ткани, г; Q - количество РН, ежедневно поступающее с кормом в организм животного, Бк.

Коэффициент всасывания $f_{вс}$ в организме животных используется для оценки биологической подвижности РН:

$$f_{вс} = \frac{\text{(количество РН, перешедшее в кровь, Бк)}}{\text{(количество РН, поступившее с рационом, Бк)}}, \quad (65)$$

Выведение РН из организма животных описывают с помощью периода полувыведения ($T_{биол}$).

Накопление РН в продукции животноводства зависит от интенсивности процессов метаболизма: *всасывания; передвижения по органам и тканям; депонирования; выведения*. Процесс всасывания зависит как от физико-химических свойств РН, так и от возраста животных. У молодых всасывание выше, чем у взрослых. Определяющим фактором для прогноза накопления радионуклидов в продукции животноводства является степень загрязнения кормов.

Большое значение имеют биологическая доступность и способность радионуклидов мигрировать по пищевым цепочкам, характеризующаяся коэффициентами их перехода в корма и продукцию животноводства. Накопление радионуклидов в организме животных и получаемой от них продукции зависит также от вида, возраста, физиологического состояния животных, их продуктивности, типа рациона. Прогноз содержания радионуклидов в продукции животноводства рассчитывается по формуле:

$$A_{прод.} = A_{рац.} \times K_{пер.}/100, \quad (66)$$

где $A_{прод.}$ – содержание радионуклидов в продукции, Бк/кг; $A_{рац.}$ - активность или содержание радионуклидов в суточном рационе; $K_{пер.}$ –

коэффициент перехода радионуклидов из рациона в 1 л (кг) продукции, в % суточного поступления; 100 – процентный коэффициент. С увеличением содержания клетчатки в рационе от 1,3 до 3,1 кг/сут. уменьшается коэффициент перехода ^{137}Cs от 0,9 до 0,6. В условиях содержания коров на малопродуктивном естественном пастбище с изреженным травостоем отмечается многократное повышение перехода радиоцезия в молоко. Переход ^{90}Sr для взрослых жвачных животных из почвы в концентратный рацион в среднем составляет 0,8, в сенный рацион – 1,5-2,5. Содержание ^{90}Sr в мышцах животных, пользующихся концентратным рационом, в среднем в 4 раза меньше, чем у животных, получающих сенный рацион (табл.7,8).

Таблица 7 - Коэффициенты перехода радионуклидов из суточного рациона в продукцию животноводства (% на 1 кг продукта)

Вид продукции	Радионуклиды	
	^{137}Cs	^{90}Sr
Молоко коровье (в среднем за год)	0,62	0,14
В том числе в период:		
Стойловый	0,48	0,14
пастбищный	0,74	0,14
Говядина	4	0,04
Свинина	25	0,10
Баранина	15	0,10
Мясо кур	450	0,20
Яйцо	3,5	3,20

Таблица 8 - Коэффициент накопления ^{137}Cs в организме животных в зависимости от их возраста и массы тела, % суточного поступления в расчёте на 1 кг живой массы

Крупный рогатый скот			Свиньи		
Возраст мес.	Масса, кг	Коэф. накопления	Возраст мес.	Масса, кг	Коэф. накопления
2-3	100	26,0	2	15	60,0
6-9	200	6,5	4	40	25,0
12-15	300	3,5	5	50	20,0
15-16	400	3,0	6	70	15,0
зрелые	500	2,5	7	90	12,0
Взрослые	600	2,0	8	110	10,0

По уровню накопления ^{90}Sr в организме мясопродуктивные животные располагаются в следующем порядке: овцы – крупный рогатый скот – свиньи – куры (в убывающей последовательности).

4.3 Расчет суммарной годовой дозы облучения человека, проживающего на территории, загрязненной радионуклидами

Исходными данными для расчета являются уровни загрязнения почвы ^{137}Cs и ^{90}Sr (плотности поверхностного загрязнения a_s , Ки/км²), которые можно получить из картографических материалов, или результатов радиоэкологического обследования (мониторинга) данной территории.

На этапе оценки полученных результатов, уровни загрязнения продуктов питания сравнивают с Санитарными правилами и нормами Сан-ПиН- 01 (табл. 9 приложения), а суммарную годовую дозу облучения человека от искусственных источников радиации сравнивают с основным дозовым пределом для населения, равным 1 мЗв/год, на основании этого делают выводы.

Оценка дозы внешнего облучения

Величина дозы внешнего облучения человека зависит от целого ряда факторов: вида и энергии излучения радионуклида, количества радионуклида в почве (его активности), распределения радионуклида в слое почвы, времени

нахождения человека на открытой территории, наличия защитных сооружений, расстояния от загрязненной поверхности и др.

Основным источником внешнего облучения человека, проживающего на загрязненных территориях, является ^{137}Cs , распад которого, наряду с β -излучением, сопровождается высоко проникающим γ -излучением.

Другой долгоживущий радионуклид ^{90}Sr не представляет опасности при внешнем облучении, так как является источником только β -излучения, имеющего низкую проникающую способность. Для расчета дозы внешнего облучения используют эмпирическую зависимость средней годовой дозы облучения человека (H) от плотности поверхностного загрязнения территории (a_s):

$$H_{\text{внеш}} [\text{мЗв/год}] \sim 0,1 \cdot a_s [\text{Ки/км}^2] \quad (67)$$

Это соотношение учитывает, что единственным источником внешнего облучения является γ -излучение ^{137}Cs ; радионуклид равномерно распределен в

верхнем слое почвы толщиной 20 см; учитывается ослабление потока излучения при прохождении этого слоя; а также усредненные условия проживания человека.

Оценка дозы внутреннего облучения

Основными источниками внутреннего облучения человека, проживающего на загрязненных территориях, являются ^{137}Cs и ^{90}Sr , поступающие в организм человека с продуктами питания, питьевой водой, вдыхаемым воздухом или через нарушения в кожных покровах.

Спустя некоторое время после аварии подавляющее количество радионуклидов оказывается локализованным в верхнем слое почвы. Поэтому поступление радионуклидов в организм человека с питьевой водой, воздухом или через кожные покровы имеет второстепенное значение, а главным источником внутреннего облучения человека становятся продукты питания, полученные из сельскохозяйственного сырья с загрязненных территорий.

Для каждого радионуклида, а также для различных путей поступления его в живой организм дозовый коэффициент, а значит, и ожидаемая доза облучения человека различны. Это объясняется тем, что для каждого радионуклида характерны свои: вид и энергия излучения, период полураспада, физические и химические свойства, место локализации в организме человека, участие в обменных процессах, эффективный период полувыведения из организма и др.

Значения дозовых коэффициентов для некоторых радионуклидов приведены в табл. 8 приложения. Следовательно, если известна общая активность данного радионуклида, поступающего в организм человека, можно рассчитать дозу внутреннего облучения:

$$N_{\text{внутр.}} [\text{мкЗв}] = A \cdot K_D, \quad (68)$$

где A - активность радионуклида, поступающего в организм человека, Бк;

K_D -дозовый коэффициент, мкЗв/Бк.

Необходимо рассчитать дозу внутреннего облучения человека от потребления продукции растениеводства и животноводства, используя упрощенный рацион питания человека, состоящий из 5 продуктов (табл.6, приложения).

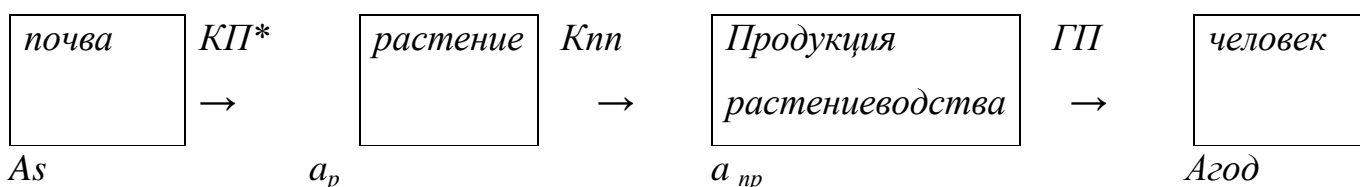
Расчет проводится для ^{137}Cs и ^{90}Sr отдельно по всем видам продукции, входящим в рацион, а затем дозы облучения суммируются.

Для расчета активности радионуклидов, поступающих в организм человека за год, используют *метод коэффициентов накопления или коэффициентов перехода*

Он основывается на рассмотрении всего пути радионуклида из почвы - через растения и животных - в организм человека по установленным трофическим и технологическим цепям. Перенос радионуклида от одного звена цепи к другому характеризуется определенными значениями коэффициентов накопления или коэффициентов перехода.

Рассмотрим отдельно пути поступления радионуклидов в организм человека с продукцией растениеводства (рис.29) и животноводства (рис.30).

Поступление радионуклидов в организм человека с продукцией растениеводства:



В данной схеме используются следующие обозначения:

A_s - плотность поверхностного загрязнения почвы ($\text{Ки}/\text{км}^2$) - активность радионуклида, равномерно распределенного в слое почвы 20 см на площади в 1 км^2 ;

a_p - ожидаемое содержание радионуклида в хозяйственной части урожая при заданной плотности поверхностного загрязнения A_s (удельная активность, $\text{Бк}/\text{кг}$);

$a_{пр}$ - содержание радионуклида в продукции растениеводства (удельная активность $\text{Бк}/\text{кг}$);

$A_{год}$ - суммарная активность радионуклида, поступающего в организм человека за год, $\text{Бк}/\text{год}$;

Для расчета данных величин используются следующие коэффициенты:

$K_{П*}$ - коэффициент перехода, характеризующий поступление радионуклида из почвы в растения.

Количественно, $KП^*$ - это содержание радионуклида в хозяйственной части урожая (в Бк/кг) при плотности поверхностного загрязнения, равной единице ($A_s = 1$ Ки/км²). Значения $KП^*$ зависят от типа почвы и различны для разных растений и их частей. Эти величина приведены в табл. 2 и 3 приложения.

$$KП^* = a_p / A_s \quad (69)$$

Зная это соотношение можно рассчитать ожидаемое содержание радионуклида в хозяйственной части урожая при заданной плотности поверхностного загрязнения

$$a_p = A_s * KП^* \quad (70)$$

$K_{пп}$ - коэффициент потерь радионуклида в процессе переработки растительной продукции, характеризующий переход радионуклида из товарной части растения в готовую продукцию;

$$K_{пп} = a_{пр} / a_p \quad (71)$$

Значения $K_{пп}$ приведены в таблице 4 приложения. Зная эти величины можно рассчитать активность радионуклида в 1 кг готовой продукции.

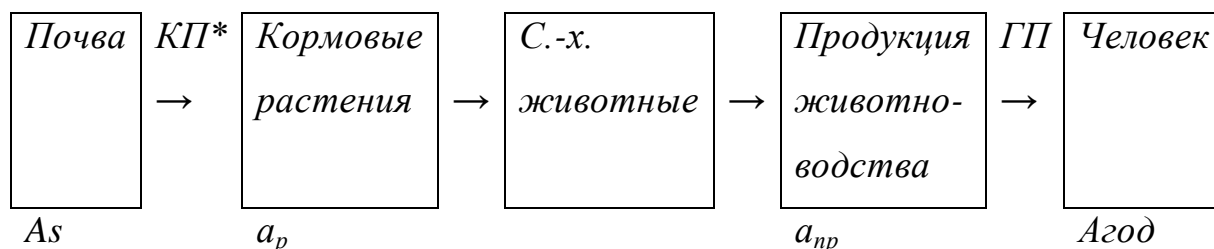
Чтобы рассчитать активность радионуклида, поступающего в организм человека за год ($A_{год}$), необходимо знать загрязнение 1 кг продукта (a_p) и его годовое потребление ($ГП$), согласно рациону питания человека:

$$A_{год} = a_{пр} * ГП \quad (72)$$

Итак, доза внутреннего облучения от поступления каждого радионуклида с данным продуктом растениеводства будет равна:

$$H_{внутр.} = A_{год} * K_D \quad (73)$$

Поступление радионуклидов в организм человека с продукцией животноводства



$$CP \rightarrow \sum A_{сум}$$

В данной схеме используются следующие обозначения:

A_s - плотность поверхностного загрязнения почвы (Ки/км²) - активность радионуклида, равномерно распределенного в слое почвы 20 см на площади в 1 км²;

a_p - ожидаемое содержание радионуклида в 1 кг кормовых растений при заданной плотности поверхностного загрязнения A_s (удельная активность, Бк/кг);

a_{np} - содержание радионуклида в продукции растениеводства (удельная активность Бк/кг);

$A_{год}$ - суммарная активность радионуклида, поступающего в организм человека за год, Бк/год;

$A_{сут}$ - ожидаемое содержание радионуклида в отдельных кормах, потребляемых сельскохозяйственными животными за сутки, Бк/сутки;

$\sum A_{сут}$ - ожидаемое содержание радионуклида во всём рационе кормов, потребляемых сельскохозяйственными животными за сутки, Бк/сутки;

CP - суточный рацион – суточное потребление данного корма, кг/сутки.

Для расчёта данных величин используются следующие коэффициенты:

$KП*$ - коэффициент перехода радионуклида в кормовые растения. Используя этот показатель можно рассчитать ожидаемое содержание радионуклида в кормовых растениях при заданной плотности поверхностного загрязнения:

$$a_p = A_s * KП* \quad (74)$$

$KП_{рац}$ - коэффициент перехода радионуклида из суточного рациона кормов в 1 кг(л) животноводческой продукции. Этот коэффициент характеризует переход радионуклида из кормов прямо в животноводческую продукцию; при этом в коэффициенте уже учитывается такое важное звено технологической цепи, как сельскохозяйственные животные.

Значения коэффициентов перехода $KП_{рац}$ приведены в табл.5 приложения.

$$KП_{рац} = a_{np} / \sum A_{сут} \quad (75)$$

Для расчета содержания радионуклидов в животноводческой продукции необходимо сначала суммировать содержание радионуклидов во всех компонентах суточного рациона кормов (п):

$$\sum A_{\text{сум}} = (a_p * CP)_1 + (a_p * CP)_2 + (a_p * CP)_3 + \dots + (a_p * CP)_n, (76)$$

а затем учесть $KП_{\text{рац}}$ для данного вида животноводческой продукции:

$$a_{\text{пр}} = \sum A_{\text{сум}} * KП_{\text{рац}} \quad (77)$$

Дальнейшие расчеты суммарной активности радионуклида, поступающего в организм человека за год ($A_{\text{год}}$), и дозы внутреннего облучения от потребления продукции животноводства ($H_{\text{внутр}}$) проводится аналогично расчетам для продукции растениеводства.

На последнем этапе суммируются дозы внешнего и внутреннего облучения человека от разных радионуклидов и продуктов питания, и эта величина - суммарная годовая доза облучения человека - сравнивается с основным дозовым пределом для населения (1 мЗв/год).

На основании полученных данных дается оценка возможности ведения сельскохозяйственного производства на данной территории, а также разрабатывается система мероприятий, направленных на снижение загрязнения продукции и уменьшение воздействия радиации на организм человека.

Пример. Сделать прогнозный расчёт содержания РН в продукции растениеводства и животноводства, если почва – чернозём выщелоченный, плотность поверхностного загрязнения (A_s) составляет 10 Ки/км² по ¹³⁷Cs и 1 Ки/км² по ⁹⁰Sr. Расчёт выполнить только для картофеля, молока и мяса крупного рогатого скота.

Картофель. По справочным данным находим величины КП для данной культуры, выращенной на чернозёме выщелоченном, которые равны 2 и 6 соответственно для ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr. Поскольку активность получаемой «сырой» продукции $a_p = a_s * КП$, то прогнозируемое содержание ¹³⁷Cs в картофеле составит 20 Бк/кг и ⁹⁰Sr – 6 Бк/кг. Эти величины существенно ниже действующих нормативов как Сан ПиН-01, так и ВДУ-93. Подобным же образом оценивают уровень предполагаемого загрязнения всей продукции растениеводства. Полученные данные являются основанием для продолжения производства данной продукции, поскольку уровень прогнозируемого загрязнений не выходит за рамки действующих нормативов.

Переход радионуклида в молоко и мясо происходит из различных составляющих рациона животного, имеющих разный уровень загрязнения. В стойловый период уровень загрязнения ниже за счёт снижения в рационе удельного веса сена и трав с естественных угодий. Расчёт загрязнения для стойлового содержания скота приведён в табл.9.

РН	СР	СР, кг	КП	ар	А сут	ΣА. сут	КП рац		Апр, Бк/кг	
							молоко	мясо	молоко	мясо
¹³⁷ Cs	Сено трав многолетних	4	40	400	1600	1840	0,01	0,04	18,4	73,6
	Силос кукурузный	20	1	10	200					
	Концентраты*	2	2	20	40					
⁹⁰ Sr	Сено трав многолетних	4	100	100	400	1640	0,003	0,006	4,92	9,84
	Силос кукурузный	20	60	60	1200					
	Концентраты	2	20	20	40					

Основу концентратов составляет зерно ячменя;

$$A_p = A_s * КП, \text{ Бк/кг}; \quad A_{сут} = a_p * СР, \text{ Бк}; \quad A_{пр} = \Sigma A_{.сут} * КП_{рац}, \text{ Бк/кг} \quad (78)$$

Прогнозируемый расчёт доз внутреннего облучения, получаемых за счёт потребления картофеля, молока и мяса приведён в табл. 10.

РН	Продукт питания	Апр, Бк/кг	ГП, кг	Агод, Бк	Д внутр., мкЗв/год	ΣД внутр., мкЗв/год
¹³⁷ Cs	Картофель	16,0	120	1920	25	365
	Молоко	18,4	300	5520	72	
	Мясо	73,6	60	4416	57	
⁹⁰ Sr	Картофель	4,8	120	576	46	
	Молоко	4,9	300	1470	118	
	Мясо	9,8	60	588	47	

Полученные расчётные значения содержания РН в мясе и молоке также не превышают уровней, регламентируемых действующими нормативами.

Задачи для самостоятельного решения

157. Составить диаграммы динамики изменения содержания радиоцезия черномыльского следа в травостое естественного луга и молоке коров (табл.11)

Год	А дернины 0-3 см, Ки/км ²	А почвы 3-8 см, Ки/км ²	Сено, Бк/кг Молоко, Бк/л	Дата отбора проб			
				10-20 апреля	5-10 мая	25-30 мая	10-20 июня
1992	8,5	6,6	сено молоко	1900 490	550 230	270 145	150 105
1997	7,7	5,8	сено молоко	1200 300	270 145	150 80	90 55
2002	6,8	5,2	сено молоко	700 175	195 110	110 48	60 35
Масса сена (17% влажности), ц/га				1-2	5-10	10-20	25-35

158. Во фляге 40 л молока загрязнено натрием – 24 в количестве 19800 Бк. Определить сколько натрия-24 в молоке было 3 часа тому назад, сколько его будет через 6 часов и можно ли его использовать в пищу людям (ПДУ загрязнения молока радиоизотопами 375 Бк/л).

159. Туша говяжьего мяса 233 кг загрязнена цезием-134 в количестве 26 мкКи. Определить сколько радиоцезия останется в мясе через 60 дней, 8 месяцев и 1 год. Через какое время это мясо можно будет использовать без ограничения в пищу людям (ПДУ загрязнения мяса $8 \cdot 10^{-8}$ Ки/кг).

160. Загрязнение кальцием-45 сгущённого молока составляет 0,5 мкКи/кг. Определите, каково будет загрязнение молока этим радиоизотопом через 66 дней, 11 месяцев и 1 год 10 месяцев. Когда это молоко можно будет использовать в пищу людям (ПДУ загрязнения сгущённого молока $3 \cdot 10^{-8}$ Ки/кг).

161. Мясо баранины загрязнено калием – 42 в количестве 10 мкКи/кг. Определить, какова степень загрязнения мяса будет через 1, 2, 3 и 4 суток.

162. Построить графики зависимости изменений коэффициентов накопления ^{137}Cs и ^{90}Sr соломой пшеницы после аварии на ЧАЭС в пределах 30-километровой зоны (Круглов, Архипов, 1996) по следующим данным (табл.12). Сделать соответствующие выводы

Месяцы	20	40	60	80	100	120
K_n ^{90}Sr	0,85	0,75	0,60	0,30	0,15	0,10
K_n ^{137}Cs	0	1,90	2,20	2,40	2,50	2,70

4.3 Изотопы в агроэкологии

Массу определяемого вещества можно найти по формуле:

$$m = m^* \left[\frac{a_0}{a} - 1 \right] = \frac{A_0}{a} - m^* \quad (79)$$

где m – количество вещества, подлежащего определению; m^* – количество вещества, введённого с меткой (с общей активностью A_0 и удельной активностью $a_0 = A_0/m^*$). При использовании метода Линкольна ограниченное число отобранных из популяции клещей метят в лабораторных условиях, а затем выпускают обратно в

биотоп. По истечении некоторого времени, необходимого для естественного равномерного распределения меченых (N^*) особей среди немеченых (N), производят повторный отлов некоторого количества особей и проверяют их на наличие метки. Если нет мешающих обстоятельств (потери за счёт естественной смертности, миграция за пределы биотопа и т.д.) то по соотношению между мечеными (n^*) и немечеными (n) особями в пробном вылове можно рассчитать общую (абсолютную) численность популяции:

$$\frac{N}{N^*} = \frac{n}{n^*} \rightarrow N = N^* \frac{n}{n^*} \quad (80)$$

Пример 1. Найти массу ^{137}Cs и ^{90}Sr при активности 1 Ки используя зависимость:

$$m = \frac{A \times M}{\lambda \times N_A} = \frac{A \times M \times T_{1/2}}{0,693 \times N_A}, \quad (81)$$

где A – активность, λ – постоянная распада, M – массовое число изотопа или грамм-атом элемента, N_A – число Авогадро ($6,02 \times 10^{23}$).

Решение. $m(^{137}\text{Cs}) = (3,7 \times 10^{10} \times 137 \times 30,076) / (0,693 \times 6,02 \times 10^{23}) = 0,36$ нг;
 $m(^{90}\text{Sr}) = (3,7 \times 10^{10} \times 90 \times 28,88) / (0,693 \times 6,02 \times 10^{23}) = 0,23$ нг.

Пример 2. В раствор аминокислот ввели 0,1 г глицина, меченного радиоактивным углеродом ^{14}C с удельной активностью 19000 имп. / (мин \times г). Из этого раствора выделили часть глицина с активностью 800 имп. / (мин \times г). Вычислите массу глицина (г) в исследуемом растворе.

Решение: Если удельная активность взятого препарата $S_1 = A_1/m$ и удельная активность выделенного осадка S_2 , то очевидно:

$$S_1 \times m = S_2 \times (m + x), \quad (82)$$

где m – масса носителя; x – масса глицина в исследуемом растворе.

Следовательно, масса определяемого компонента равна

$$X = m \times \left(\frac{S_1}{S_2} - 1 \right), \quad (83)$$

Подставляя численные значения в уравнение

$$X = 0,1 \times \left(\frac{19000}{800} - 1 \right) = 2,275 \text{ г.}$$

Задачи для самостоятельного решения

163. При археологических раскопках был найден деревянный сосуд, в котором концентрация радиоактивного изотопа $^{14}_6\text{C}$ составляет 80% средней концентрации, содержащейся в растениях. Сколько лет назад было срублено дерево?

164. Для увеличения сроков хранения картофеля его необходимо облучить дозой 2000 бэр. Какова физическая доза облучения в радах, если облучение производится а) α -лучами? б) β -лучами? в) γ -лучами? г) быстрыми нейтронами? д) тепловыми медленными нейтронами?

165 В биологических экспериментах посадка пшеницы облучалась ежедневно в течение часа γ -лучами с мощностью дозы 1 рад/час. Какую дозу получат растения за 5 месяцев?

166. В агробиологических исследованиях методом меченых атомов часто используют изотоп фосфора $^{32}_{15}\text{P}$ с периодом полураспада $T=14,3$ дня. Какая часть первоначального числа радиоактивных атомов останется через два месяца?

167. В питательную среду размножения клеток вводили радиоактивный фосфор $^{32}_{15}\text{P}$. В результате распада он превращается в атом серы $^{32}_{16}\text{S}$. Составьте уравнения соответствующих реакций.

168. В кровь человека ввели небольшое количество раствора содержащего радиоизотоп ^{24}Na активностью $2 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$. Активность 1 см³ крови, взятой через 5 ч после этого оказалась равной $16 \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-3}$. Найти объём крови человека.

169. К биопробе добавили 10^{-5} мКи радиоактивного вещества (N^*). Через месяц отлов клещей и проверка наличия метки показала распределение меченых (N^*) особей среди немеченых (N) как 1 к 3. Спустя 0,5 года соотношение n^* к n составило 5 к 8. Определить численность популяции

170. Вычислить массовую долю (%) калия в исследуемом образце, если активность чистого KCl 1800 имп/мин, а активности исследуемых образцов (A_x) следующие (табл.13):

Образец	1	2	3	4
A_x , имп / мин	220	398	616	798

171. К 1 л исследуемого раствора прибавили m г радиоактивного свинца с удельной активностью 432 имп / (мин × мг). Затем из раствора выделили $PbSO_4$, имеющий удельную активность S_x . Определить концентрацию свинца в растворе (мг/л) по следующим данным (табл.14):

Вариант	1	2	3	4
m , мг	10	20	30	40
S_x имп / (мин × мг)	12	23	34	54

Контрольная работа 4

1. Получите от преподавателя задание, в котором даны:

- плотности поверхностного загрязнения территории ^{137}Cs и ^{90}Sr ;
- характеристика основных почв СПК им. Кирова Брянской области;
- годовой рацион питания человека (табл.6 (а), приложения);
- суточный рацион кормления животных (табл.6 (б), приложения).

Вариант	Почвы	Плотности поверхностного загрязнения, Ки/км ²	
		^{137}Cs	^{90}Sr
1	серые лесные, средне- суглинистые почвы	1,4	0,87
2	чернозёмы выщелоченные	2,3	0,5
3	дерново-подзолистые, песчаные почвы	2,0	0,7
4	дерново-подзолистые, супесчаные	3,0	0,9
5	дерново-подзолистые, легко-суглинистые	4	0,3
6	дерново-подзолистые средне-суглинистые	5	2
7	дерново-подзолистые тяжело-суглинистые	6	2,5
8	чернозёмы типичные	7	1,5
9	чернозёмы выщелоченные	8	3
10	чернозёмы типичные	9	3
11	серые лесные средне-суглинистые	10	4,5
12	дерново-подзолистые песчаные	11	5
13	дерново-подзолистые супесчаные	12	1,5
14	дерново-подзолистые легко-суглинистые	13	1,4
15	дерново-подзолистые средне-суглинистые	14	2,5
16	дерново-подзолистые тяжело-суглинистые	12,3	2,5
17	чернозёмы выщелоченные	14,3	0,5
18	чернозёмы типичные	15	3
19	дерново-подзолистые песчаные	1,3	0,5
20	дерново-подзолистые супесчаные	3,3	1,5

2. Пользуясь приведенным выше соотношением (67), рассчитайте дозу внешнего облучения человека.

3. Используя формулы (68), (69), (70), (71), рассчитайте возможные уровни загрязнения растениеводческой продукции (a_p) и годовые дозы внутреннего облучения человека от потребления этих продуктов ($H_{внутр}$) (табл.14).

Радионуклид	Продукт питания	$KП^*$	A_p , Бк/кг	$K_{пп}$	$a_{пр}$, Бк/кг	$ГП$, кг/год	$A_{год}$, Бк/год	$H_{внутр}$, мкЗв/год
^{137}Cs							
^{90}Sr							

4. Рассчитайте возможные уровни загрязнения животноводческой продукции и годовые дозы внутреннего облучения человека от потребления этих продуктов. Для этого: а) оцените возможное поступление ^{137}Cs и ^{90}Sr в организм животных с суточным рационом кормов (соотношения (75), (76); б) рассчитайте поступление ^{137}Cs и ^{90}Sr в организм человека и дозы внутреннего облучения от потребления животноводческой продукции (соотношения (77)). Результаты запишите в таблицу 15 (окончательные результаты $H_{внутр}$ округляйте до целых):

Корма Радионуклид	Кормовые культуры	$KП^*$	A_p , Бк/кг	$СР$, Кг/сут	$A_{сут}$, БК/кг	$\sum A_{сут}$, Бк/сут
^{137}C					
^{90}Sr					

Радионуклид	Продукт питания	$KП_{рац}$	$A_{пр}$, Бк/кг	$ГП$, кг/год	$A_{год}$, Бк/год	$H_{внутр}$, мкЗв/год
^{137}Cs					
^{90}Sr					

5. Составьте итоговую таблицу 16 по расчету суммарной дозы облучения человека, проживающего на территории, загрязненной радионуклидами, и оцените вклад отдельных составляющих в суммарную дозу облучения (по показателю «% от суммарной дозы»):

Источники облучения	Доза, мкЗв/год		% от суммарной дозы	
	^{137}Cs	^{90}Sr	^{137}Cs	^{90}Sr
Внешнее облучение				
Внутреннее облучение				
в т.ч. продукты питания				
1				
...				
10...				
Суммарная годовая доза			100	

6. Сделайте выводы:

а) о возможных уровнях загрязнения сельскохозяйственной продукции (a_{np}) и кормов (a_p), сопоставив их с ВДУ, СанПиН и контрольными уровнями (КУ) содержания радионуклидов в кормах (см. табл. 9, 10, 11 приложения).

б) Оцените возможности и ограничения в реализации через торговую сеть местной сельскохозяйственной продукции;

в) о величине и структуре дозовой нагрузки на население, сопоставив с основным дозовым пределом (табл. 7 приложения).

7. Разработайте конкретные предложения по проведению мероприятий, направленных на снижение дозовых нагрузок на население и загрязненности сельскохозяйственной продукции (рекомендации по изменению направления производства и структуры сельхозугодий; по проведению культурнотехнических мероприятий и изменению технологий производства; по использованию и переработке сельскохозяйственной продукции). В работе используйте материалы таблиц 13 и 14 приложения.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Основные законы и формулы

Закон радиоактивного распада	$N = N_0 \exp(-\lambda t).$
Активность радиоактивного вещества	$A = -\frac{dN}{dt}$
Закон поглощения гамма-излучения веществом	$N = N_0 \exp(-\mu x).$
Дефект массы ядра	$\Delta m = Zm_p + (A-Z)m_n - m_\alpha$
Энергия связи ядра	$E_{св.} = c^2 \Delta m$
Энергия ядерной реакции	$Q = c^2 [m_1 + m_2 - \Sigma m'_i].$
Период полураспада	$T_{1/2} = 0,693/\lambda$
Средняя продолжительность жизни радиоактивного элемента	$T' = 1/\lambda$

Соотношение между различными единицами, встречающимися в дозиметрии ионизирующих излучений

- 1 эрг = $6,24 \cdot 10^5$ МэВ = $6,24 \cdot 10^{11}$ эВ
 1 кал = $4,185 \cdot 10^7$ эрг
 1 эВ = $1,602 \cdot 10^{-12}$ эрг
 1 МэВ = $1,602 \cdot 10^{-6}$ эрг
 1 эВ/г = $1,602 \cdot 10^{-14}$ рад
 1 рад = 100 эрг/г = $1 \cdot 10^{-5}$ Дж/г = $2,4 \cdot 10^{-6}$ кал/г = $6,24 \cdot 10^7$ МэВ/г = $6,24 \cdot 10^{13}$ эВ/г
 1 Р = 0,877 рад в воздухе = 0,98 рад в мягкой ткани = 0,96 рад в воде (для энергий фотонов около 1 МэВ = $2,08 \cdot 10^9$ пар ионов на 1 см³ воздуха = $1,61 \cdot 10^{12}$ пар ионов на 1 г сухого воздуха)
 1 Вт ч = $3,6 \cdot 10^3$ Дж = $3,6 \cdot 10^{10}$ эрг = $2,25 \cdot 10^{22}$ эВ
 1 А = $3 \cdot 10^9$ СГЭС/с = $6,25 \cdot 10^{18}$ электрон/с

Таблица П. 1 Некоторые физические постоянные

Частица	Масса		E, МэВ
	а.е.м.	г	
Электрон	$5,486 \cdot 10^{-4}$	$0,9108 \cdot 10^{-27}$	0,511
Протон	1,007276	$1,6724 \cdot 10^{-24}$	938,23
Нейтрон	1,008665	$1,6748 \cdot 10^{-24}$	939,53
Дейтрон	2,013553	$3,3325 \cdot 10^{-24}$	1875,5
α -Частица	4,001506	$6,6444 \cdot 10^{-24}$	3726,2

Гамма-постоянные (Гδ) радионуклидов

№ п/п	Радионуклид	Гδ	№ п/п	Радионуклид	Гδ
1	⁷ Be (бериллий)	0,3	17	⁹² Sr (стронций)	
2	²² Na (натрий)	11,9	18	¹⁰⁵ Ag (серебро)	
3	²⁴ Mg (магний)	7,7	19	¹²⁴ Sb (сурьма)	
4	⁴⁷ Ca (кальций)	5,5	20	¹²⁵ Sn (олово)	
5	⁵¹ Cr (хром)	0,5	21	¹³¹ I (йод)	
6	⁵⁴ Mn (марганец)	4,7	22	¹³² I (йод)	
7	⁵⁹ Fe (железо)	6,2	23	¹³⁴ Cs (цезий)	
8	⁵⁸ Co (кобальт)	5,5	24	¹³⁷ Cs (цезий)	
9	⁶⁰ Co (кобальт)	12,9	25	¹³⁵ Ba (барий)	
10	⁵⁶ Ni (никель)	9,4	26	¹⁴⁰ Ba (барий)	
11	⁶⁷ Cu (медь)	0,5	27	¹⁴⁰ La (лантан)	
12	⁶² Zn (цинк)	1,8	28	¹⁴¹ Ce (церий)	
13	⁶⁵ Zn (цинк)	3,0	29	¹³² Te (теллур)	
14	⁷⁴ As (мышьяк)	4,4	30	¹⁸⁷ W (вольфрам)	
15	⁸² Br (бром)	14,5	31	²⁰³ Hg (ртуть)	
16	⁸⁴ Rb (рубидий)	4,5	32	²⁴⁹ Cf (калифорний)	

Таблица П. 2 Массовый (μ)_м и линейный μ коэффициенты ослабления и длина свободного пробега l для различных материалов в зависимости от энергии фотонного излучения

E γ , МэВ	(μ) _м , см ² /Г	μ , см ⁻¹	l , см	(μ) _м , см ² /Г	μ , см ⁻¹	l , см
	Вода, $\rho=1,0$ г/см ³			Воздух, $\rho=1,2928 \cdot 10^{-3}$ г/см ³		
0,01	4,99	4,99	0,200	4,81	6,22	0,161
0,015	1,50	1,50	0,667	1,45	1,87	0,535
0,02	0,707	0,707	1,41	0,678	0,876	1,14
0,03	0,325	0,325	3,08	0,304	0,393	2,54
0,04	0,238	0,238	4,20	0,219	0,283	3,53
0,05	0,207	0,207	4,83	0,188	0,243	4,12
0,06	0,192	0,192	5,21	0,173	0,224	4,46
0,08	0,175	0,175	5,71	0,158	0,204	4,90
0,1	0,165	0,165	6,06	0,149	0,193	5,18
0,145	0,150	0,150	6,67	0,135	0,174	5,75
0,15	0,148	0,148	6,76	0,133	0,172	5,81
0,2	0,136	0,136	7,35	0,122	0,158	6,33
0,279	0,121	0,121	8,26	0,109	0,141	7,09
0,3	0,118	0,118	8,47	0,106	0,137	7,30
0,4	0,106	0,106	9,43	0,0952	0,123	8,13
0,412	0,105	0,105	9,52	0,0940	0,122	8,20

0,5	0,0966	0,0966	10,4	0,0869	0,112	8,93
0,6	0,0894	0,0894	11,2	0,0804	0,104	9,62
0,662	0,0857	0,0857	11,7	0,0770	0,0995	10,0
0,8	0,0786	0,0786	12,7	0,0707	0,0914	10,9
1,0	0,0706	0,0706	14,2	0,0635	0,0821	12,2
1,25	0,0631	0,0631	15,8	0,0568	0,0734	13,6
1,5	0,0575	0,0575	17,4	0,0517	0,0668	15,0
2,0	0,0494	0,0494	20,2	0,0444	0,0574	17,4
2,75	0,0410	0,0410	24,4	0,0365	0,0472	21,2
3,0	0,0397	0,0397	25,2	0,0358	0,0463	21,6
4,0	0,0340	0,0340	29,4	0,0308	0,0398	25,1
5,0	0,0303	0,0303	33,0	0,0275	0,0356	28,1
6,0	0,0277	0,0277	36,1	0,0252	0,0326	30,7
8,0	0,0243	0,0243	41,2	0,0223	0,0288	34,7
10,0	0,0222	0,0222	45,0	0,0204	0,0264	37,9
МэВ	Алюминий, $\rho=2,70 \text{ г/см}^3$			Бетон, $\rho=2,8 \text{ г/см}^3$		
0,01	25,9	69,9	00143	26,2	60,3	0,0166
0,015	7,48	20,2	0,0495	7,98	18,4	0,0543
0,02	3,19	8,61	0,116	3,42	7,87	0,127
0,03	1,00	2,70	0,370	1,08	2,48	0,403
0,04	0,493	1,33	0,752	0,531	1,22	0,820
0,05	0,319	0,861	1,16	0,341	0,784	1,28
0,06	0,243	0,656	1,52	0,259	0,596	1,68
0,08	0,181	0,489	2,04	0,192	0,442	2,26
0,1	0,157	0,424	2,36	0,166	0,382	2,62
0,145	0,134	0,362	2,76	0,139	0,320	3,12
0,15	0,132	0,356	2,81	0,138	0,317	3,15
0,2	0,119	0,321	3,12	0,124	0,285	3,51
0,279	0,106	0,286	3,50	0,110	0,253	3,95
0,3	0,103	0,278	3,60	0,107	0,246	4,06
0,4	0,0917	0,248	4,03	0,0954	0,219	4,57
0,412	0,0907	0,245	4,08	0,0940	0,216	4,63
0,5	0,0839	0,226	4,42	0,0871	0,200	5,00
0,6	0,0774	0,209	4,78	0,0806	0,185	5,40
0,662	0,0743	0,201	4,98	0,0771	0,177	5,65
0,8	0,0681	0,184	5,43	0,0707	0,163	6,13
1,0	0,0612	0,165	6,06	0,0636	0,146	6,85
1,25	0,0550	0,148	6,76	0,0568	0,131	7,63
1,5	0,0500	0,135	7,41	0,0518	0,119	8,40
2,0	0,0431	0,116	8,62	0,0447	0,103	9,71
2,75	0,0368	0,0994	10,1	0,0380	0,0874	11,4
3,0	0,0355	0,0958	10,4	0,0364	0,0837	11,9
4,0	0,0310	0,0837	11,9	0,0319	0,0734	13,6
5,0	0,0283	0,0764	13,1	0,0289	0,0665	15,0
6,0	0,0266	0,0718	13,0	0,0269	0,0619	16,2
8,0	0,0243	0,0656	15,2	0,0244	0,0561	17,8

10,0	0,0232	0,0626	16,0	0,0230	0,0529	18,9
МэВ	Железо $\rho=7,86 \text{ г/см}^3$			Свинец, $\rho=11,34 \text{ г/см}^3$		
0,01	169	1330	0,0008	123	1390	0,0007
0,015	56,0	440	0,0023	107	1210	0,0008
0,02	25,0	196	0,0051	82,8	939	0,0011
0,03	7,80	61,3	0,0163	28,5	323	0,0031
0,04	3,41	26,8	0,0373	13,3	151	0,0066
0,05	1,81	14,2	0,0704	7,24	82,1	0,0122
0,06	1,11	8,72	0,115	4,48	50,8	0,0197
0,08	0,537	4,22	0,237	2,08	23,6	0,0424
0,1	0,331	2,60	0,385	5,32	60,3	0,0166
0,145	0,192	1,51	0,662	2,17	24,6	0,0406
0,15	0,177	1,39	0,719	1,92	21,8	0,0459
0,2	0,135	1,06	0,943	0,942	10,7	0,0934
0,279	0,110	0,865	1,16	0,410	4,65	0,215
0,3	0,106	0,833	1,20	0,375	4,25	0,235
0,4	0,0912	0,717	1,39	0,215	2,44	0,4130
0,412	0,0900	0,707	1,41	0,205	2,32	0,431
0,5	0,0822	0,646	1,55	0,150	1,70	0,588
0,6	0,0757	0,595	1,68	0,117	1,33	0,752
0,662	0,0725	0,570	1,75	0,104	1,18	0,847
0,8	0,0662	0,520	1,92	0,0840	0,952	1,05
1,0	0,0594	0,467	2,14	0,0680	0,771	1,30
1,25	0,0537	0,422	2,37	0,0580	0,658	1,52
1,5	0,0485	0,381	2,62	0,0509	0,577	1,73
2,0	0,0424	0,333	3,00	0,0448	0,508	1,97
2,75	0,0370	0,291	3,44	0,0420	0,476	2,10
3,0	0,0361	0,284	3,52	0,0413	0,468	2,14
4,0	0,0331	0,260	3,85	0,0416	0,472	2,12
5,0	0,0315	0,248	4,03	0,0424	0,481	2,08
6,0	0,0305	0,240	4,17	0,0436	0,494	2,02
8,0	0,0298	0,234	4,27	0,0459	0,520	1,92
10,0	0,0298	0,234	4,27	0,0485	0,550	1,82

Таблица П. 3 Пробег α - частиц в воздухе, алюминии и биологической ткани в зависимости от энергии частиц

Энергия α - частиц, МэВ	Воздух, см	Алюминий мкм	Биологическая ткань, мкм
4,0	2,37	16,5	26,2
4,5	2,82	19,2	31,2
5,0	3,29	22,2	36,7
5,5	3,82	25,4	42,6
6,0	4,97	28,8	48,8
6,5	4,96	32,4	55,5

7,0	5,58	36,2	62,4
7,5	6,23	40,1	69,9
8,0	7,19	43,4	78,0
9,0	8,66	52,2	94,4
10,0	10,2	61,6	112

Таблица П 4 Период полураспада и характер излучения некоторых радиоактивных элементов

Радио- нуклид	Период полураспада	Тип распада	Энергия излучения, МэВ	
			α - и β -частиц	γ -лучей
3H	12,3 года	β	0,0185	-
^{14}C	5760 лет	β	0,156	-
^{32}P	14,3 суток	β	1,71	-
^{40}K	$1,27 \cdot 10^9$ лет	β (88%) К-захват*(12%), γ	1,31	1,46
^{42}K	12,5 ч	β, γ		
^{90}Sr	28,1 лет	β	0,61	-
^{90}Y	64 часа	β	2,27	-
^{65}Zn	245 сут	β, γ		
^{60}Co	5,27 года	β, γ		
^{131}I	8\1 суток	β, γ	0,605 (86%) 0,25(14%)	0,637; 0,363 0,282; 0,08
^{137}Cs	30,17 лет	β, γ	0,51 (94,1%) 1,17(5,9%)	0,66
^{222}Rn	3,82 дня	α	15,486 6,000	-
^{226}Ra	1 620 лет	α, γ	4,59 (6%) 4,78 (94%)	0,19
^{238}U	$4,5 \cdot 10^9$ лет	α, γ	4,15(23%) 4,20 (77%)	0,048
^{239}Pu	24110 лет	α, β, γ	5,107(11,5%) 5,145(15,1%) 5,157(73,3%)	-

* - К-захват - один из типов радиоактивного распада - процесс, заключающийся в захвате атомным ядром одного из электронов К-оболочки своего же атома.

Таблица П.5 Значения эффективных атомных номеров для фотопоглощения ($\tau Z_{эф}$) и для образования пар ($n Z_{эф}$) [Голубев, 1986]

Вещество	Плотность ρ , г/см ³	$\tau Z_{эф}$	$n Z_{эф}$
Воздух	$1,293 \cdot 10^{-3}$	7,64	7,36
Вода	1,0	7,42	6,60
Мышцы	1,0	7,42	6,60
Подкожный жир	0,91	5,92	5,20
Кости	1,85	13,8	10,0

Таблица П. 6 Содержание ¹³⁷Cs в хозяйственно-ценной части урожая при поверхностной плотности загрязнения почвы (а,) 1 Ки/км² – коэффициенты перехода, КП* ([Бк/кг]/ [Ки/км²])

Культуры	Дерново-подзолистые почвы					Серые лесные средне-суглинистые	Черноземы выщелоченные	Черноземы типичные
	песчаные	супесчаные	легко-суглинистые	средне-суглинистые	тяжело-суглинистые			
Травы с естественных угодий (сено)	740	600	530	450	370	400	200	150
Сеяные травы (сено)	220	150	100	60	40	40	40	40
Вико-овсяная смесь	40	20	15	5	2	2	2	2
Кукуруза на силос	20	10	4	3	2	3	1	0,7
Кормовая свекла	35	15	12	4	1,5			
Овес (зерно)	7	6	5	5	4	3	2	2
Ячмень (зерно)		7	5	4	2	3	2	2
Яровая пшеница зерно	20	7		4	3	4	2	1
Озимая пшеница зерно	10	3	2,5	2	1,5	2	1	0,5

Озимая рожь (зерно)	8	2,8	2,3	1,1	1,3	1,5	1	0,5
Картофель (клубни)	10	7	6	4	3	3	2	2
Свекла столовая	20	15	12	9	7	6	4	3
Морковь	10	8	7	5	4	5	4	3
Капуста ранняя	10	6	5	3	2	3	1,5	1
Капуста поздняя	7	4	3	1,3	1	1,2	0,8	0,5
Огурцы	1,2	0,9	0,8	0,6	0,4	0,5	0,3	0,2
Помидоры	4,0	0,8	0,7	0,5	0,3	0,5	0,3	0,2
Тыквенные	1,2	0,8	0,7	0,5	0,4			
Лук луковицы	0,7	0,5	0,4	0,4	0,3			
Чеснок (луковицы)	1,0	0,8	0,7	0,5	0,4			
Зеленые овощи	3	2	2	1,5	1			

Таблица П. 7 Содержание ^{90}Sr в хозяйственно-ценной части урожая при поверхностной плотности загрязнения почвы (a_s) 1 Ки/км - коэффициенты перехода, КП* ([Бк/кг]/ [Ки/км²])

Культуры	* Дерново-подзолистые					Серые лесные средне- сугли- нистые	Черноземы	
	песча- ные	супес- чаные	легко- сугли- нистые	средне- сугли- нистые	тяжело- сугли- нистые		выще- лочен- ные	типич- ные
Травы с естественных угодий (сено)	10000	6000	4000	2500	1500	2000	500	250
Сеяные травы (сено)	2000	1500	1000	400	300	500	100	50
Вико-овсяная смесь (зеленый корм)	220	150	120	90	50	70	20	10
Кукуруза на силос	450	300	250	150	100	150	60	40
Кормовая свекла	150	100	80	70	60			
Овес (зерно)	220	150	110	70	50	60	20	15
Ячмень (зерно)	150	100	80	65	60	70	20	15
Яровая пшеница (зерно)	120	100	70	50	30	45	20	15
Озимая пшеница (зерно)	40	30	25	15	10	15	5	4

Озимая рожь (зерно)	40	30	25	15	10	15	5	4
Картофель (клубни)	100	75	65	50	30	40	6	4
Свекла столовая	220	150	ПО	80	60	70	30	12
Морковь	100	80	60	45	30	40	25	20
Капуста ранняя	60	45	35	25	15	18	10	5
Капуста поздняя	45	30	25	15	10	12	5	4
Огурцы	60	40	20	15	10	13	6	5
Помидоры	25	20	15	8	5	6	3	2
Тыквенные	50	40	25	15	12			
Зеленные овощи	600	400	300	200	150			

Таблица П. 8 Коэффициенты адияонуклидов в процессе переработки растениеводческой продукции ($K_{пп} = a_{пп}/a_p$)

Вид переработки	Кпп	
	^{137}Cs	^{90}Sr
Помол зерна на муку	0,5	0,5
Промывка и очистка овощей	0,6	0,6
Промывка и очистка картофеля	0,8	0,8

Таблица П 9 Коэффициенты перехода радионуклидов из суточного рациона кормов в 1 кг (л) животноводческой продукции

Переход	П рац	
	^{137}Cs	^{90}Sr
корма → мясо говяжье	0,04	0,0006
корма → молоко коровье	0,01	0,001

Таблица П 10 (а) Среднее годовое потребление продуктов питания, кг/год (ГП)

Продукт	Количество, кг/год
Хлеб	100
Картофель	120
Овощи	70
Молоко (и молочные продукты)	300
Мясо	60

Таблица П 10 (б) Суточный рацион кормления животных, кг/сутки (СР)

Корма	Количество, кг/сутки
Сено многолетних трав	4
Кукуруза на силос	20
Концентраты (зерно ячменя)	2

Таблица П. 11 Основные дозовые пределы (по НРБ-99)

Нормируемые величины	Дозовые пределы за любые последовательные 5 лет	
	лица из персонала	лица из населения
Эффективная доза	20 мЗв в год в среднем, но не более 50 мЗв в год	1 мЗв в год в среднем, но не более 5 мЗв в год
Эквивалентная доза за год		
в хрусталике	150 мЗв	15 мЗв
коже	500 мЗв	50 мЗв
кистях и стопах	500 мЗв	50 мЗв

Таблица П. 12 Дозовые коэффициенты (K_D) и пределы годового поступления (ПГП) радионуклидов в организм человека (по НРБ-99)

Радио- нуклид	K_D , мкЗв/Бк		ПГП, Бк/год	
	с воздухом	с водой и пищей	с воздухом	с водой и пищей
<i>Для персонала:</i>				
^{131}I	0,0076		2 600 000	
^{137}Cs	0,0048		4 200 000	
^{90}Sr	0,024		830 000	
^{239}Pu	15		1 300	
<i>Для населения:</i>				
^{131}I	0,072	0,18	14 000	5600
^{137}Cs	0,0046	0,013	220 000	77000
^{90}Sr	0,05	0,08	20 000	13000
^{239}P	50	0,42	20	2400

**Таблица П 13 Нормативные уровни содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr в продуктах питания
(СанПиН 2.3.2.1078-01)**

№	Продукт питания	Удельная активность, Бк/кг (л)	
		^{137}Cs	^{90}Sr
1	Хлеб	40	20
2	Картофель	120	40
3	Свекла	120	40
4	Морковь	120	40
5	Капуста	120	40
6	Огурцы	120	40
7	Помидоры	120	40
8	Бахчевые	120	40
9	Лук	120	40
10	Зелёные	120	40
11	Молоко	100	25
12	Мясо	160	50
13	Яйца	80	50
14	Мёд	100	80
15	Орехи	200	100
16	Масло коровье	200	60
17	Масло растительное	60	80
18	Чай	400	200
19	Сахар, конфеты, кондитерские изделия	160	100
20	Крупа, толокно, хлопья	50	30
21	Макаронные изделия	60	30
22	Рыба свежая и мороженая	130	100
23	Напитки безалкогольные	70	100

**Таблица П 14 Временные допустимые уровни (ВДУ-93) содержания
радионуклидов в пищевых продуктах**

Продукты	Значения ВДУ-93, Бк/кг(л)	
	$^{134,137}\text{Cs}$	^{90}Sr
Молоко и молочные продукты, масло сливочное, жиры различные, хлеб, крупы, мука, сахар	370	37
Молоко концентрированное, сгущенное и сухое	1200	200
Специализированные продукты детского питания	185	3,7
Прочие пищевые продукты	600	100
Чай, специи, мед, лекарственные растения	6000	1000

Таблица П 15 Контрольные уровни (КУ) содержания радионуклидов ^{134}Cs и ^{90}Sr в кормах и кормовых добавках, импортируемых и произведенных в России (№ 13-7-2/216 от 1.12.94)

Виды кормов и добавок	КУ, Бк/кг,л	
	$^{134,137}\text{Cs}$	^{90}Sr
Грубые корма: сено, солома, мякина	600	100
Сочные корма: силос, сенаж, корнеплоды и др.	600	100
Зеленый корм: травы естественные, сеянные и др.	370	50
Концентрированные корма: зерно злаков, бобовых, отруби, комбикорма	600	65
Жом, меласса, жмых, шрот, мезга, барда и др.	600	100
Мясо, рыба, субпродукты	600	100
Корма сухие животного происхождения, мясные, мясокостные, мука кормовая	600	100
Консервы кормовые животного происхождения с растительными и др. добавками	600	100
Молоко и заменители молочных кормов	370	50
Сухие молочные смеси и заменители	600	100
Белково-витаминные и минеральные добавки, премиксы, корма микробиологического синтеза	370	50

Таблица П 16 Зональное деление земель по уровню загрязнения радионуклидами

Плотность поверхностного загрязнения, Ки/км ²		Уровень загрязнения	Зона
^{137}Cs	^{90}Sr		
1-5	0,15-1	низкий	Проживание с льготным социально-экономическим статусом
5-15	1-3	средний	Проживание с правом на отселение
15-40	>3	высокий	Отселение с правом на получение компенсации и льгот
>40		Очень высокий	Зона отчуждения

Таблица П. 17 Эффективность мероприятий по снижению накопления радионуклидов в продукции растениеводства на дерново-подзолистых почвах

Мероприятия	Кратность снижения	
	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr
Поверхностное улучшение лугов: фрезерование дернины	1,5	2,5
Вспашка	2,5	3,5
Коренное улучшение лугов и пастбищ (с внесением минеральных удобрений и извести)	2-5 (до 10)	2-4
Заглубленная вспашка с оборотом пласта	10	10
Известкование кислых почв	2-3	3-7 (до 20)
Минеральные удобрения (РК - 1,5-2 ^x дозы)	2-5	2-3
Органические удобрения: на легких и малоплодородных почвах	2-3	5-8
на тяжелых почвах	1,5-2	1,5-2
Глинование легких почв	3	1,5-2
Совместное проведение всех мероприятий	4-5	4-5
Осушительная мелиорация на торфяно-болотных и глеевых почвах	3-10	3-10
Орошение с использованием минерализованных вод	1,3-2,5	3-6 (до 20)

Таблица П. 18 Снижение содержания радионуклидов в сельскохозяйственной продукции при переработке

Мероприятия	Кратность снижения накопления	
	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr
Помол зерна на муку	1,5-2,5	1,5-2,5
Производство крупы из зерна	1,5-2,5	1,5-2,5
Промывка овощей и картофеля	2-10	2-10
Срезание головок корнеплодов, удаление кроющих листьев	2-10	2-10
Производство осветленных соков	2,5-3	
Производство компотов, варений, джемов	2	2
Получение сахара из сахарной свеклы	700	500
Переработка картофеля на крахмал	50	
Переработка зерна на крахмал	50	
Переработка зерна на спирт	1000	
Переработка молока на: обезжиренное молоко	1,2	1,1
сливки		10-15
творог обезжиренный	10	8
масло	40	70
масло топленое	>100	≥ 100
Обмывание мясных туш проточной водой	1,15-1,25	
Непродолжительное вымачивание мяса в воде или солевом растворе	2-3	
Вываривание мяса (около 0,5 часа)	3-6	1,5-2
Перетапливание сала	20	20

Таблица П. 19 **Уровень концентрации ^{40}K (мкг/кг) в продуктах питания**

Продукт	Содержание ^{40}K , мкг/кг
Хлеб ржаной	2420
Макароны	1300
Крупа гречневая	1300
Рис	700
Горох	9070
Мука пшеничная, в/с	860
Молоко парное	1430
Масло сливочное	140
Творог	3720
Сыр	890
Мясо говяжье	3380
Сало свиное	1690
Рыба	2620
Фрукты сушеные	3000
Картофель	4490
Капуста	3300
Свекла	3530
Морковь	2870
Лук	1510
Шоколад	5630
Какао	11110

Таблица П. 20 **Среднее поступление некоторых основных естественных радионуклидов в организм человека с пищей**

Радионуклид	Поступление, пКи/сут		Радионуклид	Поступление, пКи/сут	
	среднее	колебания		среднее	колебания
Калий-40	1000	До 3550	Радий-226	1	0,8-285
Рубидий-87	125	100-150	Радий-228	-	1,25-162
Свинец-210	-	2,4-44	Уран-238	0,3	0,15-2,0
Ролоний-210	-	1,7-344			

Таблица П. 21 **Концентрация ^{40}K , ^{238}U , ^{232}Th в почвах различных типов и соответствующие мощности поглощённой дозы (Р) в воздухе на высоте 1м от поверхности земли**

Почва	Концентрация, пКи/г			Р, мкрад/ч
	^{40}K	^{238}U	^{232}Th	
Серозём	18	0,85	1,3	7,4
Серо-коричневая	19	0,75	1,1	6,9
Каштановая	15	0,72	1,0	6,0
Чернозём	11	0,38	0,97	5,1
Серая лесная	10	0,48	0,72	4,1

Дерново-подзолистая	8,1	0,41	0,60	3,4
Подзолистая	4,0	0,24	0,33	1,8
Торфянистая	2,4	0,17	0,17	1,1
Средняя для всего мира	10	0,70	0,70	4,6
Типичные пределы колебаний	3-20	0,3-1,4	0,2-1,3	1,4-9,0

Таблица П. 22 ПДК радиоактивных веществ в воздухе и воде, Бк/л

Радиоактивный изотоп	Воздух рабочих помещений	Вода открытых водоёмов
Уран	$5 \cdot 10^8$	$1,9 \cdot 10^8$
Фосфор-32	3,7	$3,7 \cdot 10^2$
Сера-35	37	$18,5 \cdot 10^4$
Кобальт-60	1,85	185
Стронций-90	0,185	18,5

Таблица П. 23 Временный максимально допустимый уровень некоторых химических элементов в кормах для сельскохозяйственных животных (мг/кг)

Элемент	Комбикорм для					Зерно и зерно-фураж	Грубые и сочные корма	Корне- клубне-плоды
	свиней	птицы		КРС и МРС				
		мо- тор	яйцено- ской	откорм очного	молочн ого			
^{90}Sr	3,0	3,0	1,0	3,0	1,0	1,0	3,0	3,0

ПДК ^{90}Sr (мг/кг) в почве 3-8, в растении 5-30.

Таблица П. 24 Нормы по данным ФАО/ВОЗ

Показатель	^{90}Sr
Фоновое содержание в условно чистых зонах, мг/кг корма	0,01-1,5
Субтоксичная доза, мг/кг корма	50
Токсичная доза, мг/кг массы тела	Свыше 100
Недельная безопасная доза, мг/кг	50
Смертельная доза, мг/кг	100

Таблица П. 25 Эффективность мелиоративных сельскохозяйственных мероприятий при радиоактивном загрязнении

Защитное мероприятие	Снижение концентрации ⁹⁰ Sr и ¹³⁷ Cs в продукции, число раз
Перепахка почв после поверхностного загрязнения	1,2-1,6
Известкование кислых почв	1,1-22,0
Внесение минеральных удобрений	1,5-3,5
Мелиорация лугов после поверхностного загрязнения	До 5-10
Технологическая переработка продукции	До 10-20

Таблица П. 26 Радиологическая эффективность и социально-экономические последствия изменения характера землепользования на загрязнённых территориях

Изменения	Коэффициент снижения концентрации радионуклидов	Социально-экономические последствия
Замена сортов растений в пределах одного вида	До 2-4	Очень незначительные
Переход от производства овощных культур к зерновому хозяйству	До 5	Серьёзные
Замена растениеводства на животноводство	10 -100	Очень серьёзные
Замена овощеводства на крупный рогатый скот	До 10	незначительные
Переход от производства молока на мясное скотоводство	Значительно зависит от технологических возможностей	Очень серьёзные
Переход от растениеводства к лесному хозяйству	>100	Очень серьёзные

Таблица П. 27 ПДК стронция-90 в окружающей среде (Орлов Д.С., 2002)

Изотоп	Воздух рабочей зоны, Бк/м ³	Вода открытых водоёмов, Бк/л	Почва с/х назначения, Бк/м ²
Стронций-90	0,185	18,5	25

Таблица П. 28 ВДУ-91 для стронция-90

Вода питьевая	
Молоко натуральное и молокопродукты	$1,0 \cdot 10^{-10}$
Молоко сухое	$1,0 \cdot 10^{-9}$
Молоко сгущённое	$5,0 \cdot 10^{-9}$
Картофель	$3,0 \cdot 10^{-9}$
Хлеб и хлебобулочные продукты, крупы, мука, сахар	$1,0 \cdot 10^{-9}$
Специализированные продукты детского питания	$1,0 \cdot 10^{-9}$

Таблица П. 29 Регламентируемые уровни активности в природных объектах

Объём	Регламентируемый РН или вид излучения	Предельный уровень активности	Нормативный документ
Вода питьевая	β- интегр.	1,85 Бк/л	Акт США о безопасной питьевой воде ВДУ-91(РФ) ЕРА/Агенство по охране окружающей среды США ВОЗ
	α- интегр.	0,555 Бк/л	
	⁹⁰ Sr	0,30 Бк/л	
	⁹⁰ Sr	4,0 Бк/л	
	¹³⁷ Cs	18,0 Бк/л	
	²³⁸ U	0,433 Бк/л	
	²²⁶ Ra	0,185 Бк/л	
²²⁸ Ra	0,185 Бк/л		
	β- интегр.	1,000 Бк/л	
Вода неизвестного состава	α- интегр. Интегральная активность	0,10 Бк/л 1,10 Бк/л	НРБ 96
Почва (зона отселения)	¹³⁷ Cs ⁹⁰ Sr ^{239,240} Pu	15 Ки/км ² , 7-9 Бк/г 3 Ки/км ² , 1,5-2 Бк/г 0,1 Ки/км ² , 0,05-0,06 Бк/г	Закон РФ № 3061
Стройматериалы	²²⁶ Ra ²³² Th ⁴⁰ K	0,370 Бк/г 0,260 Бк/г 4,810 Бк/г	НРБ 96
Стройматериалы (вновь строящиеся)	Аэфф	<370 Бк/кг	
Почва, грунт на площадках под строительство жилых зданий	¹³⁷ Cs ⁹⁰ Sr ^{239,240} Pu	0,2 Ки/км ² , 0,10-0,12 Бк/г 0,02 Ки/км ² , 0,012-0,014 Бк/г 0,05 Ки/км ² 0,0025-0,003 Бк/г	Критерий выбора от 14.08.90 г.
Почвы, строительные, промышленные и другие отходы	Мощность экспозиционной дозы (МЭД)	Свыше 30 мкР/ч над естественным фоном 0,433 Бк/л	Временные критерии 01-19/5-11 от 05.06.1992 г

Таблица П. 30 Экологические последствия радиоактивного загрязнения (по Ю.В. Новикову)

Основные крупномасштабные эффекты	Возможные экологические последствия
Загрязнение биосферы радиоактивными продуктами	лучевое (γ-, β- излучение) поражение экосистем, изменение электрических свойств атмосферы, изменение радиационных свойств атмосферы, изменение погоды и климата, ухудшение состояния экосистем из-за уменьшения солнечного излучения, нарушение озонового слоя

ОТВЕТЫ И РЕШЕНИЯ

1. Фосфор, ${}_{15}^{31}\text{P}$., $Z=15$ /
2. $Np=73$, Тантал, $Nn=181-73=108$.
3. 72%, 28%.
4. 16,6.
15. ${}_{92}^{238}\text{U} \rightarrow {}_{37}^{87}\text{Rb} + 2 {}_0^1n + {}_{55}^{149}\text{Cs}$; ${}_{37}^{87}\text{Rb} \rightarrow \beta + {}_{36}^{87}\text{Kr} + \gamma$; ${}_{55}^{149}\text{Cs} \rightarrow {}_{54}^{149}\text{Xe} + \beta + \gamma$
29. 14 МэВ.
30. 17,57 МэВ.
31. -13,77 МэВ.
32. 0,782 МэВ
37. $0,189 \text{ ч}^{-1}$; $0,06 \text{ ч}^{-1}$; $0,008 \text{ ч}^{-1}$.
48. 1,08 Ки.
50. 63%.
51. $8 \times 10^9 \text{ с}^{-1}$; 3,97 и 2,75 года.
52. 4224 лет.
53. 2,87 Ки..
54. $8,5 \times 10^{13}$ ядер
55. 0,05 мг.
56. 275 г Рв.
57. 945,9 Ки.
60. 204,1 сут.
61. 986 мг.
62. 14,84%.
65. 0,5 сут.
71. $4,5 \times 10^{-10}$ Ки.
72. $3,85 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$.
77. $6,5 \times 10^{-2}$; 5,06 и $4,35 \times 10^3$ см
82. 1,86 рад = 18,6 бэр.
83. 50; $2,4 \times 10^{-2}$ и $5,7 \times 10^{-3}$ см
87. 0,78 и 0,084; $6,8 \times 10^{-5}$ и 0,31.

90. 8 мкм.

91. 24,3 мкм.

93. 0,4 мм.

94. α -излучение.

95. В 1,83 раза.

96. $I = A e^{\lambda t} / \sigma N_0 (1 - e^{-\lambda \tau}) = 4,3 \times 10^7 \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$, где N_0 – число ядер в фольге.

97. $\Delta t = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{q-A}{q-\eta A} = 1,7 \text{ дня}$, где $q = I \sigma n$; n – число атомов на 1 г фольги.

119. 1,05 Р/с.

120. 7 м.

122. 8×10^{11} рад.

124. $2,7 \times 10^{-3}$ бэр.

127. $1,8 \times 10^{-3}$ К

128. ~ 36 м.

131. 8 рад, 160 бэр.

132. 0,017 Гр; 1,7 рад; $0,7 \times 10^{-6}$ Гр/с; $0,7 \times 10^{-4}$ рад/с.

137. ~ 300 м³.

138. Уменьшится в 1,3 раза.

139. 92 мкКи.

140. 546 г.

144. 1800 кг.

156. 123 Бк/кг.

163. 1803 года.

164. а) (100÷200) рад; б) 2000 рад; в) 2000 рад; г) 200 рад; д) (400÷500) рад

165. 3600 рад

166. $N_t/N_0 = 6 \cdot 10^{-2}$.

168. $V = \frac{A}{a} e^{-\lambda t}$;

170. 1) 6,41%; 2) 11,60%; 3) 17,95%; 4) 23,25%.

171. 1) 350 мг/л; 2) 356 мг/л; 3) 351 мг/л; 4) 350 мг/л.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агрэкология /В.А. Черников, Р.М. Алексахин, А.В. Голубев и др. – М.: Колос, 2000. – 536 с.
2. Биофизика: Учеб. для студ. высш. учеб. заведений /В.Ф. Антонов, А.М. Черныш, В.И. Пасечник и др. - М.: Гуманит. изд. центр. ВЛАДОС, 1999. – 288 с.
3. Бордовский Г.А. Физические основы естествознания: пособие для вузов / Г.А. Бордовский. – М.: Дрофа, 2004. – 224 с.
4. Голубев Б.П. Дозиметрия и защита от ионизирующих излучений: Учебник для вузов / Б.П. Голубев. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 464 с.
5. Иродов И.Е. Сборник задач по атомной и ядерной физике. Учебное пособие для вузов / И.Е. Иродов.- М.: Атомиздат, 1971.- 232 с.
6. Ремизов А.Н. Сборник задач по медицинской и биологической физике: Учеб. Пособие для вузов. / А.Н. Ремизов, А.Г. Максина– М.: Дрофа, 2001. – 192 с.
7. Руководство по методам контроля за радиоактивностью окружающей среды / Под ред. И.А. Соболева, Е.Н. Беляева. – М.: Медицина, 2002. – 432 с.
8. Усманов С.М. Радиация: Справочные материалы / С.М. Усманов. – М.: Гуманит. изд. центр ВЛАДОС, 2001. – 176 с.
9. Фокин А.Д. Сельскохозяйственная радиология: учебник для вузов / А.Д. Фокин, А.А. Лурье, С.П. Торшин.- М.: Дрофа, 2005. – 367 с.
10. Чанг Р. Физическая химия с приложением к биологическим системам / Р. Чанг. – М.: Мир, 1980. – 601-616.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ФИЗИЧЕСКИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАДИОЛОГИИ	5
1.1 Структура атомных ядер. Изотопы	5
1.2 Ядерные реакции	7
1.3 Типы радиоактивного распада	9
1.4 Вычисление энергетического эффекта реакции	14
1.5 Определение точного массового числа ядра элемента, образующегося в результате ядерной реакции	15
1.6 Определение константы и степени распада радиоизотопа.	23
Активность. Закон радиоактивного распада. Период полураспада и средняя продолжительность жизни радиоизотопов	23
2 ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ	26
2.1 Поглощение гамма-излучения	29
2.2 Поглощение β - излучения	32
2.3 Поглощение α - излучения	32
2.4 Взаимодействие нейтронов с веществом	33
2.5 Дозиметрия излучений	36
3. РАДИОЭКОЛОГИЯ	38
3.1 Компоненты природного радиоактивного фона	38
3.2 Антропогенные источники радионуклидного загрязнения	40
4. РАДИОНУКЛИДЫ В АГРОСФЕРЕ	54
4.1. Транспорт радионуклидов по сельскохозяйственным цепочкам с участием растений	55
4.2. Транспорт радионуклидов по сельскохозяйственным цепочкам с участием животных	56
4.3. Изотопы в агроэкологии	57
ПРИЛОЖЕНИЯ	
Основные законы и формулы	
Соотношение между различными единицами, встречающимися в дозиметрии ионизирующих излучений	

Таблица П. 1 Некоторые физические постоянные

Таблица П. 2 Массовый (μ)_m и линейный μ коэффициенты ослабления и длина свободного пробега l для различных материалов в зависимости от энергии фотонного излучения

Таблица П. 3 Пробег α - частиц в воздухе, алюминии и биологической ткани в зависимости от энергии частиц

Таблица П. 4 Период полураспада и характер излучения некоторых радиоактивных элементов

Таблица П. 5 Значения эффективных атомных номеров для фотопоглощения ($\tau Z_{эф}$) и для образования пар ($n Z_{эф}$) [Голубев, 1986]

Таблица П. 6 Содержание ^{137}Cs в хозяйственно-ценной части урожая при поверхностной плотности загрязнения почвы (a_s) 1 Ки/км² – коэффициенты перехода, КП* ([Бк/кг]/ [Ки/км²])

Таблица П. 7 Содержание ^{90}Sr в хозяйственно-ценной части урожая при поверхностной плотности загрязнения почвы (a_s) 1 Ки/км² – коэффициенты перехода, КП* ([Бк/кг]/ [Ки/км²])

Таблица П. 8 Коэффициенты потерь радионуклидов в процессе переработки растениеводческой продукции ($K_{пп} = a_{пр}/a_p$)

Таблица П. 9 Коэффициенты перехода радионуклидов из суточного рациона кормов в 1 кг (л) животноводческой продукции

Таблица П. 10 (а) Среднее годовое потребление продуктов питания, кг/год (ГП)

Таблица П. 10 (б) Суточный рацион кормления животных, кг/сутки (СР)

Таблица П. 11 Основные дозовые пределы (по НРБ-99)

Таблица П. 12 Дозовые коэффициенты (K_D) и пределы годового поступления (ПГП) радионуклидов в организм человека (по НРБ-99)

Таблица П. 13 Нормативные уровни содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr в продуктах питания (СанПиН 2.3.2.1078-01)

Таблица П. 14 Временные допустимые уровни (ВДУ-93) содержания радионуклидов в пищевых продуктах

- Таблица П 15 Контрольные уровни (*KУ*) содержания радионуклидов ¹³⁴
¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr в кормах и кормовых добавках, импортируемых и
произведенных в России (№ 13-7-2/216 от 1.12.94)
- Таблица П 16 Зональное деление земель по уровню загрязнения
радионуклидами
- Таблица П. 17 Эффективность мероприятий по снижению накопления
радионуклидов в продукции растениеводства на дерново-подзолистых
почвах
- Таблица П. 18 Снижение содержания радионуклидов в
сельскохозяйственной продукции при переработке
- Таблица П. 19 Уровень концентрации ⁴⁰K (мкг/кг) в продуктах питания
- Таблица П. 20 Среднее поступление некоторых основных естественных
радионуклидов в организм человека с пищей
- Таблица П. 21 Концентрация ⁴⁰K, ²³⁸U, ²³²Th в почвах различных типов
и соответствующие мощности поглощённой дозы (P) в воздухе на высоте
1м от поверхности земли.
- Таблица П. 22 ПДК радиоактивных веществ в воздухе и воде, Бк/л
- Таблица П. 23 Временный максимально допустимый уровень некоторых
химических элементов в кормах для сельскохозяйственных животных
(мг/кг)
- Таблица П 24 Нормы по данным ФАО/ВОЗ
- Таблица П. 25 Эффективность мелиоративных сельскохозяйственных
мероприятий при радиоактивном загрязнении
- Таблица П. 26 Радиологическая эффективность и социально-экономические
последствия изменения характера землепользования на загрязнённых
территориях
- Таблица П. 27 ПДК стронция-90 в окружающей среде (Орлов Д.С., 2002)
- Таблица П. 28 ВДУ-91 для стронция-90
- Таблица П. 29 Регламентируемые уровни активности в природных объектах
- Таблица П. 30 Экологические последствия радиоактивного загрязнения (по
Ю.В. Новикову)

ОТВЕТЫ И РЕШЕНИЯ

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ