

Министерство образования и науки Украины

ХАРЬКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к самостоятельной работе
по дисциплине «Радиобиология»
для студентов специальности 7.070801
факультета заочного обучения

Утверждено методическим
советом университета,
протокол № 2 от 19.10.05 г.

Харьков 2006

Составитель Э. Б. Хоботова

Кафедра экологии и химии

Радиобиология – это наука о биологическом действии ионизирующих излучений. Основными ее задачами являются изыскание различных средств защиты организма от излучений и путей его пострадиационного восстановления от лучевых повреждений, прогнозирование опасности для человечества повышающегося уровня радиации окружающей среды, поиск новых путей использования ионизирующих излучений в медицине, микробиологической, пищевой промышленности и в сельском хозяйстве. Радиобиология стоит на страже здоровья.

Цель методических указаний – помочь студентам изучить материал по основным темам дисциплины: «Миграция искусственных радионуклидов по трофическим уровням», «Прогнозирование вероятного уровня радиационного загрязнения», «Количественная оценка радиочувствительности», «Относительная биологическая эффективность ионизирующих излучений», «Количественная оценка комбинированного действия радиации и других факторов», «Дозовые пределы облучения. Допустимые и контрольные уровни как основа радиационной безопасности», «Выведение радионуклидов из организма». Большое внимание уделяется решению задач по этим темам.

Тема 1. МЕТОДЫ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ МИГРАЦИИ ИСКУССТВЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ ПО ТРОФИЧЕСКИМ УРОВНЯМ

Теоретическая часть

Выработан ряд количественных характеристик, применяющихся для оценки перехода радионуклидов по трофическим уровням. Опишем основные из них.

Содержание радионуклида – это количество радионуклида во всем органе, его выражают в долях Ки на орган.

Концентрация – это количество радионуклида в весовой части органа, выражается в мкКи/кг сырой ткани.

Кратность накопления F (КН) равна отношению количества радионуклида на трофическом уровне к его количеству на предыдущем уровне

$$F = \frac{q_n}{q_{n-1}} = \frac{C_n \cdot m_n}{C_{n-1} \cdot m_{n-1}}.$$

Рассмотрим переход радионуклида из корма в организм животного. При длительном дозированном поступлении в организм с кормом радионуклид накапливается в органе в количестве, кратном суточной дозе. Его содержание в органе выражают кратностью накопления – величиной, показывающей во сколько раз содержание радионуклида в органе превышает ежесуточно вводимую дозу или какую часть последней она составляет

$$F = \frac{C_p \cdot m}{q},$$

где C_p – концентрация радионуклида в органе, мкКи/кг;

m – масса органа, кг;

q – количество радионуклида, ежедневно поступающего в организм, мкКи.

Предел допустимого содержания радионуклида (A) в рационе животных

$$A = \frac{C_{\text{ср}} \cdot m}{F} \text{ мкКи,}$$

где $C_{\text{ср}}$ – средняя допустимая концентрация радионуклида в пищевом продукте, пКи/кг;

m – масса продукта (мышечная или костная ткань), кг;

F – КН в скелете или мышцах.

Коэффициент концентрирования (накопления) (КК) применяется для оценки накопления радионуклидов в естественных условиях. КК – это отношение концентраций радионуклида на трофическом уровне к его концентрации на предыдущем уровне

$$КК = \frac{C_n}{C_{n-1}}.$$

Для животных, определяя КК, обычно соотносят концентрацию радионуклида в критическом органе животного к его концентрации в пище. Концентрация радионуклида в растениях, как правило, выше аналогичной для почвы, следовательно, $КК > 1$.

На основании КК можно судить о закономерностях миграции элементов по трофическим уровням, а по характеру накопления радиоактивных элементов наземными животными их можно подразделить на три зоогеохимические группы.

Накопители содержат изучаемый элемент в большей концентрации, чем в пищевом субстрате ($КК > 1$);

Рассеиватели содержат элемент в одинаковой с пищевым субстратом концентрации ($КК \approx 1$);

Очистители содержат элемент в меньшей концентрации, чем пищевой субстрат ($КК < 1$), и способствуют «очищению» пищевой цепи от исследуемого элемента.

Отметим то существенное обстоятельство, что при миграции радионуклидов по трофическим уровням большое влияние на концентрирование их в органах и тканях оказывают изотопные и неизотопные носители.

Изотопный носитель – это стабильный изотоп данного элемента, химические свойства которого тождественны его радиоактивному изотопу. Например, стабильный ^{31}P и радиоактивный ^{32}P .

Неизотопный носитель – это стабильный изотоп химического аналога элемента, который лишь аналогичен по групповым химическим свойствам радионуклиду. Например, Са – носитель по отношению к $^{89}, ^{90}\text{Sr}$; К – по отношению к $^{134}, ^{137}\text{Cs}$. Так как эти элементы близки по своим химическим свойствам, то они участвуют в одних и тех же обменных процессах. Поэтому ввели понятие о стронциевой и цезиевой единицах.

Стронциевая единица – это отношение содержания в образце ^{90}Sr , выраженного в пКи, к массе в этом образце Са в г. Или 1 пКи ^{90}Sr на 1 г Са равен с.е.

Цезиевая единица – это отношение активности ^{137}Cs в пКи к массе К в г. Или 1 ц.е. = 1 пКи ^{137}Cs на 1 г К.

В определенных ситуациях между этими изотопами существуют и конкурентные отношения. Например, преимущественное усвоение Са в ущерб ^{90}Sr или относительно большее выведение ^{90}Sr из организма, чем Са.

Поэтому ^{90}Sr в скелете животного откладывается в ином соотношении, чем Са. Кальций при переходе из кормов в органы животного, как бы защищает организм от ^{90}Sr , то есть происходит его ущемление, дискриминация. Понятно, что при переходе из почвы в растения дискриминация радионуклидов ощутима, при листовом усвоении – практически отсутствует.

Коэффициент дискриминации – это величина, показывающая, насколько изменится содержание ^{90}Sr или ^{137}Cs по отношению к Ca или K при переходе их на последующий трофический уровень, например, из почвы в растение

$$K_d = \left. \frac{C_{\text{Sr}}}{C_{\text{Ca}}} \right\}_n \cdot \left. \frac{C_{\text{Sr}}}{C_{\text{Ca}}} \right\}_{n-1},$$

где K_d – коэффициент дискриминации;

C – концентрация элемента.

Чем меньше K_d , тем более выражена дискриминация.

Иногда вместо K_d употребляют понятие «*наблюдаемое отношение*». Его используют для характеристики суммарного влияния дискриминационных актов, например, на отрезке миграционной цепи от почвы к животному.

$$\text{НО} = (K_d)_1(K_d)_2 \dots (K_d)_n$$

Обратная величина НО названа *защитным коэффициентом* K_3

$$K_3 = \frac{1}{\text{НО}}.$$

Он характеризует степень снижения относительного содержания радионуклида при его передвижении по миграционным путям.

Объяснить эффект дискриминации можно на примере звена «почва – растение». Sr более прочно фиксируется в почвах по сравнению с Ca. Коэффициент дискриминации меняется в зависимости от степени насыщенности почвы стабильным кальцием, вида растений, периода их развития. В зависимости от структуры и типа почвы K_d Cs колеблется от 0,01 до 0,1. Для Sr – от 0,8 до 1,0. Полагают, что дискриминация Sr отсутствует в тех случаях, когда почва не содержит избытка ионов Ca. При попадании ^{90}Sr в почву в результате возникновения реакций между ним и почвой с течением времени от 5 до 50 % ^{90}Sr становится недоступным для растений.

Явление дискриминации используется на практике. Интенсивность накопления радиоактивных веществ растениями может быть уменьшена при внесении в почву, содержащую малые количества стабильных аналогов, минеральных удобрений. Так, интенсивность накопления ^{90}Sr в растениях уменьшается при обогащении почвы кальцием в виде извести $\text{Ca}(\text{OH})_2$, известняка CaCO_3 и сахаратов кальция.

Для ^{137}Cs коэффициент дискриминации относительно калия в цепи пища – тело человека принят равным двум. При этом величина K_d не меняется в зависимости от диеты.

Приведем значения K_d для различных звеньев пищевых цепей

$$K_{д1} = \frac{^{137}\text{Cs} : \text{калий растения}}{^{137}\text{Cs} : \text{калий почвы}} = 0,01;$$

$$K_{д2} = \frac{^{137}\text{Cs} : \text{калий мяса (молока)}}{^{137}\text{Cs} : \text{калий растения}} = 2;$$

$$K_{д3} = \frac{^{137}\text{Cs} : \text{калий тела человека}}{^{137}\text{Cs} : \text{калий мяса (молока)}} = 2;$$

$$K_{д4} = \frac{^{137}\text{Cs} : \text{калий тела человека}}{^{137}\text{Cs} : \text{калий растит. пищи}} = 2.$$

Отсюда, НО для цепи почва – растение – животное – человек будет равно $НО = 0,01 \cdot 2 \cdot 2 = 0,04$, а для цепи почва – растительная пища – человек $НО = 0,01 \cdot 2 = 0,02$. При условии, что 50 % ^{137}Cs поступает с растительной пищей и 50 % – с животной, НО будет соответствовать 0,03.

Комплексный показатель (КП) дает возможность определить накопление ^{90}Sr в растениях. При определении КП содержание стронция – 90 в мКи на 1 км² делят на количество обменного кальция в мг-экв на 100 г почвы, после чего количество стронциевых единиц в растениях делят на эту величину. После преобразований уравнение принимает вид

$$КП = \frac{\text{с.е. в растениях} \cdot \text{Са мг – экв на 100 г почвы}}{\text{стронций – 90 мКи/км}^2}$$

Определение такого показателя как КП было предложено В.М. Клечковским в 1969 г. Значения комплексного показателя, экспериментально определенного в опытах, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Величина КП для некоторых видов сельскохозяйственной продукции

Вид продукции	Среднее значение КП
Сено: естественных лугов	60
клевера	15
люцерны	12
Силосные культуры и солома зерновых и зернобобовых культур	14
Зерно злаковых и зернобобовых культур	9

Отдельно остановимся на радиоактивном загрязнении растений при глобальных осадках. *Глобальные радиоактивные выпадения* характеризуются продолжительным действием, при этом происходит загрязнение растений по двум путям: корневому и через атмосферные выпадения. Поступление радионуклидов в сельскохозяйственную продукцию можно выразить соотношением

$$C = K_{\text{п}} \cdot S + K_{\text{в}} \cdot d ,$$

где C – концентрация радионуклида в растениях;
 S – кумулятивное содержание радионуклидов в почве;
 d – интенсивность выпадений радионуклида;
 $K_{\text{п}}$ и $K_{\text{в}}$ – почвенный и воздушный коэффициенты пропорциональности, определяющиеся эмпирически.

Величина $K_{\text{п}}$ различна для разных видов растений и типов почв. $K_{\text{п}}$ для ^{90}Sr зависит от содержания Са в почве. $K_{\text{п}}$ определяют по формуле Клечковского – Архипова, связывающей концентрацию радионуклидов Sr в растительной продукции с плотностью загрязнения почвы и содержанием стабильного Са в почве и растительности

$$C = \frac{K \cdot \text{Са}_{\text{р}} \cdot S}{\text{Са}_{\text{п}}},$$

где $K_{\text{п}} = \frac{C}{S}$.

C – концентрация радиоактивного Sr в растительном образце (пКи/кг);

$\text{Са}_{\text{р}}$ – концентрация Са в растительном образце (г/кг сухого вещества);

S – плотность загрязнения почвы радиостронцием (мКи/км²);

$\text{Са}_{\text{п}}$ – концентрация Са в почве (мг – экв/ 100 г почвы);

K – коэффициент загрязнения, зависящий от типа растительности.

Данная формула позволяет выразить почвенный коэффициент $K_{\text{п}}$ в виде

$$K_{\text{п}} = \frac{\text{Са}_{\text{р}}}{\text{Са}_{\text{п}}} \cdot K .$$

Для оценки величины $K_{\text{в}}$ целесообразно использовать среднемесячные плотности выпадений радиоизотопов в течение вегетационного сезона. Для разных видов растительности $K_{\text{в}}$ определяют по соотношению

$$K_{\text{в}} = \frac{10^9 \cdot R \cdot n}{m},$$

где R – доля выпадений, задерживаемых растительностью, занимающей единицу площади, от кумулятивных выпадений на эту единицу площади с начала вегетации;

n – период экспозиции (месяц);

m – запас биомассы образца на единицу площади в кг сухого вещества /км².

Примеры решения задач

1. Определите кратность накопления, коэффициент концентрирования и предел допустимого содержания при накоплении ^{90}Sr животным, общая масса скелета которого 28 кг. Стронций ежедневно поступает с растительным кормом массой 6 кг и средней концентрацией радионуклида 165 пКи/кг. Концентрация ^{90}Sr в костной ткани животного 0,0085 мкКи/кг, а средняя допустимая его концентрация – 96 пКи/кг.

Дано:

$$m_{\text{ск}}=28 \text{ кг}$$

$$m_{\text{тр}}=6 \text{ кг}$$

$$C_{\text{ск}}=8,5 \cdot 10^{-3} \text{ мкКи/кг}$$

$$C_{\text{тр}}=165 \text{ пКи/кг}$$

$$C_{\text{сп}}=96 \text{ пКи/кг}$$

Найти: F , КК , A

Решение: для расчета кратности накопления F (КН) используем отношение

$$F = \frac{C_n \cdot m_n}{C_{n-1} \cdot m_{n-1}}$$

Так как в рассматриваемом случае радионуклид ^{90}Sr переходит с трофического уровня – травы на трофический уровень – организм животного (скелет), то можно записать, что

$$F = \frac{c_{\text{ск}} \cdot m_{\text{ск}}}{c_{\text{тр}} \cdot m_{\text{тр}}} = \frac{q_{\text{ск}}}{q_{\text{тр}}},$$

$$F = \frac{8,5 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6 \cdot 28}{165 \cdot 6} = 240.$$

Числитель умножили на 10^6 для перевода единиц измерения $C_{\text{ск}}$ в пКи/кг.

Для расчета коэффициента концентрирования КК используем отношение

$$\text{КК} = \frac{C_n}{C_{n-1}} = \frac{C_{\text{ск}}}{C_{\text{тр}}}.$$

Отсюда
$$\text{КК} = \frac{8,5 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6}{165} = 51,5.$$

Так как значение $\text{КК} > 1$, то животное относится к накопителям. Расчет предела допустимого содержания проводим по формуле

$$A = \frac{c_{\text{сп}} \cdot m_{\text{ск}}}{F} = \frac{96 \cdot 28}{240} = 11,2 \text{ пКи}.$$

Ответ: $F=240$; $\text{КК}=51,5$; $A=11,2 \cdot 10^{-6}$ мкКи.

2. Определите кратность накопления и коэффициент концентрирования при поступлении радионуклида ^{131}I из почвы в растение. При проведении эксперимента в массе почвы 1,5 кг была определена концентрация ^{131}I 220 пКи/кг, а в зеленой траве массой 2 кг концентрация ^{131}I составляла 16 пКи/г.

Дано:
 $m_{\text{тр}}=2$ кг
 $m_{\text{п}}=1,5$ кг
 $C_{\text{тр}}=0,16$ пКи/г= 160 пКи/кг
 $C_{\text{п}}=220$ пКи/кг

Найти: F , KK

Решение:

Расчет кратности накопления проводим по формуле

$$F = \frac{c_n \cdot m_n}{c_{n-1} \cdot m_{n-1}} = \frac{c_{\text{тр}} \cdot m_{\text{тр}}}{c_{\text{п}} \cdot m_{\text{п}}} = \frac{160 \cdot 2}{220 \cdot 1,5} = 0,97.$$

Расчет коэффициента концентрирования проводим по формуле

$$KK = \frac{c_n}{c_{n-1}} = \frac{c_{\text{тр}}}{c_{\text{п}}} = \frac{0,16 \cdot 10^3}{220} = 0,73.$$

Значение KK меньше единицы, поэтому травяную растительность можно отнести к очистителям.

Ответ: $F = 0,97$; $KK = 0,73$.

3. Для каких звеньев пищевой цепи дискриминация выражена сильнее, если экспериментально определенные концентрации C_s (пКи/кг) и K (г/кг) следующие: $[C_s]_{\text{почва}} = 26,6$; $[C_s]_{\text{раст}} = 120$; $[C_s]_{\text{мышцы человека}} = 17$; $[K]_{\text{почва}} = 0,4$; $[K]_{\text{раст}} = 30$; $[K]_{\text{мышцы человека}} = 2,36$;

Дано:
 $[C_s]_{\text{п}}=26,6$ пКи/кг
 $[K]_{\text{п}}=0,4$ г/кг
 $[C_s]_{\text{р}}=120$ пКи/кг
 $[K]_{\text{р}}=30$ г/кг
 $[C_s]_{\text{мыш}}=17$ пКи/кг
 $[K]_{\text{мыш}}=2,36$ г/кг

Найти: соотношение $K_{\text{д1}}$ и $K_{\text{д2}}$

Решение:

Цезий передвигается по пищевой цепи почва–растение–человек, накапливаясь в конечном звене – мышечной ткани человека. Можно рассчитать два коэффициента дискриминации: $K_{\text{д1}}$ – для перехода C_s почва – растение и $K_{\text{д2}}$ – для перехода растение – мышечная ткань человека. Расчет $K_{\text{д}}$ проводим по формуле

$$K_{\text{д}} = \left(\frac{C_{C_s}}{C_K} \right)_n : \left(\frac{C_{C_s}}{C_K} \right)_{n-1}.$$

Отсюда

$$K_{д1} = \left(\frac{C_{Cs}}{C_K} \right)_{\text{раст}} : \left(\frac{C_{Cs}}{C_K} \right)_{\text{почва}} = \left(\frac{120}{30} \right) : \left(\frac{26,6}{0,4} \right) = 0,06;$$

$$K_{д2} = \left(\frac{C_{Cs}}{C_K} \right)_{\text{мышцы}} : \left(\frac{C_{Cs}}{C_K} \right)_{\text{раст}} = \left(\frac{17}{2,36} \right) : \left(\frac{120}{30} \right) = 1,8.$$

Дискриминация Cs по отношению к K выражена сильнее при переходе из почвы в растения.

4. Изменится ли величина наблюдаемого отношения и защитного коэффициента при передвижении ^{90}Sr по пищевым цепям почва- растение- человек и почва- растение- мясо, молоко- человек, если содержание ^{90}Sr и Ca в звеньях пищевой цепи следующее:

	[Sr], пКи/кг	[Ca], г/кг
почва	1,2	0,24
растение	1,8	24
мясо- молоко	1,125	1,8
человек (костная ткань)	0,378	2,8

Дано:
 [Sr]_п=1,2 пКи/кг
 [Ca]_п=0,24 г/кг
 [Sr]_р=1,8 пКи/кг
 [Ca]_р=24 г/кг
 [Sr]_{м-м}=0,125 пКи/кг
 [Ca]_{м-м}=1,8 г/кг
 [Sr]_{чел}=0,378 пКи/кг
 [Ca]_{чел}=2,8 г/кг

Решение: Обозначим коэффициенты дискриминации по звеньям пищевой цепи:

(I) почва – $K_{д1}$ растение – $K_{д2}$ человек,
 (II) почва – $K_{д1}$ растение – $K_{д3}$ мясо, молоко – $K_{д4}$ человек.

Предполагается, что животное и человек употребляют в пищу один и тот же вид растительности, выращенной на однотипной почве с одинаковым уровнем загрязнения ^{90}Sr .

Найти: отношения HO_1 и HO_2 ;
 $K_{з1}$ и $K_{з2}$

Наблюдаемые отношения будут выражаться как

$$HO_1 = K_{д1} \cdot K_{д2},$$

$$HO_2 = K_{д1} \cdot K_{д3} \cdot K_{д4}$$

Рассчитаем величины $K_{д}$

$$K_{д1} = \left(\frac{C_{Sr}}{C_{Ca}} \right)_p \cdot \left(\frac{C_{Sr}}{C_{Ca}} \right)_п = \left(\frac{1,8}{24} \right) : \left(\frac{1,2}{0,24} \right) = 0,015,$$

$$K_{д2} = \left(\frac{C_{Sr}}{C_{Ca}} \right)_{\text{чел}} \cdot \left(\frac{C_{Sr}}{C_{Ca}} \right)_p = \left(\frac{0,378}{2,8} \right) : \left(\frac{1,8}{24} \right) = 1,8,$$

$$K_{д1} = \left(\frac{C_{Sr}}{C_{Ca}} \right)_{м-м} \cdot \left(\frac{C_{Sr}}{C_{Ca}} \right)_p = \left(\frac{0,125}{1,8} \right) : \left(\frac{1,8}{24} \right) = 0,92,$$

$$K_{д1} = \left(\frac{C_{Sr}}{C_{Ca}} \right)_{чел} \cdot \left(\frac{C_{Sr}}{C_{Ca}} \right)_{м-м} = \left(\frac{0,378}{2,8} \right) : \left(\frac{0,125}{1,8} \right) = 1,96.$$

Тогда

$$НО_1 = K_{д1} \cdot K_{д2} = 0,015 \cdot 1,8 = 0,027;$$

$$K_{31} = \frac{1}{НО_1} = \frac{1}{0,027} = 37;$$

$$НО_2 = K_{д1} \cdot K_{д3} \cdot K_{д4} = 0,015 \cdot 0,92 \cdot 1,96 = 0,027;$$

$$K_{32} = \frac{1}{НО_2} = \frac{1}{0,027} = 37.$$

Величины $НО$ и K_3 не изменились, так как при расчете было сделано допущение, что тип почвы и вид растительности для питания человека и животного остаются прежними.

Ответ: $НО$ и K_3 не изменились.

5. Во сколько раз изменится величина наблюдаемого отношения и защитного коэффициента при передвижении стронция-90 по пищевым цепям: (I) почва₁ – растение₁ – человек; (II) почва₂ – растение₂ – мясо, молоко – человек, если содержание ^{90}Sr и Ca в звеньях пищевой цепи следующее:

	[Sr], пКи/кг	[Ca], г/кг
почва ₁	1,8	0,2
почва ₂	3,9	0,11
растение ₁	2,1	18
растение ₂	15,2	14,7
мясо-молоко	0,18	1,1
человек (костная ткань)	0,45	4,1

Дано:

$$[Sr]_{п1} = 1,8 \text{ пКи/кг}$$

$$[Ca]_{п1} = 0,2 \text{ г/кг}$$

$$[Sr]_{п2} = 3,9 \text{ пКи/кг}$$

$$[Ca]_{п2} = 0,11 \text{ г/кг}$$

$$[Sr]_{р1} = 2,1 \text{ пКи/кг}$$

$$[Ca]_{р1} = 18 \text{ г/кг}$$

$$[Sr]_{р2} = 15,2 \text{ пКи/кг}$$

$$[Ca]_{р2} = 14,7 \text{ г/кг}$$

$$[Sr]_{м-м} = 0,18 \text{ пКи/кг}$$

$$[Ca]_{м-м} = 1,1 \text{ г/кг}$$

$$[Sr]_{чел} = 0,45 \text{ пКи/кг}$$

$$[Ca]_{чел} = 4,1 \text{ г/кг}$$

Найти: отношение $НО_1$, $НО_2$ и K_{31} , K_{32}

Решение:

Обозначим коэффициенты дискриминации согласно звеньям пищевых цепей:

(I) почва – $K_{д1}$ растение – $K_{д2}$ человек,

(II) почва – $K_{д3}$ растение – $K_{д4}$ мясо, молоко – $K_{д5}$ человек.

Тогда наблюдаемые отношения равны

$$НО_1 = K_{д1} \cdot K_{д2},$$

$$НО_2 = K_{д3} \cdot K_{д4} \cdot K_{д5}.$$

Найдем значения коэффициентов дискриминации

$$K_{д1} = \left(\frac{C_{Sr}}{C_{Ca}} \right)_{p1} \cdot \left(\frac{C_{Sr}}{C_{Ca}} \right)_{n1} = \left(\frac{2,1}{18} \right) : \left(\frac{1,8}{0,2} \right) = 0,013$$

$$K_{д2} = \left(\frac{C_{Sr}}{C_{Ca}} \right)_{чел} \cdot \left(\frac{C_{Sr}}{C_{Ca}} \right)_{p1} = \left(\frac{0,45}{4,1} \right) : \left(\frac{2,1}{18} \right) = 0,94;$$

$$K_{д3} = \left(\frac{C_{Sr}}{C_{Ca}} \right)_{p2} \cdot \left(\frac{C_{Sr}}{C_{Ca}} \right)_{n2} = \left(\frac{15,2}{14,7} \right) : \left(\frac{3,9}{0,11} \right) = 0,03;$$

$$K_{д4} = \left(\frac{C_{Sr}}{C_{Ca}} \right)_{м-м} \cdot \left(\frac{C_{Sr}}{C_{Ca}} \right)_{p2} = \left(\frac{0,18}{1,1} \right) : \left(\frac{15,2}{14,7} \right) = 0,16;$$

$$K_{д5} = \left(\frac{C_{Sr}}{C_{Ca}} \right)_{чел} \cdot \left(\frac{C_{Sr}}{C_{Ca}} \right)_{м-м} = \left(\frac{0,45}{4,1} \right) : \left(\frac{0,18}{1,1} \right) = 0,67.$$

Тогда

$$HO_1 = K_{д1} \cdot K_{д2} = 0,013 \cdot 0,94 = 0,012;$$

$$HO_2 = K_{д3} \cdot K_{д4} \cdot K_{д5} = 0,03 \cdot 0,16 \cdot 0,67 = 0,0032.$$

$$\frac{HO_1}{HO_2} = \frac{0,012}{0,0032} = 3,75, \text{ то есть при переходе с растительной диеты на мясо-}$$

молочные продукты наблюдаемое отношение уменьшилось в 3,75 раза.

Защитный коэффициент рассчитываем по формуле

$$K_3 = \frac{1}{HO}.$$

Отсюда

$$K_{31} = \frac{1}{HO_1} = \frac{1}{0,012} = 83,3;$$

$$K_{32} = \frac{1}{HO_2} = \frac{1}{0,0032} = 312,5.$$

Так как величина K_{32} больше, чем K_{31} , то можно сделать вывод, что степень снижения относительного содержания ^{90}Sr при его передвижении по второй пищевой цепи выше, чем по первой.

Отношение $\frac{K_{31}}{K_{32}} = \frac{83,3}{312,5} = 0,27.$

Ответ: $\frac{HO_1}{HO_2} = 3,75;$ $\frac{K_{31}}{K_{32}} = 0,27.$

6. Определите общие величины наблюдаемых отношений для ^{90}Sr и ^{137}Cs , если человек потребляет в сутки 43 % мясо – молочной продукции, а остальное – растительная пища. Величины коэффициентов дискриминации для звеньев пищевой цепи равны:

	Sr	Cs
почва – растение, $K_{д1}$	0,95	0,02
растение – человек, $K_{д2}$	1,80	1,95
растение – мясо, молоко, $K_{д3}$	1,78	2,0
мясо, молоко – человек, $K_{д4}$	2,2	1,87

Дано:

$$K_{д1Sr}=0,95$$

$$K_{д2 Sr}=1,8$$

$$K_{д3 Sr}=1,78$$

$$K_{д4 Sr}=2,2$$

$$K_{д1Cs}=0,02$$

$$K_{д2 Cs}=1,95$$

$$K_{д3 Cs}=2,0$$

$$K_{д4 Cs}=1,87$$

Решение: Распишем две пищевые цепи с указанием коэффициентов дискриминации

(I) почва – $K_{д1}$ растение – $K_{д2}$ человек,

(II) почва – $K_{д1}$ растение – $K_{д3}$ мясо, молоко – $K_{д4}$ человек.

$$HO_{1Sr} = (K_{д1} \cdot K_{д2})_{Sr} = 0,95 \cdot 1,8 = 1,71;$$

Тогда

$$HO_{1Cs} = (K_{д1} \cdot K_{д2})_{Cs} = 0,02 \cdot 1,95 = 0,039;$$

Найти: HO_{Sr} ,

HO_{Cs}

$$HO_{2Sr} = (K_{д1} \cdot K_{д3} \cdot K_{д4})_{Sr} = 0,95 \cdot 1,78 \cdot 2,2 = 3,72;$$

$$HO_{2Cs} = (K_{д1} \cdot K_{д3} \cdot K_{д4})_{Cs} = 0,02 \cdot 2 \cdot 1,87 = 0,075.$$

Общая величина НО может быть найдена, исходя из соотношения диет человека по формуле

$$HO = \sum N_i \cdot HO_i ,$$

где HO_i – НО для определенной пищевой цепи;

N_i – доля продуктов питания данной пищевой цепи в рационе человека.

Тогда

$$HO_{Sr} = N_1 \cdot HO_1 + N_2 \cdot HO_2 = 0,57 \cdot 1,71 + 0,43 \cdot 3,72 = 1,7;$$

$$HO_{Cs} = N_1 \cdot HO_1 + N_2 \cdot HO_2 = 0,57 \cdot 0,039 + 0,43 \cdot 0,075 = 0,054;$$

Для цезия дискриминационные акты выражены сильнее, чем для стронция.

Ответ: $HO_{Sr}=1,7$; $HO_{Cs}=0,054$.

7. Сравните накопление ^{90}Sr в сене клевера и соломе зернобобовых культур, если в почве содержится 29 мКи $^{90}\text{Sr}/\text{км}^2$ и 8,5 мг-экв Са/100 г почвы.

<p>Дано:</p> $KП_{\text{клевер}}=15$ $KП_{\text{солома зернобоб.}}=14$ $[Sr]_{п}=29 \text{ мКи/км}^2$ $[Ca]_{п}=8,5 \text{ мг-экв/100 г почвы}$ <hr/> <p>Найти: стронциевые единицы(с.е) в сене клевера и соломе зернобобовых культур</p>	<p>Решение: Значения комплексных показателей (КП) для сена клевера и соломы зернобобовых взяты из таблицы 1. Величина КП определяется как</p> $КП = \frac{(с.е)_{\text{раст}} [Ca]_{п}}{[Sr]_{п}},$
--	--

тогда уровень загрязнения растительной продукции (с.е) можно выразить следующим образом

$$(с.е)_{\text{раст}} = \frac{КП \cdot [Sr]_{п}}{[Ca]_{п}}$$

$$(с.е)_{\text{клевер}} = \frac{15 \times 29}{8,5} = 51,2 \text{ с.е.}$$

$$(с.е)_{\text{зернобоб солома}} = \frac{14 \times 29}{8,5} = 47,8 \text{ с.е.}$$

Таким образом, степень загрязнения клевера выше, чем зернобобовых культур.

Ответ: 51,2 с.е.; 47,8 с.е.

8. Рассчитайте концентрацию ^{90}Sr в растительном образце, если поступление радионуклида осуществлялось через почву, плотность загрязнения которой радиостронцием составляет $0,09 \text{ мКи/км}^2$. Содержание кальция в почве $0,12 \text{ мг-экв/100 г почвы}$, в растительной продукции – 21 г/кг . Коэффициент загрязнения данной растительности равен $0,37$.

<p>Дано:</p> $S = 0,09 \text{ мКи/км}^2$ $[Ca]_{п}=0,12 \text{ мг-экв/100 г почвы}$ $[Ca]_{р}=21 \text{ г/кг}$ $K=0,37$ <hr/> <p>Найти: C_{Sr}</p>	<p>Решение:</p> <p>Поступление ^{90}Sr в сельскохозяйственную продукцию можно выразить соотношением</p> $C_{Sr} = K_{п} \cdot S + K_{в} \cdot d,$ <p>если реализуется почвенный путь миграции стронция через корневую систему и воздушный путь через отложение на листьях. В рассматриваемом случае ^{90}Sr поступает только через корни растения, поэтому</p> $C_{Sr} = K_{п} \cdot S.$
--	--

Почвенный коэффициент $K_{\text{п}}$ можно определить по формуле Архипова-Клечковского

$$K_{\text{п}} = \frac{[Ca]_{\text{р}}}{[Ca]_{\text{п}}} \cdot K$$

тогда
$$C_{\text{Sr}} = \frac{[Ca]_{\text{р}} \cdot K \cdot S}{[Ca]_{\text{п}}} = \frac{21 \cdot 0,37 \cdot 0,09}{0,12} = 5,8 \text{ пКи/кг}$$

Ответ: 5,8 пКи/кг.

9. Рассчитайте концентрацию ^{90}Sr в растительном образце, если в результате глобальных месячных выпадений с интенсивностью $1,2 \cdot 10^{-3}$ пКи/сут \cdot км 2 плотность загрязнения почвы радиостронцием составила $0,16$ мКи/км 2 , а усвоение кальция растениями стало составлять 18 г/кг против $1,3$ мг-экв Са/100 г почвы при доле выпадений, задерживаемых растительностью на 1 км 2 $0,001$ и коэффициенте загрязнения для естественных лугов $0,85$. С 1 км 2 луга получают 20 т сухой растительной биомассы.

Дано:
 $S=0,16$ мКи/км 2
 $[Ca]_{\text{р}}=18$ г/кг
 $[Ca]_{\text{п}}=1,3$ мг-экв/100 г почвы
 $K=0,85$
 $n=30$ сут
 $d=1,2 \cdot 10^{-3}$ пКи/сут \cdot км 2
 $R=10^{-3}$
 $m=20000$ кг/км 2

Решение:
 Поступление ^{90}Sr в сельскохозяйственную продукцию при глобальном загрязнении можно рассчитать по уравнению

$$C_{\text{Sr}} = K_{\text{п}} \cdot S + K_{\text{в}} \cdot d$$

Найти: C_{Sr}

Учитывая расчетные формулы для почвенного ($K_{\text{п}}$) и воздушного ($K_{\text{в}}$) коэффициентов, можно провести расчет по общему уравнению

$$C_{\text{Sr}} = \frac{[Ca]_{\text{р}}}{[Ca]_{\text{п}}} \cdot K \cdot S + \frac{10^9 \cdot R \cdot n \cdot d}{m} = \frac{18 \cdot 0,85 \cdot 0,16}{1,3} + \frac{10^9 \cdot 10^{-3} \cdot 30 \cdot 1,2 \cdot 10^{-3}}{20 \cdot 10^3} =$$

$$= 1,88 + 1,8 = 3,68 \text{ пКи/кг}$$

Ответ: 3,68 пКи/кг.

Задания для самоконтроля

1. Определите кратность накопления и коэффициент концентрирования йода-131 в щитовидной железе человека (20 г), если йод ежедневно поступает с водой объемом $1,8$ л и средней концентрацией радионуклида 88 пКи/л. Концентрация ^{131}I в ткани щитовидной железы равна $0,0016$ мКи/кг. (Ответ: $K_{\text{н}}=0,2$; $K_{\text{к}}=18,2$).

2. При переходе на какое звено пищевой цепи дискриминация ^{90}Sr по отношению к Ca выражена сильнее, если экспериментальные данные следующие: $[\text{Sr}]_{\text{почва}} = 18,2$ пКи/кг; $[\text{Sr}]_{\text{растения}} = 165$ пКи/кг; $[\text{Sr}]_{\text{организм животного}} = 10,8$ пКи/кг; $[\text{Sr}]_{\text{организм человека}} = 9,5$ пКи/кг; $[\text{Ca}]_{\text{почва}} = 2,6$ г/кг; $[\text{Ca}]_{\text{растения}} = 24,5$ г/кг; $[\text{Ca}]_{\text{организм животного}} = 105$ г/кг; $[\text{Ca}]_{\text{организм человека}} = 68,7$ г/кг?

(Ответ: более всего дискриминация Sr ощущается при переходе «растения – организм животного» ($K_{д2}=0,015$). Менее всего при переходе «организм животного – человек» ($K_{д3}=1,34$). Промежуточная степень дискриминации при переходе «почва- растения» ($K_{д1}=0,96$)).

3. Определите общую величину наблюдаемого отношения для цезия-137, если человек потребляет в сутки 59 % растительной пищи, а остальное – мясо – молочная продукция. Коэффициенты дискриминации цезия по отношению к калию для звеньев пищевых цепей равны

почва – растения, $K_{д1}$	0,015
растение – человек, $K_{д2}$	2,01
растение – мясо, молоко, $K_{д3}$	1,80
мясо, молоко – человек, $K_{д4}$	1,92

Ответ: $\text{НО}_{\text{Cs}}=0,039$.

4. Расчитайте накопление стронция-90 в сене люцерны и силосе зерновых культур, если в почве содержится ^{90}Sr 1,8 мКи/км² и Ca – 12,8 мг-экв/100 г почвы. Ответ: (с.е.)_{люцерна}=1,68 с.е.; (с.е.)_{силос зерновых}=1,96 с.е.

5. Поступление ^{90}Sr в растения осуществляется через листовое отложение. Рассчитайте концентрацию радиостронция в растительной массе, если за две недели осадков интенсивность выпадений составила $9,6 \cdot 10^{-4}$ пКи/сут \cdot км², доля выпадений, задерживаемых растительностью $9,3 \cdot 10^{-5}$. С 1 км² площади луга получают 32 т сухой растительной биомассы. Ответ: $C_{\text{Sr}}=3,9 \cdot 10^{-2}$ пКи/кг.

Тема 2. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЕРОЯТНОГО УРОВНЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Теоретическая часть

Уровень загрязнения почвы. Количество радиоактивных изотопов Cs, Sr, I, осевших на поверхность почвы, рассчитывается по уравнению

$$A = \frac{0,693 \cdot E \cdot Y}{T \cdot D \cdot C \cdot P}$$

где A – плотность радиоактивного загрязнения почвы изотопами, пКи/м²;

$E = 1,43 \cdot 10^{23}$ – число делений ^{235}U на 1 кг;

Y – доля изотопа при делении, %;

T – период полураспада, сут;

$D = 3,2 \cdot 10^3$ – количество распадов в сутки, соответственно 1 пКи;

$C = 10^6$ м²/км²;

$P = 11,7 \cdot 10^4$ мР/час на 1 кг/км² на высоте 1 м над землей в момент $t + 24$.

Вероятный уровень концентрации радионуклида в тканях растения в любой срок после выпадения можно оценить с помощью следующего уравнения

$$P_t = P_0 \cdot e^{-\lambda_p t}$$

где P_t – концентрация радионуклида в растении, пКи/г сухого вещества;

P_0 – начальная концентрация радионуклида в растении;

$\lambda_p = \frac{0,693}{T_p}$; $T_p = T_{\text{эф}}$ полувыведения изотопа из растения: для ^{89}Sr $\lambda_p = 18$ сут;

для ^{131}I $\lambda_p = 5,5$ сут;

t – дни после выпадения радиоактивных веществ.

Концентрация ^{89}Sr в костной ткани травоядных животных

$$A_k = P_0 \cdot \frac{Q_p \cdot f_{\text{Sr}} (K_1 + K_2)}{Q_k},$$

где A_k – удельная активность костной золы, пКи/г золы;

Q_p – масса корма животного за сутки, г;

Q_k – масса золы костей одного животного, г;

f_{Sr} – доля ^{89}Sr , поглощенного и отложившегося в критической ткани (органе). Для человека $f_{\text{Sr}} = 0,03$. Для крупного рогатого скота $f_{\text{Sr}} = 0,01$.

$\lambda_k = \frac{0,693}{T_k}$, где $T_k = T_{\text{эф}}$ полувыведения ^{89}Sr из кости: для кролика

$T_k = 20$ сут; для крупного рогатого скота $T_k = 52$ сут; для человека $T_k = 50,4$ дня.

$$K_1 = \frac{e^{-\lambda_p t}}{\lambda_k - \lambda_p}; \quad K_2 = \frac{e^{-\lambda_k t}}{\lambda_p - \lambda_k}.$$

Концентрация йода в щитовидной железе животных может быть найдена по уравнению

$$A_q = P_0 \cdot Q_p \cdot f_q \cdot (K_3 + K_4),$$

где A_q – содержание ^{131}I во всей щитовидной железе при $t > 0$, пКи;

f_q – доля ^{131}I , поглощенного и отложившегося в щитовидной железе: для человека $f_q = 0,2$; для крупного рогатого скота $f_q = 0,4$; для свиньи $f_q = 0,2$; для овец $f_q = 0,1$.

$$K_3 = \frac{e^{-\lambda_p t}}{\lambda_q - \lambda_p}; \quad K_4 = \frac{e^{-\lambda_q t}}{\lambda_p - \lambda_q}; \quad \lambda_q = \frac{0,693}{T_q},$$

где $T_q = T_{\text{эф I}}$ для щитовидной железы.

Вероятная степень загрязнения молока коров, выпасавшихся на следе радиоактивного облака, изотопами ^{90}S , ^{137}Cs , ^{131}I

$$L_t = P_0 \cdot N_L \cdot f_L \cdot (K_5 + K_6),$$

где L_t – удельная активность молока, пКи/мл;

N_L – отношение массы сухого корма, съедаемого за день, к суточному объему молока, г/мл. Обычно $N_L = 1,4$ г/мл · сут;

f_L – доля изотопа, выделяющегося с молоком коровы, от его общего количества, попавшего в тело. Для Sr $f_L = 0,02$; для I $f_L = 0,01 - 0,06$;

$$\lambda_L = \frac{0,693}{T_M}, \text{ где } T_M = T_{\text{эф}} \text{ снижения концентрации изотопа в молоке}$$

коров. Для ^{89}Sr $T_L = 2,5$ дня; для ^{131}I $T_L = 2$ дня.

$$K_5 = \frac{e^{-\lambda_p t}}{\lambda_t - \lambda_p}; \quad K_6 = \frac{e^{-\lambda_L t}}{\lambda_p - \lambda_L}.$$

Содержание ^{89}Sr , ^{137}Cs , ^{131}I в критических тканях человека, употребляющего молоко

$$A_t = P_0 \cdot N_L \cdot f_L \cdot N_t \cdot f_t (K_7 + K_8 + K_9),$$

где A_t – удельная активность ткани или критического органа человека, пКи/г;

N_t – отношение объема молока, потребляемого в сутки, к массе органа или ткани человека, мл/г · сут: для детей $N_{^{89}\text{Sr}} = 0,14$ мл/г сут; $N_{^{131}\text{I}} = 500$ мл/г · сут; для взрослых $N_{^{89}\text{Sr}} = 0,14$ мл/г · сут; $N_{^{131}\text{I}} = 50$ мл/г · сут;

f_t – доля нуклида, поглощенного и отложившегося в ткани или критическом органе человека: для ^{89}Sr $f_t = 0,21$; для ^{131}I $f_t = 0,30$;

$$\lambda_t = \frac{0,693}{T_{\text{эф}}}, \text{ где } T_{\text{эф}} \text{ – эффективный период полувыведения изотопа из}$$

критического органа человека: для ^{89}Sr $T_{\text{эф}} = 50,4$ дня; для ^{131}I $T_{\text{эф}} = 7,5$ дня;

$$K_7 = \frac{e^{-\lambda_p t}}{(\lambda_L - \lambda_p) \cdot (\lambda_t - \lambda_p)}; \quad K_8 = \frac{e^{-\lambda_L t}}{(\lambda_p - \lambda_L) \cdot (\lambda_t - \lambda_L)};$$

$$K_9 = \frac{e^{-\lambda t}}{(\lambda_p - \lambda_t) \cdot (\lambda_L - \lambda_t)}.$$

Для удобства пользования в практических целях этими математическими моделями целесообразно построить номограммы, для которых, задаваясь определенными исходными параметрами (P_0), можно построить кривые, отражающие весь ход изменений концентрации радионуклидов в биосубстратах во времени. Результаты такого расчета, в котором было принято, что начальная плотность загрязнения растений $P_{^{89}\text{Sr}} = 100$ пКи/г, $P_{^{131}\text{I}} = 400$ пКи/г, представлены на номограммах рис. 1 и 2. Для других значений P_0 соответствующие величины P_t , L_t , A_t и A_q будут пропорционально видоизменяться. При использовании тех же характеристик эффективных периодов полувыведения, но других значений N_L , N_t , f_L и f_t будут получаться величины, пропорционально большие или меньшие приведенных на номограммах значений L_t и A_t .

Примеры решения задач

1. Рассчитайте концентрацию ^{89}Sr в пастбищных травянистых растениях через 80 суток после радиоактивного выпадения, если начальная концентрация ^{89}Sr в растениях 131 пКи/г.

Дано:

$t=80$ сут

$P_0=131$ пКи/г

Найти: P_t

Решение: По номограмме (рис. 2) определим уровень загрязнения стронцием при начальной концентрации $P_0=100$ пКи/г. Для этого восстановим перпендикуляр из точки $t=80$ сут до пересечения с кривой P_t , затем опустим перпендикуляр на ось $\lg P_t$. Значение $\lg P_t$ лежит между 3 и 4. Для более точного его определения проведем линейную интерполяцию. На крупномасштабной номограмме одна единица $\lg P_t$ соответствует 21,8 см, тогда

$$21,8 \text{ см} - 1$$

$$14,7 \text{ см} - x$$

или

$$x = \frac{14,7 \cdot 1}{21,8} = 0,67.$$

Отсюда

$$\lg P_t = 3 + 0,67 = 3,67.$$

(При использовании номограммы другого масштаба пропорция меняется, а именно пропорционально уменьшаются значения 21,8 см и 14,7 см).

Находим P_t по значению антилогарифма

$$P_t = 10^{3,67} = 4677,4 \text{ пКи/кг}.$$

Размерность P_t указана на оси ОУ.

Номограмма построена для значения $P_0=100$ пКи/кг, в нашем случае P_t пропорционально меняется

$$P_t' = P_t \cdot \frac{P_0'}{P_0} = 4677,4 \cdot \frac{131}{100} = 6127,4 \text{ пКи/кг}.$$

Ответ: 6127,4 пКи/кг.

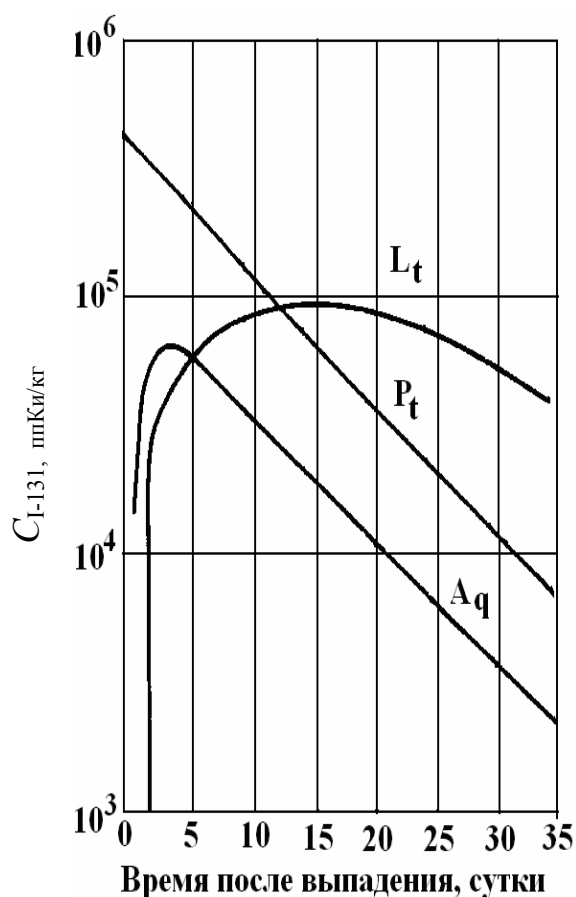


Рисунок 1 – Возможные концентрации ^{131}I в пастбищных растениях, в молоке коров и в щитовидной железе человека:

P_t – концентрация ^{131}I в траве, пКи/кг;
 L_t – концентрация ^{131}I в молоке, пКи/л;
 A_q – содержание ^{131}I в щитовидной железе, пКи;
 $P_0 = 400$ пКи/г;
 $N_t = 50$ мл/г · сут;
 $N_L = 1,4$ г/мл · сут

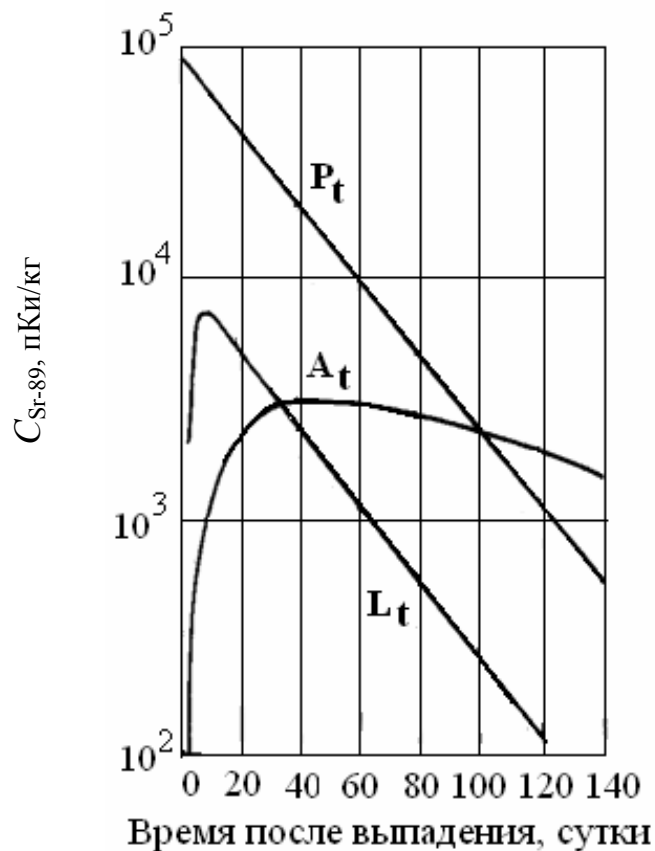


Рисунок 2 – Возможные концентрации ^{89}Sr в пастбищных растениях, в молоке коров и в скелете человека:

P_t – концентрация ^{89}Sr в траве, пКи/кг;
 L_t – концентрация ^{89}Sr в молоке, пКи/л на 10 литров;
 A_t – содержание ^{89}Sr в скелете человека, пКи;
 $P_0 = 100$ пКи/г;
 $N_t = 0,14$ мл/г · сут;

2. Установите вероятную степень загрязнения молока коров радиойодом через 30 суток после радиоактивного загрязнения при начальной концентрации ^{131}I в растениях пастбища 418 пКи/г и значении отношения массы сухого корма, съедаемого за день, к сухому объему молока 1,19 г/мл сут.

Дано:
 $t=30$ сут
 $P_0'=418$ пКи/г
 $N_L'=1,19$ г/мл · сут

Найти: L_t'

Решение: По номограмме (рис. 1) определим уровень загрязнения молока йодом-131 через 30 суток при начальной концентрации радионуклида 400 пКи/г. При опускании перпендикуляра на ось ОУ получаем значение $\lg L_t$ между 4 и 5.

Точное значение дает линейная интерполяция: $\lg L_t=4,75$. Отсюда $L_t = 10^{4,75} = 56234$ пКи/кг.

Значение L_t , полученное по номограмме, уточняем

$$L_t' = L_t \cdot \frac{P_0'}{P_0} \cdot \frac{N_L'}{N_L} = 56234 \cdot \frac{418}{400} \cdot \frac{1,19}{1,4} = 49950 \text{ пКи/кг.}$$

Ответ: 49950 пКи/кг.

3. Рассчитайте концентрацию радиойода в ткани щитовидной железы человека через 10 суток после радиоактивного выпадения при концентрации ^{131}I в пастбищной траве в начальный момент времени 378 пКи/г и значениях коэффициентов $N_L'=1,52$ и $N_t'=0,12$.

Дано:
 $t_1=10$ сут
 $P_0'=378$ пКи/г
 $N_L'=1,52$
 $N_t'=0,12$

Найти: A_q'

Решение: По номограмме (рис.1) определяем значение A_q для периода времени 10 сут при начальном уровне загрязнения травы 400 пКи/г:

$\lg A_q = 4,58$, отсюда

$$A_q = 10^{4,58} = 38019 \text{ пКи/кг.}$$

Пропорционально изменим значения A_q

$$A_q' = A_q \cdot \frac{P_0'}{P_0} \cdot \frac{N_L'}{N_L} \cdot \frac{N_t'}{N_t} = 38019 \cdot \frac{378}{400} \cdot \frac{1,52}{1,4} \cdot \frac{0,12}{0,14} = 33435 \text{ пКи/кг.}$$

Задания для самоконтроля

1. Рассчитайте концентрацию ^{131}I в пастбищной траве через 25 суток после радиоактивного выброса, если в начальный момент времени концентрация йода в растениях составляла 344 пКи/г. Ответ: 20630 пКи/кг.

2. Определите уровень загрязнения стронцием-89 костной ткани человека спустя 120 суток после радиоактивного выпадения, если первоначальный уровень загрязнения травы составляет 125 пКи/г, а коэффициенты N_L и N_t соответственно равны 1,38; 0,22. Ответ: 3070 пКи/кг.

Тема3. КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА РАДИОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

Теоретическая часть

Радиочувствительность отражает способность живого объекта отвечать той или иной реакцией на воздействие ионизирующего излучения. Обратное понятие – *радиорезистентность*. Радиочувствительность выражается в единицах поглощенной энергии, способной вызывать наблюдаемую реакцию у определенного процента популяции.

Количественной характеристикой радиочувствительности является доза радиации, вызывающая гибель половины облученных объектов в течение 30 суток после облучения (среднелетальная доза – ЛД_{50/30}). Чем меньше ЛД₅₀, тем выше радиочувствительность.

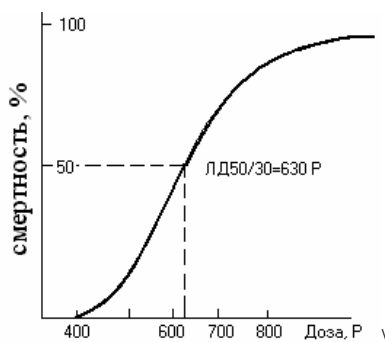


Рисунок 3 – Пример определения ЛД_{50/30} по кривой смертности

ЛД_{50/30} находят графически, для этого используют кривые доза – эффект (рис. 3). На оси абсцисс откладывают дозы излучения, а на оси ординат – процент гибели за срок наблюдения – 30 дней.

Кроме ЛД_{50/30} используют и другие дозы, характеризующие: 1) острое действие ЛД_{50/15}, ЛД_{50/30}, ЛД_{50/60}; 2) подострое ЛД_{50/120}, ЛД_{50/240}; 3) хроническое ЛД_{50/360}, ЛД_{50/620}. При этом в числителе по-прежнему указывается количество погибающих животных (50 %), а в знаменателе – срок, к которому они погибают.

ЛД_{50/30} можно определить и расчетным путем достаточно точно при небольшом количестве экспериментальных животных. Для этих целей результаты эксперимента обрабатывают с помощью формул Г.Н. Першина или Кёрбера.

Формула Г.Н. Першина

$$ЛД_{50} = \frac{\sum(a + b) \cdot (m - n)}{200},$$

где a и b – значения смежных доз;

m и n – соответствующие этим дозам частоты смертельных исходов, %.

Формула Кёрбера

$$LD_{50} = LD_{100} - \frac{\sum zd}{n},$$

где LD_{100} – доза, вызывающая гибель всех подопытных животных;

d – интервал между каждыми двумя смежными дозами;

z – среднее арифметическое из числа погибших животных при испытании двух смежных доз;

n – число животных в каждой группе.

Для расчета LD_{50} по данной формуле необходимо испытать 4–5 значений доз, включая дозу, не вызывающую эффекта, и дозу, вызывающую гибель всех экспериментальных животных.

Еще одним критерием радиочувствительности является D_0 . Этот критерий может быть определен графически по кривым выживания (рис. 4) или смертности (рис. 5). Кривые выживания разных клеток при действии плотноионизирующих излучений имеют одинаковую форму, аналогичную приведенной на рис. 4.

Графики построены в полулогарифмических координатах: по оси абсцисс дозу откладывают в линейном масштабе, а по оси ординат выживаемость – в логарифмическом. Кривые выживания самых разных клеток при действии рентгеновского, гамма – или любого другого редкоионизирующего излучения имеют одинаковую форму, аналогичную приведенной на рис. 6. Кривая состоит из плеча и линейного участка. При облучении плотноионизирующими частицами кривые выживаемости биосистем не имеют плеча (рис. 4).

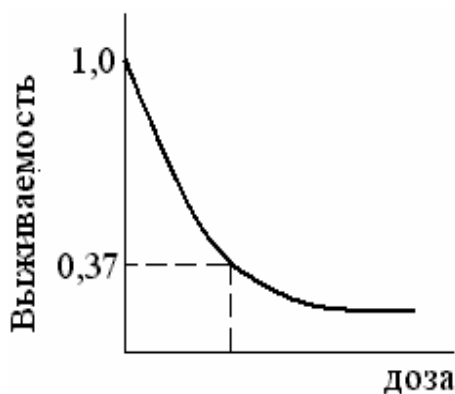


Рисунок 4 – Зависимость изменения выживаемости от величины дозы излучения

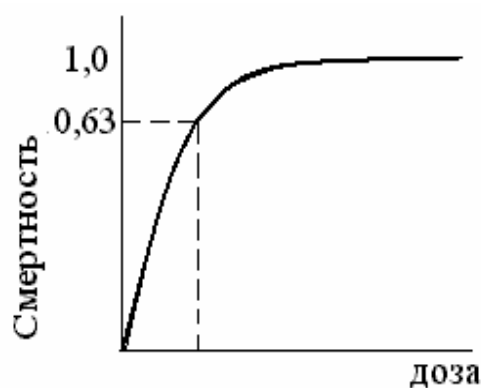


Рисунок 5 – Зависимость количества погибших клеток от дозы излучения

Рассмотрим определение основного параметра радиочувствительности – величину D_0 или D_{37} на примере анализа одноударного поражения. В качестве такового подразумевают гибель облучаемого объекта от единичной ионизации в определенной мишени (для плотноионизирующих излучений).

Если n_0 – исходное число объектов, n – число объектов, не пораженных дозой D , то выход из строя доли объектов $\frac{dn}{n_0}$ при приращении дозы dD выражается уравнением

$$\frac{dn}{n_0} = -\frac{D}{D_0},$$

где D_0 – доза, при которой на каждый объект в среднем приходится одно попадание.

После интегрирования получаем

$$\ln \frac{n}{n_0} = -\frac{D}{D_0} \quad \text{или} \quad n = n_0 \cdot e^{-\frac{D}{D_0}}.$$

Если на оси ординат откладывать значения относительного числа пораженных объектов, то доза D_0 совпадает с дозой, поражающей 63,2 % мишеней, так как, если $n = n_0$ и $D = D_0$, то $1 - e^{-1} = 0,632$.

Если на оси ординат откладывать число выживших объектов, то D_0 будет соответствовать дозе, при которой выживает 36,8 % \approx 37 % объектов, отсюда название 37 % доза или D_{37} .

Кривые, имеющие плечо, описываются уравнением вида

$$\frac{N}{N_0} = 1 - (1 - e^{-\frac{D}{D_0}})^n,$$

где n – экстраполяционное число, определяемое как значение ординаты в месте ее пересечения экстраполированным прямолинейным участком кривой выживания.

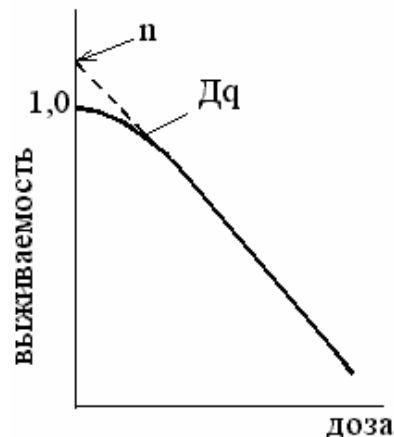


Рисунок 6 – Зависимость выживаемости клеток от дозы излучения

Плечо на кривой выживания определяет способность клеток восстанавливать жизнеспособность путем репарации от части лучевого поражения. Мерой репарационной способности клеток является величина плеча или квазипороговая доза D_q (рис. 6). Она соответствует точке

пересечения экстраполированного прямолинейного участка кривой выживания с прямой, параллельной оси абсцисс, проведенной на уровне 100-процентной выживаемости. При резком снижении восстановительной способности, например, при облучении потоком α – частиц, величины n и D_q значительно уменьшаются: n до 1, а D_q до 0 Гр.

Примеры решения задач

1. Определите $LD_{50/30}$ по формуле Першина, исходя из следующих экспериментальных данных

Введенная доза, мКи/кг	Гибель подопытных животных, %
1,2	0
2,0	20
3,2	40
4,0	60
5,5	80
6,4	100

Решение: Дополним таблицу расчетом суммы смежных доз ($a+b$) и разности соответствующих этим дозам частот смертельных, исходов ($m-n$).

Д, мКи/кг	Гибель, %	$a+b$	$m-n$
1,2	0	3,2	20
2,0	20	5,2	20
3,2	40	7,2	20
4,0	60	9,5	20
5,5	80	11,9	20
6,4	100	-	-

Рассчитаем $LD_{50/30}$ по формуле Першина

$$LD_{50} = \frac{\sum(a+b) \cdot (m-n)}{200} = \frac{20 \cdot (3,2 + 5,2 + 7,2 + 9,5 + 11,9)}{200} = 3,7 \text{ мКи/кг}$$

Ответ: 3,7 мКи/кг.

2. Определите LD_{50} по формуле Першина, исходя из следующих экспериментальных данных

Введенная доза $\cdot 10^{-6}$, Бк/кг	Гибель клеток, %
5,6	5
7,2	18
8,2	29
8,9	41
9,5	74
10,4	92

Решение: Дополним таблицу расчетом ($a+b$) и ($m-n$).

Д · 10 ⁻⁶ , Бк/кг	Гибель, %	(a+b)·10 ⁻⁶	(m-n)
5,6	5	12,8	13
7,2	18	15,4	11
8,2	29	17,1	12
8,9	41	18,4	33
9,5	74	19,9	18
10,4	92	–	–

Рассчитаем ЛД_{50/30} по формуле Першина

$$\text{ЛД}_{50/30} = \frac{\sum(a+b)(m-n)}{200} = \frac{(12,8 \cdot 13 + 15,4 \cdot 11 + 17,1 \cdot 12 + 18,4 \cdot 33 + 19,9 \cdot 18) \cdot 10^6}{200} =$$

$$= \frac{(166,4 + 169,4 + 205,2 + 607,2 + 358,2) \cdot 10^6}{200} = 7,5 \cdot 10^6 \text{ Бк/кг.}$$

Ответ: 7,5 · 10⁶ Бк/кг.

3. Рассчитайте ЛД₅₀ по формуле Кербера, исходя из следующих экспериментальных данных

Доза, мКи/кг	Число выживших животных	Число погибших животных
5,6	14	0
7,4	13	1
11,2	8	6
15,8	6	8
16,8	3	11
20,4	0	14

Решение: Дополним таблицу расчетом интервала между двумя смежными дозами, d и среднего арифметического из числа погибших животных при испытании смежных доз, z .

Д, мКи/кг	Число выживших животных	Число погибших животных	d	z	dz
5,6	14	0	1,8	0,5	0,9
7,4	13	1	3,8	3,5	13,3
11,2	8	6	4,6	7	32,2
15,8	6	8	1,0	9,5	9,5
16,8	3	11	3,6	12,5	45
20,4	0	14			

Рассчитаем ЛД₅₀ по формуле Кербера

$$\text{ЛД}_{50} = \text{ЛД}_{100} - \frac{\sum zd}{n},$$

где ЛД₁₀₀=20,4 мКи/кг; n=14.

$$\text{Тогда } ЛД_{50} = 20,4 - \frac{0,9 + 13,3 + 32,2 + 9,5 + 45}{14} = 20,4 - \frac{100,9}{14} = 13,2 \text{ мКи/кг.}$$

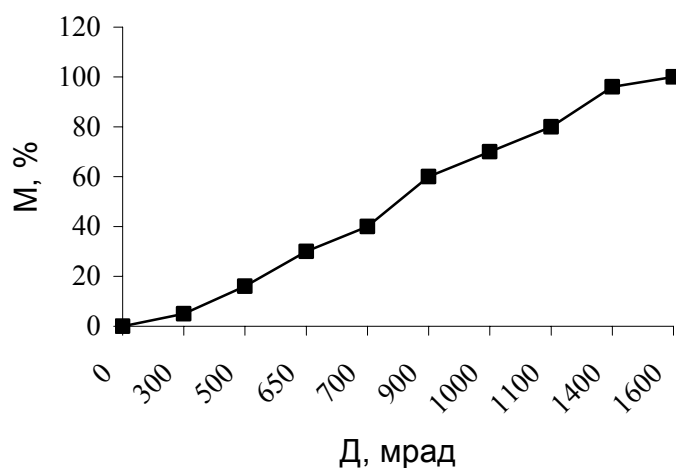
Ответ: 13,2 мКи/кг.

4. Определите $ЛД_{50}$, построив графическую зависимость «Поражаемость-доза» согласно ниже приведенным данным.

Какое действие радиации характеризует определяемая $ЛД_{50}$, если все экспериментальные данные получены за интервал времени 120 суток?

Доза, мрад	Смертность, М, %
300	5
500	15,3
650	31
720	40
900	62
1000	70
1100	80
1400	97
1600	100

Решение: Построим графическую зависимость М–Д. Согласно определению $ЛД_{50/120}$ – это доза вызывающая гибель 50 % особей за интервал времени 120 суток. Восстановим перпендикуляр от оси М (от 50 %) на кривую. От точки пересечения опустим перпендикуляр на ось Д. $ЛД_{50/120} = 800$ мрад. Доза $ЛД_{50/120}$ характеризует подострое действие радиации.



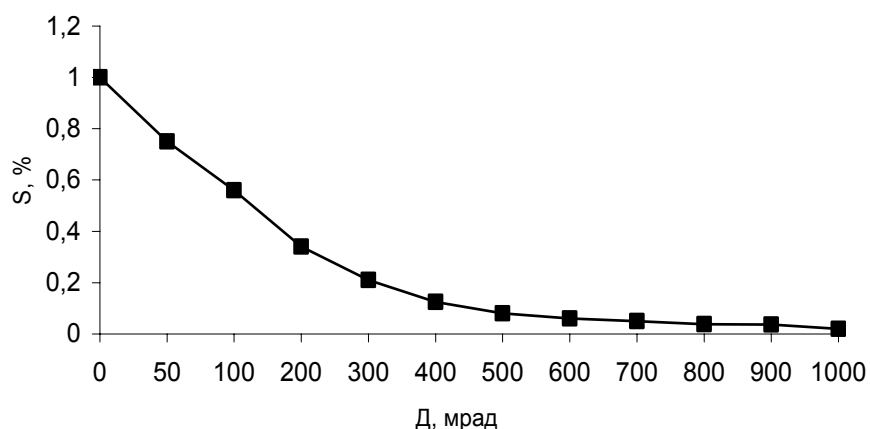
Ответ: 0, 8 рад.

5. Определите D_0 по кривой «Доза-эффект» согласно экспериментальным данным

Доза, мрад	Выживаемость, S, %
50	75
100	56,3
200	33,8
300	21,3
400	13,8
500	10,0
600	6,3
700	5,0
800	3,8
900	2,5
1000	1,9

Решение: Построим зависимость «Доза-выживаемость». Доза D_0 – показатель радиочувствительности клеточных культур, при которой выживает 37 % (0,37) клеток. Для ее определения восстанавливаем перпендикуляр от оси S ($S = 0,37$) до пересечения с кривой, а затем опустим перпендикуляр на ось D. Получим $D_0 = 190$ мрад.

Ответ: 190 мрад.



Задания для самоконтроля

1. Определите LD_{50} по формуле Першина, используя экспериментальные данные

Доза, мКи/кг	% гибели клеток
18,4	4
20,5	15
23,8	32
25,5	57
27,8	72
30,5	98

Ответ: 23,6 мКи/кг.

2. Определите LD_{50} по формуле Кербера, используя экспериментальные данные

Д, мКи/кг	Число выживших клеток	Число погибших клеток
11,2	120	0
12,8	89	31
15,5	75	45
20,5	66	54
25,4	28	92
30,0	0	120

Ответ: 19,8 мКи/кг.

Тема 4. ОТНОСИТЕЛЬНАЯ БИОЛОГИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ (ОБЭ)

Теоретическая часть

Относительную биологическую эффективность действия ионизирующих излучений (ОБЭ) оценивают сравнением дозы изучаемого излучения, вызывающей определенный биологический эффект, с дозой стандартного излучения, обуславливающей тот же эффект. В качестве стандартного излучения используют жесткие рентгеновские лучи с энергией 180–250 кэВ.

ОБЭ вычисляют по формуле

$$ОБЭ = \frac{D_{R_0 \text{ эфф}}}{D_x \text{ эфф}} \cdot \frac{\text{рентгеновское излучение}}{\text{изучаемое излучение}}$$

ОБЭ зависит от

- линейной передачи энергии (ЛПЭ);
- величины и мощности дозы;
- до- и пострadiaционных условий;
- наличия или отсутствия кислорода;
- режима фракционирования.

ОБЭ увеличивается при фракционированном облучении. Это явление используется при лучевой терапии опухолей тяжелыми ядерными частицами с большой ЛПЭ – нейтронами. Следовательно, один и тот же эффект может быть достигнут при фракционированном облучении относительно меньшими суммарными дозами, чем при однократном облучении.

Отдельно остановимся на факторе времени (F_t), который определяется отношением доз протяженного или дробного излучения (с разными мощностями доз) к дозе кратковременного облучения, вызывающими один и тот же биологический эффект

$$F_t = \frac{\text{доза дробного облучения}}{\text{доза однократного облучения}}$$

Фактор времени может быть различным в зависимости от площади облучения, преимущественного облучения какого-либо органа, разных видов облучения и т.д.

Фактор времени равен единице, если временное распределение дозы не оказывает влияния или, если общая доза излучения и при действии в течение более длительного времени может дать тот же полный эффект. Фактор времени будет больше единицы, если при более длительном времени облучения требуется большая доза для получения того же биологического эффекта, который возникает при разовом облучении.

Пример решения задачи

Однократная доза γ -излучения неизвестной энергии в 180 рад вызывает гибель 40 % крыс. Аналогичный эффект достигается при воздействии на экспериментальную группу животных рентгеновского облучения в однократной дозе 340 рад ($E = 220$ кэВ). При фракционировании дозы γ -излучения 40-процентная смертность крыс достигалась при дозе 108 рад. Рассчитайте ОБЭ и фактор времени.

Дано:
 $D_{Ro} = 340$ рад (однократ.)
 $D_{\gamma} = 180$ рад (однократ.)
 $D_{\gamma} = 108$ рад (фракцион.)

Найти: ОБЭ, F_t

Решение: При облучении живых организмов экспозиционная доза рассчитывается по уравнению

$$D_{\text{эксп}} = 0,96 \cdot D_{\text{полг}}$$

Отсюда

$$D_{\text{эксп } Ro} = 0,96 \cdot 340 = 326,4 \text{ P (однократ.)};$$

$$D_{\text{эксп } \gamma} = 0,96 \cdot 180 = 172,8 \text{ P (однократ.)};$$

$$D_{\text{эксп.}\gamma} = 0,96 \cdot 108 = 103,7 \text{ P (фракционированная)}.$$

Так как оценку ОБЭ и F_t необходимо провести в момент прекращения облучения, а не через определенный временной интервал, то можно считать что величины эффективных доз равны величинам экспозиционных доз. ОБЭ вычисляются сравнением доз двух излучений при однократном действии

$$\text{ОБЭ} = \frac{D_R}{D_{\gamma}} = \frac{326,4}{172,8} = 1,89.$$

Фактор времени находят как отношение двух доз F_t при различных режимах воздействия

$$F_t = \frac{D_{\gamma \text{ эф.фракц}}}{D_{\gamma \text{ эф.однокр}}} = \frac{103,7}{172,8} = 0,6.$$

Ответ: ОБЭ = 1,89; $F_t = 0,6$.

Задание для самоконтроля

Доза γ – излучения неизвестной энергии в 165 рад при однократном действии вызывает гибель 38 % мышей. Аналогичный эффект достигается при воздействии на экспериментальную группу животных рентгеновского облучения в однократной дозе 375 рад ($E_{R_0}=190$ кэВ). При фракционировании дозы γ -излучения 38-процентная смертность крыс достигалась при дозе 120 рад. Рассчитайте ОБЭ и фактор времени. (Ответ: ОБЭ = 2,3; $F_t = 0,73$).

Тема 5. КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА КОМБИНИРОВАННОГО ДЕЙСТВИЯ РАДИАЦИИ И ДРУГИХ ФАКТОРОВ

Теоретическая часть

В наш век возрастающего загрязнения окружающей среды биологически активными веществами (мутагенами, канцерогенами, ядами) и физическими агентами (короткими и ультракороткими радиоволнами, вибрацией, ультразвуком и другими) проблема биологического действия радиации и других химических и физических факторов привлекает большое внимание радиобиологов. Открываются возможности практического использования ионизирующей радиации в сочетании с другими факторами в медицине, биологической технологии, сельском хозяйстве.

Подчеркнем, что при одновременном действии ионизирующей радиации и другого агента на биологические объекты возможны три ситуации:

- агент снижает биологическое действие радиации, проявляется ингибирование, то есть антагонизм действия;

- агент не меняет эффекта от радиации. Результат комбинированного воздействия равен сумме воздействий радиации и второго агента, то есть проявляется аддитивность (суммация) действия;

- агент усиливает действие радиации. В случае усиления действия радиации регистрируется биологический эффект, не наблюдаемый при раздельном действии факторов во взятых дозах. Важно помнить, что в этом случае различают 2 класса явлений в зависимости от свойств второго агента:

- если второй агент сам вызывает радиобиологический эффект (например, химические мутагены, канцерогены, тепло и другие), который усиливается при комбинированном воздействии и оказывается выше аддитивного, то говорят о синергизме или потенцировании действия;

- если второй агент не способен сам по себе вызывать наблюдаемый эффект, но усиливает действие радиации, то явление носит название сенсбилизации, а второй агент – сенсбилизатора.

На практике ситуация уменьшения действия радиации представляет собой химическую защиту с использованием радиопротекторов или радиозащитных средств. Радиозащитные средства – это вещества, облегчаю-

щие тяжесть поражения человека или животных ионизирующим излучением. Они уменьшают эффективную дозу радиации. Сам процесс ослабления поражения называется химической защитой.

Важно знать количественные критерии комбинированного действия радиации и других факторов. Основными критериями являются фактор уменьшения дозы (ФУД) и фактор изменения логарифма выживаемости (ФИЛ). Примеры их графического определения представлены на рис. 7, 8. ФУД равен отношению доз радиации, оказывающих одинаковый биологический эффект на организм, при наличии (D_2) и в отсутствие другого агента (D_1)

$$\text{ФУД} = \frac{D_2}{D_1}.$$

При синергизме действия ФУД меньше единицы, взаимное расположение кривых $\lg S - D$: выше лежит кривая при действии радиации (контроль).

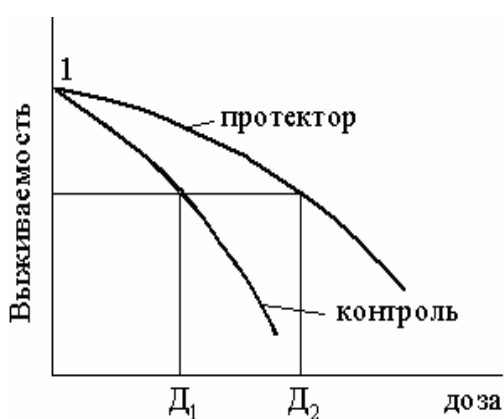


Рисунок 7 – Пример определения ФУД по кривой выживаемости

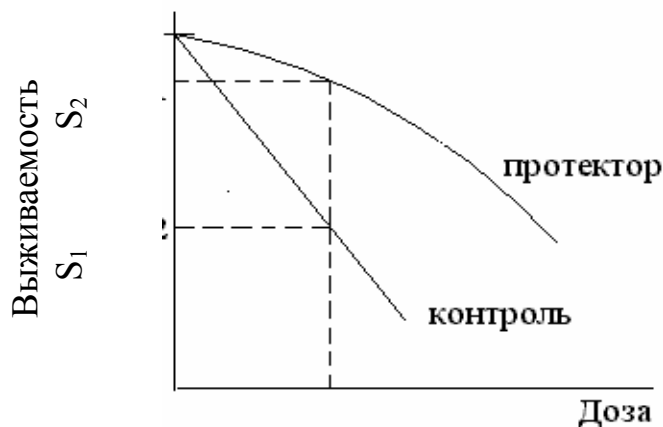


Рисунок 8 – Пример определения ФИЛ по кривой выживаемости

При аддитивности действия ФУД равен единице, кривые совпадают друг с другом. При антагонизме действия ФУД больше единицы, выше лежит кривая комбинированного действия. На рис. 7 представлен пример определения ФУД в присутствии радиопротектора. ФУД в таких случаях равен 2 – 3.

Другой количественной характеристикой является фактор изменения логарифма выживаемости (ФИЛ)

$$\text{ФИЛ} = \ln \frac{S_1}{S_2} = 2,3 \cdot \lg(S_1 - S_2),$$

где S – выживаемость клеток.

При синергизме действия ФИЛ больше нуля, при аддитивности – равен нулю, при антагонизме действия – меньше нуля. Пример графического определения ФИЛ в присутствии радиопротектора приведен на рис. 8.

Третьим количественным критерием действия радиопротекторов является коэффициент модификации – отношение разности между удельной поражаемостью (смертью) в контроле (то есть при действии радиации) и в опыте (то есть при комбинированном действии) к удельной поражаемости в контроле.

Кроме того, используют еще два критерия, которые сильно зависят от величины доз, при которых проводится оценка, поэтому они дают неточное представление о степени модифицирующего, в том числе и защитного, эффекта. Это:

– абсолютная величина разности между показателями выживаемости в опыте (комбинированное действие) и в контроле;

– индекс эффекта – отношение показателей выживаемости в опытной и контрольной группах.

Эти показатели чаще используются для качественной оценки наличия или отсутствия защитного, либо иного другого модифицирующего эффекта.

Примеры решения задач

1. Определите характер комбинированного действия радиации и повышенной температуры согласно приведенным экспериментальным данным.

Оцените комбинированное действие количественно путем расчета ФУД при выживаемости клеточных культур 40 % и ФИЛ при дозе 500 рад.

Д, рад	Выживаемость при действии радиации ($S_1, \%$) (в контроле)	Выживаемость при совместном действии радиации и гипертермии ($S_2, \%$)
0	100	100
100	79	40
200	61	14
300	43,5	5
400	27,5	3
500	16	1,8
600	7,5	1,1
700	4,5	-
800	2,5	-
900	1	-

Решение: Оценка комбинированного действия проводится путем построения графической зависимости $\lg S - D$. Для этого прологарифмируем значения S_1 и S_2 .

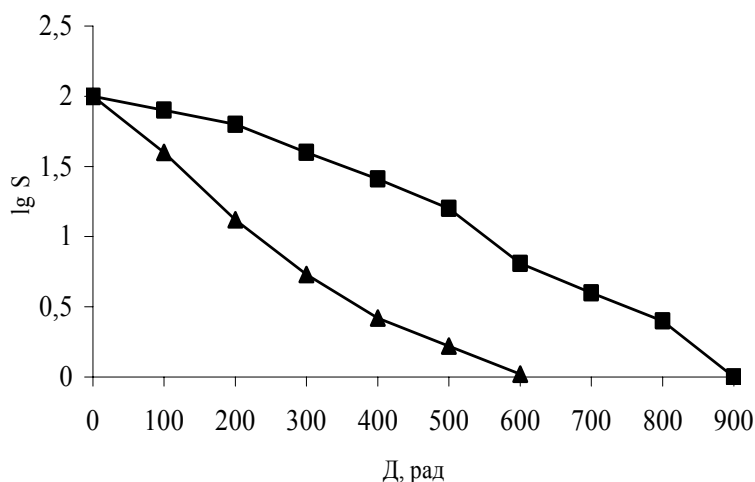
Д, рад	$\lg S_1$	$\lg S_2$
0	2	2
100	1,9	1,6
200	1,78	1,15
300	1,63	0,7
400	1,44	0,48
500	1,2	0,26
600	0,87	0,04
700	0,65	-
800	0,39	-
900	0	-

По виду графической зависимости характер комбинированного действия радиации и гипертермии можно оценить как синергизм. Рассчитаем количественные характеристики комбинированного действия.

Расчет ФУД при $S = 40\%$ ($\lg S = 1,6$): графически находим $D_1 = 320$ рад; $D_2 = 100$ рад. Отсюда $\text{ФУД} = \frac{D_2}{D_1} = \frac{100}{320} = 0,31$.

Значение ФУД < 1 , что подтверждает синергизм комбинированного действия.

Расчет ФИЛ при $D = 500$ рад: графически находим $\lg S_1 = 1,2$; $\lg S_2 = 0,26$. Отсюда $\text{ФИЛ} = 2,3(\lg S_1 - \lg S_2) = 2,3 \cdot (1,2 - 0,26) = 2,16 > 0$. Значение ФИЛ > 0 , что подтверждает синергизм комбинированного действия.



Значения ФУД и ФИЛ, а также взаимное расположение кривых $\lg S - D$ (сильное расхождение) свидетельствует о проявлении синергизма в значительной степени.

Ответ: синергизм комбинированного действия. ФУД = 0,31; ФИЛ = 2,16.

2. Определите ФУД при 20 % выживаемости и ФИЛ при дозе 3,5 гр, используя экспериментальные данные. Определите характер комбинированного действия радиации и химического агента.

Д, Гр	Выживаемость при действии радиации ($S_1, \%$)	Выживаемость при действии радиации и химического агента ($S_2, \%$)
0	100	100
0,5	79	40
1,0	60	16
1,5	40	9
2,0	23	7
2,5	12	5
3,0	4	4
3,5	1,6	3
4,0	1	2,4
4,5	-	1,6
5,0	-	1

Решение: Построим графическую зависимость $\lg S$ - D . Для этого прологарифмируем значения S_1 и S_2 .

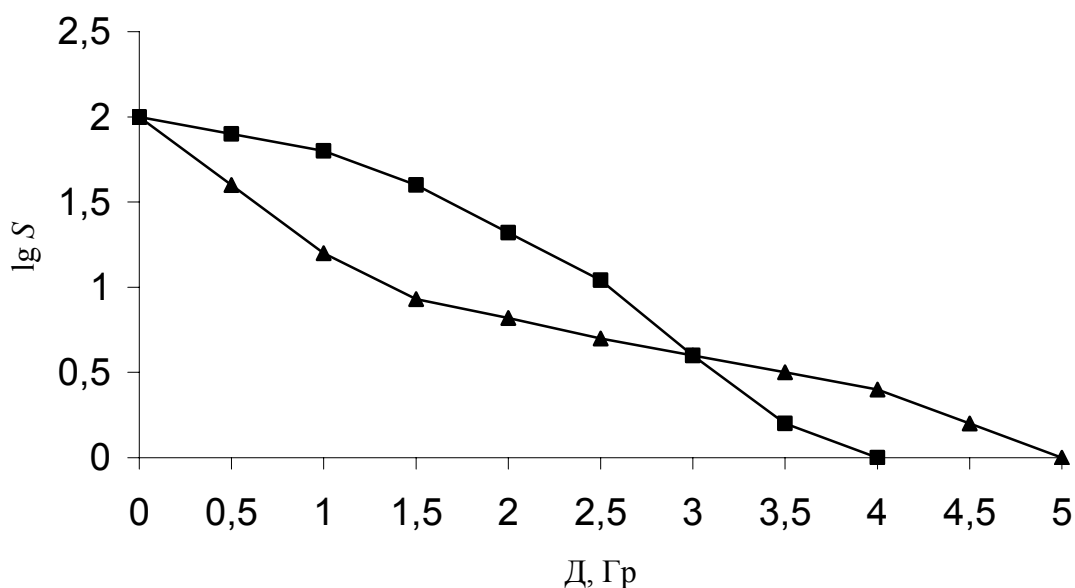
D , рад	$\lg S_1$	$\lg S_2$
0	2,0	2,0
0,5	1,9	1,6
1,0	1,78	1,2
1,5	1,6	0,95
2,0	1,36	0,85
2,5	1,08	0,70
3,0	0,6	0,6
3,5	0,2	0,48
4,0	0	0,38
4,5	-	0,2
5,0	-	0

По виду графической зависимости характер комбинированного действия можно оценить как переходный. До дозы 3 Гр наблюдается синергизм действия. В точке $D = 3$ Гр наблюдается аддитивность действия. При дозе более 3 Гр наблюдается антагонизм действия. В итоге комбинированное действие можно оценить как синерго-антагонистическое. Рассчитаем количественные характеристики комбинированного действия.

Расчет ФУД при $S = 20\%$ ($\lg S = 1,3$): графически находим $D_1 = 2,1$ Гр; $D_2 = 0,8$ Гр.

Отсюда
$$\text{ФУД} = \frac{D_2}{D_1} = \frac{0,8}{2,1} = 0,38.$$

Значение ФУД < 1 , что подтверждает синергизм действия радиации и химического агентов области доз менее 3 Гр.



Расчет ФИЛ при $D=3,5$ Гр: графически находим $\lg S_1 = 0,2$; $\lg S_2 = 0,5$. Отсюда $\text{ФИЛ} = 2,3 \cdot (\lg S_1 - \lg S_2) = 2,3(0,2 - 0,5) = -0,69 < 0$.

Значение $\text{ФИЛ} < 0$ подтверждает проявление антагонизма действия в области доз более 3 Гр.

Значения ФУД и ФИЛ, а также взаимное расположение кривых $\lg S_1 - D$ свидетельствуют о проявлении значительного синергизма, а затем о резком изменении характера действия до явного антагонизма.

Ответ: синерго- антагонистическое действие $\text{ФУД}=0,38$; $\text{ФИЛ}=-0,69$.

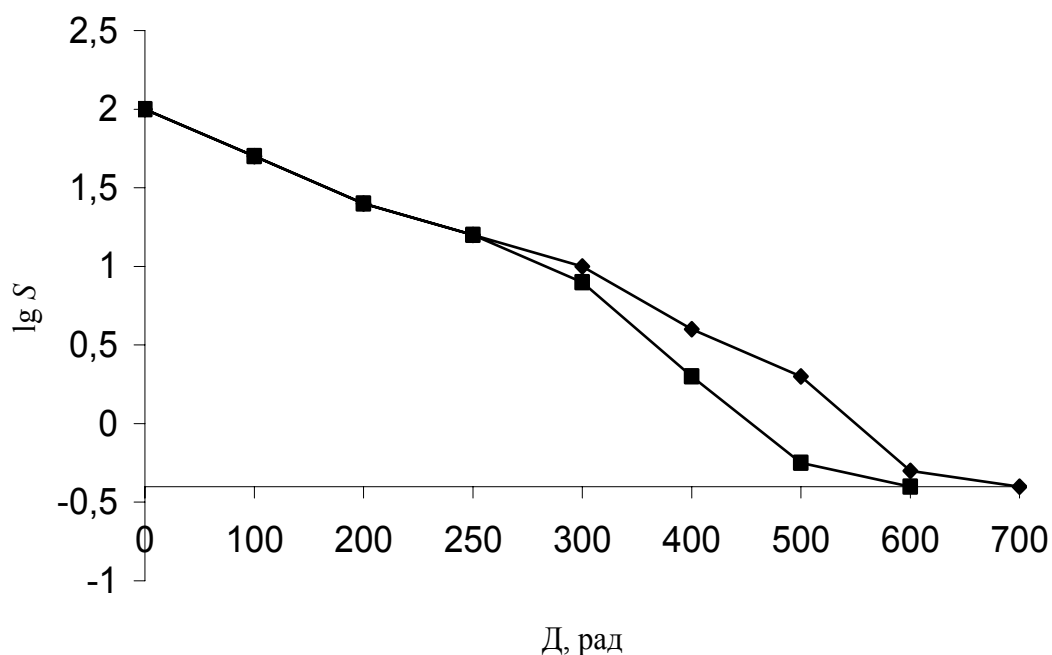
3. Определите ФУД при 4 % выживаемости и ФИЛ при дозе 500 рад, используя экспериментальные данные. Оцените характер действия радиации и химического агента. Можно ли рекомендовать данное вещество к использованию в качестве радиопротектора с позиций эффективности радиационной защиты?

Д, рад	Выживаемость при действии радиации (S_1 , %)	Выживаемость при действии радиации и химического агента (S_2 ,%)
0	100	100
100	48	48
200	24	24
250	16,5	16,5
300	8	10
400	1,9	4
500	0,5	2
550	0,4	-
600	-	0,5
700	-	0,4

Решение: Построим графическую зависимость $\lg S - D$. Для этого прологарифмируем значения S_1 и S_2 .

Д, рад	$\lg S_1$	$\lg S_2$
0	2,0	2,0
100	1,68	1,68
200	1,38	1,38
250	1,22	1,22
300	0,90	1,0
400	0,28	0,60
500	-0,30	0,30
550	-0,40	-
600	-	-0,30
700	-	-0,40

По виду зависимости $\lg S - D$ можно оценить характер комбинированного действия радиации и химического объекта: до $D=250$ рад наблюдается аддитивность действия. При дозах выше 250 рад наблюдается антагонизм действия. Антагонизм выражен несильно, так как кривые незначительно расходятся. Оценим количественно антагонизм действия.



Расчет ФУД при $S = 4\%$ ($\lg S = 0,6$): графически находим $D_1 = 360$ рад; $D_2 = 400$ рад. Отсюда $\text{ФУД} = \frac{D_2}{D_1} = \frac{400}{360} = 1,11 > 1$. Наблюдается антагонизм

действия.

Расчет ФИЛ при дозе 500 рад: графически находим $\lg S_1 = -0,24$; $\lg S_2 = 0,27$. Отсюда $\text{ФИЛ} = 2,3(\lg S_1 - \lg S_2) = 2,3(-0,24 - 0,27) = -1,17 < 0$. Подтверждается антагонизм действия.

Данное химическое вещество нельзя рекомендовать в качестве протектора, так как значение ФУД низкое (для радиопротекторов ФУД должен равняться 2–3). Вещество неэффективное в плане радиационной защиты. Помимо этого, в области доз до 250 рад протекторное действие вообще не наблюдается.

Ответ: аддитивность, затем антагонизм действия. $\text{ФУД} = 1,11$; $\text{ФИЛ} = -1,17$.

Задания для самоконтроля

1. Оцените характер комбинированного действия радиации и шума по следующим экспериментальным данным.

Д, рад	0	100	200	300	400	500	600
Выживаемость в контроле (S_1), %	100	52	28	14	5,6	2,5	1,0
Выживаемость при действии радиации и шума (S_2), %	100	25	6,3	1,25	-	-	-

Определите величину ФУД при 15 % выживаемости и ФИЛ при дозе 200 рад.

Ответ: синергизм комбинированного действия. $\text{ФУД} = 0,48$; $\text{ФИЛ} = 1,47$.

2. Определите величину ФУД при 25 % выживаемости и ФИЛ при дозе 600 рад по следующим экспериментальным данным. Оцените характер комбинированного действия.

Д, рад	0	100	200	300	400	500	600	700	800
Выживаемость в контроле (S_1), %	100	23	9	6	5	4	3,1	2,3	1,2
Выживаемость при действии радиации и химического агента (S_2), %	100	63	26	11,5	5	2,4	1,3	1,1	1

Ответ: антагоносинергизм. ФУД = 2,33; ФИЛ = 0,83.

Тема 6. ДОЗОВЫЕ ПРЕДЕЛЫ ОБЛУЧЕНИЯ. ДОПУСТИМЫЕ И КОНТРОЛЬНЫЕ УРОВНИ КАК ОСНОВА РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Теоретическая часть

Основные регламентированные величины

В основу НРБУ положены рекомендации МКРЗ, изданные в 1989–96 гг. Рекомендации НРБУ основываются на следующих положениях:

- концепции эффективной дозы;
- новой системе допустимых уровней с использованием возраст-зависимых дозиметрических моделей;
- двух групп облучаемых лиц: персонал и население;
- системе четырех групп радиационно-гигиенических регламентов:
 - регламенты по ограничению облучения при практической деятельности;
 - регламентирование аварийного облучения населения;
 - регламентирование облучения от техногенно-усиленных источников природного происхождения;
 - ограничение медицинского облучения.

Радиационная безопасность и противорадиационная защита по отношению к практической деятельности строятся с использованием следующих принципов:

- любая практическая деятельность не должна осуществляться, если она не приносит большей пользы облучаемым лицам по сравнению с вредом, который она причиняет (принцип оправданности);
- уровни облучения от всех видов практической деятельности и ионизирующих излучений не должны превышать установленные пределы доз (принцип неперевышения);

– уровни облучения индивидуумов и/или количество облучаемых лиц должны быть настолько низкими, насколько это может быть достигнуто с учетом экономических и социальных факторов (принцип оптимизации).

НРБУ-97 включают 4 группы радиационно-гигиенических регламентированных величин.

1 группа – регламенты контроля за практической деятельностью, целью которых является поддержание облучения персонала и населения на приемлемом для индивидуума и общества уровне.

В эту группу входят:

- пределы доз;
- производные уровни:
 - допустимые уровни;
 - контрольные уровни.

2 группа – регламенты, целью которых являются ограничения облучения человека от медицинских источников.

В эту группу входят:

- рекомендуемые уровни.

3 группа – регламенты, определяющие величину предотвращаемой вследствие вмешательства дозы облучения населения в условиях радиационной аварии.

В эту группу входят:

- уровни вмешательства;
- уровни действия.

4 группа – регламенты, определяющие величину предотвращаемой вследствие вмешательства дозы облучения населения от техногенно-усиленных источников природного происхождения.

В эту группу входят:

- уровни обязательных действий;
- уровни действия.

НРБУ устанавливаются 3 категории облучаемых лиц:

Категория А (персонал) – лица, которые постоянно или временно работают непосредственно с источниками ионизирующих излучений;

Категория Б (персонал) – лица, которые непосредственно не заняты работой с источниками ионизирующего излучения, но в связи с расположением рабочих мест на объектах с радиационно-ядерными технологиями могут получать дополнительное облучение;

Категория В – все население.

Пределы доз и допустимые уровни

Для категории А и Б пределы доз устанавливаются в терминах индивидуальной годовой эффективной дозы внешнего и внутреннего облучения (предел годовой эффективной дозы) и эквивалентных доз внешнего облучения (предел эквивалентной дозы внешнего облучения). Для

категории В ограничение облучения осуществляется введением пределов годовых эффективных и эквивалентных доз в критической группе лиц категории В. Последнее означает, что значения годовой дозы облучения лиц, входящих в критическую группу, не должно превышать предела дозы, установленного для категории В.

С пределом дозы сравнивается сумма эффективных доз облучения от всех индустриальных источников излучения. В эту сумму не включают:

- дозу, которую получают при медицинском обследовании или лечении;
- дозу облучения от природных источников излучения;
- дозу, связанную с аварийным облучением населения;
- дозу облучения от техногенно – усиленных источников природного происхождения.

Дополнительно к пределу годовой эффективной дозы устанавливаются пределы годовой эквивалентной дозы внешнего облучения отдельных органов и тканей (табл. 2):

- хрусталика глаза;
- кожи;
- кистей и стоп.

Допустимые уровни (ДУ)

Для различных категорий установлены отличающиеся по величине допустимые уровни.

Для категории А и В:

- допустимое поступление ($ALI_{A,B}^{inhal}$) радионуклидов через органы дыхания;
- допустимая концентрация ($PC_{A,B}^{inhal}$) радионуклидов в воздухе рабочей зоны;

Таблица 2 – Пределы доз облучения, мЗв·год⁻¹

Пределы доз	Категория облучаемых лиц		
	А	Б	В
Д L_E (предел эффективной дозы)	20	2	1
Пределы эквивалентной дозы внешнего облучения	150	15	15
Д L_{lens} (для хрусталика глаза)			
Д L_{skin} (для кожи)	500	50	50
Д L_{extrim} (для кистей и стоп)	500	50	-

- допустимая плотность потока частиц ($PFP_{A,B}$);
- допустимая мощность дозы внешнего облучения ($PDR_{A,B}$);
- допустимое радиоактивное загрязнение ($DZ_{A,B}$) кожи, спецодежды и рабочих поверхностей.

Для категории В:

– допустимое поступление радионуклидов через органы дыхания (ALI_B^{inhal}) и пищеварения (ALI^{ingest});

– допустимые концентрации радионуклидов в воздухе (PC_B^{inhal}) и питьевой воде (PC^{ingest});

– допустимый сброс (ДС) и выброс (ДВ) радиоактивных веществ в окружающую среду.

Допустимые уровни ALI , PC , рассчитанные для одного радионуклида и одного пути поступления при референтных условиях облучения приведены в таблицах НРБУ-97 (Референтные условия облучения – совокупность параметров, величин и условий, характеризующих облучение человека). Эти значения являются радиационно-гигиеническими регламентами.

Каждую из данных величин можно рассчитать. При этом используются следующие параметры (референтные параметры):

– *референтный возраст* (РВ) – один из шести фиксированных возрастов, применяемый в системе нормирования облучения (таблица 3);

Таблица 3 – Референтный возраст

Референтный возраст	Начальный возраст	Конечный возраст
3 месяца	100 дней	12 месяцев
1 год	1 год	2 года
5 лет	2 года	7 лет
10 лет	7 лет	12 лет
15 лет	12 лет	17 лет
«Взрослый»	старше 17 лет	

– *референтный тип системного поступления* – один из стандартных типов физико-химических состояний веществ, классифицированных в соответствии с их скоростью проникновения из дыхательной системы в жидкости тела. Различают:

Тип *V* (Very fast) – вещества, отложившиеся в дыхательной системе, практически мгновенно переходят в жидкости тела;

Тип *F* (Fast) – отложившиеся вещества быстро переходят в жидкости тела;

Тип *M* (Moderate) – отложившиеся вещества имеют промежуточную скорость перехода в жидкости тела;

Тип *S* (Slow) – отложившиеся вещества плохо растворимы и медленно переходят в жидкости тела.

– *референтный класс отложения газов и пара* – класс паров или газов, классифицированных в соответствии с их растворимостью и реактивностью. Существуют:

Класс *SR-0* – нерастворимые и неактивные. Отложение в дыхательной системе пренебрежимо низкое;

Класс *SR-1* – растворимые и реактивные. Полное или частичное отложение в дыхательной системе с последующим пролонгированным переносом в жидкости тела;

Класс *SR-2* – высокой степени растворимые и реактивные. Полное отложение в дыхательной системе с практически мгновенным переносом в жидкости тела.

При расчетах принимается, что плотность частиц аэрозоля 3 г/см^3 .

Медианный по активности аэродинамический диаметр (АМАД) – это характеристика, учитывающая полидисперсность аэрозоля, инерционное и гравитационное отложение в органах дыхания.

Величины допустимых поступлений через органы дыхания ALI^{inhal} рассчитываются по формуле

$$ALI_{A,B}^{inhal} = \min \left(\frac{DL_E}{e_{k,d}} \right),$$

где DL_E – предел эффективной дозы категорий А и Б;

$e_{k,d}$ – доза на единицу ингаляционного поступления, рассчитанная для референтного возраста «Взрослый», референтного типа (класса) k медианного по активности аэродинамического диаметра (АМАД) d .

Для категории В населения ALI^{inhal} рассчитывается подобным образом, но в знаменателе стоит величина $e_{k,d,\tau}$ – доза на единицу ингаляционного поступления, рассчитанная для референтного типа (класса k , АМАД d и референтного возраста τ).

Величины допустимых концентраций в воздухе $PC_{A,B,V}^{inhal}$ рассчитываются по формулам

– для категорий А, Б

$$PC^{inhal} = \min \left(\frac{DL_E}{g_{k,d}} \right),$$

где DL_E – предел эффективной дозы категорий А или Б;

$g_{k,d}$ – доза на единицу концентрации в воздухе, рассчитанная для референтного возраста «Взрослый», референтного типа (класса) k и АМАД d ;

– для категории В

$$PC^{inhal} = \min \left(\frac{DL_E}{g_{k,d,\tau}} \right),$$

где $g_{k,d,\tau}$ – доза на единицу концентрации в воздухе, рассчитанная для референтного типа (класса) k , АМАД d и референтного возраста τ .

Величины допустимых поступлений через органы пищеварения ALI_B^{ingest} рассчитываются по формуле

$$ALI_B^{ingest} = \min \left(\frac{DL_E}{e_\tau} \right),$$

где e_τ – доза на единицу перорального поступления, рассчитанная для референтного возраста τ .

Величины допустимых концентраций в питьевой воде PC_B^{ingest} рассчитываются по формуле

$$PC_B^{ingest} = \min \left(\frac{DL_E}{g_\tau} \right),$$

где g_τ – доза на единицу концентрации в питьевой воде, рассчитанная для референтного возраста τ .

Значения e и g для всех допустимых уровней и категорий рассчитываются с учетом референтных параметров при помощи референтных процедур расчета, утвержденных Министерством здравоохранения Украины. Значения g_τ могут быть определены по графикам 1–9 Приложения.

При контроле величины годового поступления радионуклидов и дозы внешнего облучения предел дозы не будет превышен, если одновременно выполняются неравенства

$$\frac{E}{DL_E} + \sum_i \frac{I_i^{inhal}}{ALI_i^{inhal}} + \sum_i \frac{I_i^{ingest}}{ALI_i^{ingest}} \leq 1;$$

$$H_{lens} / DL_{lens} \leq 1;$$

$$H_{skin} / DL_{skin} \leq 1;$$

$$H_{extrim} / DL_{extrim} \leq 1,$$

где E – эффективная доза внешнего облучения;

DL_E – предел эффективной дозы для определенной категории;

$I_i^{inhal, ingest}$ – годовое ингаляционное или пероральное поступление i -го радионуклида;

$ALI_i^{inhal, ingest}$ – допустимое поступление через органы дыхания или пищеварения для i -го радионуклида и определенной категории;

$H_{lens, skin, extrim}$ – годовая эквивалентная доза внешнего облучения хрусталика глаза, кожи, кистей и стоп;

$DL_{lens, skin, extrim}$ – предел эквивалентной дозы внешнего облучения хрусталика глаза, кожи, кистей и стоп.

При контроле величины среднегодовой объемной концентрации радионуклидов в воздухе и питьевой воде, а также продуктах питания предел дозы не будет превышен, если выполняется неравенство

$$\frac{E}{DL_E} + \sum_i \frac{C_i^{inhal}}{PC_i^{inhal}} + \sum_i \frac{C_i^{ingest}}{PC_i^{ingest}} \leq 1,$$

где $C_i^{inhal, ingest}$ – среднегодовые объемные концентрации i -го радионуклида в воздухе и в воде;

$PC_i^{inhal, ingest}$ – допустимая концентрация i -го радионуклида в воздухе и в питьевой воде.

Допустимые уровни внутреннего облучения

Расчет предельно допустимого годового поступления радионуклидов

Предельно допустимое годовое поступление (ПДП) – это такое поступление радиоактивных веществ в организм в течение года, которое за 50 лет создает в критическом органе эквивалентную дозу, равную одной предельно допустимой дозе (ПДД). ПДД – это наибольшее значение индивидуальной эквивалентной дозы за год, которое при равномерном воздействии в течение 50 лет не вызовет в состоянии здоровья персонала неблагоприятных изменений. ПДП рассчитывается для категории А.

Для категории Б рассчитывают предел годового поступления (ПГП) – это такое поступление радиоактивных веществ в организм в течение года, которое за 70 лет создает в критическом органе эквивалентную дозу, равную одному пределу дозы (ПД). ПД – это предельная эквивалентная доза за год.

Для большинства изотопов ПДП рассчитывают на основании допущения, что выведение радиоактивных веществ из критических органов происходит по экспоненциальному закону

$$\text{ПДП} = \frac{\text{ДС}}{T_{\text{эф}} \cdot f_2 \left(1 - e^{-\frac{0,693 \cdot t}{T_{\text{эф}}}}\right)},$$

где ДС – это допустимое содержание радионуклида, Бк;

$T_{\text{эф}}$ – эффективный период полувыведения, сут;

t – время, сут;

ПДП измеряется в мкКи/год.

Обычно в критических органах равновесие между процессами накопления и выведения радионуклидов наступает достаточно быстро ($T_{\text{эф}}$ имеет малую величину), поэтому множитель $(1 - e^{-0,693t/T_{\text{эф}}})$ превращается в единицу. Отсюда, расчет ПДП можно проводить по сокращенной формуле

$$\text{ПДП} = \frac{\text{ДС}}{T_{\text{эф}} \cdot f_2}.$$

Исключением являются лишь 20 изотопов, у которых в течение 50 лет равновесия не наступает. Это ^{90}Sr , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{239}Pu и др.

Расчет допустимой концентрации радионуклидов

Допустимая концентрация (ДК) – это отношение ПДП радиоактивного вещества к объему воды или воздуха, с которыми оно поступает в организм человека в течение года. Годовой объем потребляемой воды 800 л, воздуха: для категории А – $2,5 \cdot 10^6$ л, для категории Б – $7,3 \cdot 10^6$ л.

ДК_А радионуклидов при их постоянном уровне содержания в воздухе находят по формуле

$$ДК_A = \frac{ПДП}{2,5 \cdot 10^6 \cdot 10^6 \cdot f_1}, \text{ Ки/л,}$$

где f_1 – коэффициент задержки радиоактивного вещества в легких;
 $2,5 \cdot 10^6$ – объем легочной вентиляции у профработников, л/год;
 10^6 – коэффициент перевода активности мкКи в Ки.

$$ДК_B = \frac{ПГП}{7,3 \cdot 10^6 \cdot 10^6 \cdot f_1}, \text{ Ки/л,}$$

где $7,3 \cdot 10^6$ – объем легочной вентиляции у лиц категории Б.

ДК некоторых радионуклидов представлены в таблице 4. ДК в воде всегда больше, чем в воздухе.

Таблица 4 – Допустимые концентрации радионуклидов в воде и воздухе

Радионуклид	ДК, Бк/л		Группа радиотоксичности
	Вода	Воздух рабочих помещений	
Тритий	11,1 10 ³	2 10 ²	4
Углерод-14	3,7 10 ³	1,5 10 ²	4
Натрий-24	3 10 ²	3,7	3
Фосфор-32	2 10 ²	2,6	3
Кобальт-60	3,7 10 ²	0,33	3
Селен-75	3 10 ³	3,7	3
Бром-82	3,7 10 ²	7,4	3
Стронций-90	11,1	0,11	2
Серебро-110	3,3 10 ²	0,37	2
Теллур-127	7,4 10 ²	1,5	3
Йод-131	22,2	0,33	3
Цезий-137	37	0,37	3
Барий -140	2,6 10 ²	1,5	3
Таллий-204	7,4 10 ²	1,11	3
Свинец-210	0,4	3,7 10 ⁻³	1
Полоний-210	7,4	7,4 10 ⁻³	1
Радий-226	0,15	11,1 10 ⁻⁴	1
Уран-238	7,4	25,9 10 ⁻⁴	2
Плутоний-239	37	14,8 10 ⁻⁴	1

Расчет допустимого содержания радионуклида в организме

Допустимое содержание (ДС) веществ в организме – это такое их количество, при котором создается доза на критический орган, не превышающая ПДД. ДС зависит от степени опасности радиоактивных элементов при попадании их внутрь и определяется их радиотоксичностью.

ДС находят на основании оценки допустимой поглощенной энергии (ПДЭ) в критическом органе, которая соответствует ПДД.

ПДЭ рассчитывают по уравнению

$$\text{ПДЭ} = \frac{\text{ПДД} \cdot 100 \cdot m}{Q \cdot 1,6 \cdot 10^{-6} \cdot t}, \text{ МэВ/с} \cdot \text{орган},$$

где m – масса критического органа, г;

t – рабочее время за год в с;

Q – коэффициент распределения для внутреннего облучения, равен для α и β – излучения – 5, γ – излучения – 1;

100 – поглощенная энергия, соответствующая единице рад в эрг/г;

$1,6 \cdot 10^{-6}$ – энергия, соответствующая 1МэВ в эрг.

Тогда расчет ДС проводят по уравнению

$$\text{ДС} = \frac{\text{ПДЭ}}{E_{\text{эф}} \cdot 3,7 \cdot 10^4}, \text{ мкКи/орган},$$

где $E_{\text{эф}}$ – эффективная энергия, МэВ/распад;

$3,7 \cdot 10^4$ – активность 1мкКи в распад/с.

Для остеотропных элементов ДС определяется по формуле

$$\text{ДС}_X = \frac{(\text{ДС} \cdot f_2 \cdot E_{\text{эф}})_{\text{Ra}}}{(f_2 \cdot E_{\text{эф}})_X},$$

где ДС_{Ra} равно 0,1 мкКи;

$f_{2\text{Ra}} = 0,99$;

X – остеотропный изотоп.

Расчет допустимых уровней внутреннего облучения для смеси радионуклидов

Если известен состав смеси радионуклидов, то ДС, ДК, ПДП можно рассчитать по формуле

$$\text{ПДП}_{\text{смеси}} = \frac{100}{\sum \frac{n_i}{\text{ПДП}_i}},$$

где ПДП_i – ПДП отдельного i – го радионуклида;

n_i – его относительное содержание в смеси в %.

Расчет ДК и мощности дозы радионуклидов благородных газов

Радиационные воздействия от присутствия в воздухе радионуклидов благородных газов (РБГ): аргона, криптона, ксенона, а также короткоживущих радионуклидов С, N и О определяется не внутренним облучением, а внешним β и γ – излучением из объема воздуха помещения.

ДК смеси РБГ рассчитывают по формуле

$$\text{ДК}_{\text{смеси}} = \frac{100}{\sum \frac{n_i}{\text{ДК}_i}},$$

где n_i – относительное содержание радионуклида в смеси, %;

$ДК_i$ – допустимая концентрация i –го радионуклида.

Для получения точного значения $ДК_{смеси}$ рассчитывают отдельно три значения $ДК$ для каждого из критических органов (кожи, подкожных тканей и гонад), истинным значением $ДК_{смеси}$ считают наименьшее.

Мощность дозы (P), создаваемая РБГ в критических органах за счет за счет внешнего γ и β – излучения из воздуха помещений различного объема и на открытой местности, может быть рассчитана по формуле

$$P = P_{\beta} + P_{\gamma} = \sum P_{\beta i} \cdot n_i \cdot C_i + \sum P_{\gamma i} \cdot C_i \cdot n_i, \text{ рад/с,}$$

где n_i – относительное содержание в смеси i – го радионуклида;

C_i – его концентрация;

$P_{\beta i}$ и $P_{\gamma i}$ – мощность дозы β и γ – излучения, создаваемая i – м радионуклидом при его концентрации 1 Ки/л, рад·л/с·Ки.

Поглощенная тканевая доза

Исходя из энергии источника ионизирующего излучения (радионуклида), его активности и ряда других параметров, можно рассчитать мощность дозы β -излучения и поглощенные тканевые дозы β и γ -излучений.

Чтобы рассчитать мощность дозы, создаваемую β - излучателем в ткани, необходимо знать концентрацию активности в ткани и энергию частиц. В случае β -излучателей при расчете тканевых доз используется средняя энергия частиц, равная 1/3 максимальной энергии.

Мощность дозы определяется как энергия, поглощенная в 1г ткани в единицу времени. Единица $Д_{погл.}$ – 1 рад.

Мощность дозы β -излучения равна

$$P_{\beta} = 3,7 \cdot 10^4 \cdot C \cdot 1,6 \cdot 10^{-6} \cdot \bar{E} \cdot 10^{-2} = 5,92 \cdot 10^{-4} \cdot E \cdot C, \text{ рад/с,}$$

где $3,7 \cdot 10^4$ – число распадов в секунду на 1 мКи;

C – концентрация активности, мКи/г;

\bar{E} – средняя энергия β -частиц на распад, МэВ;

1 МэВ = $1,6 \cdot 10^{-6}$ эрг;

10^{-2} рад = 1 эрг/г.

Если $[C] = \text{мКи}$, то уравнение принимает вид

$$P_{\beta} = 0,592 \cdot \bar{E} \cdot C .$$

Доза определяется по уравнению

$$Д_{\beta} = \int_0^t P_{\beta} \cdot dt .$$

Если начальная активность изотопа, попавшего в организм C_0 , то по прошествии времени t

$$C = C_0 \cdot e^{-\lambda_{эфф}t} = C_0 \cdot e^{-\frac{0,693 \cdot t}{T_{эфф}}} , \text{ мКи/г.}$$

Тогда

$$\begin{aligned}
 D_{\beta} &= 0,592 \cdot \bar{E} \cdot C = 0,592 \cdot \bar{E} \cdot \int_0^t C_0 \cdot e^{-\frac{0,693 \cdot t}{T_{\text{эфф}}}} \cdot dt = \\
 &= 0,592 \cdot \bar{E} \cdot C_0 \frac{T_{\text{эфф}}}{0,693} \left(1 - e^{-\frac{0,693 \cdot t}{T_{\text{эфф}}}} \right) = \\
 &= 0,854 \cdot \bar{E} \cdot C_0 \cdot T_{\text{эфф}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{0,693 \cdot t}{T_{\text{эфф}}}} \right).
 \end{aligned}$$

$$[T_{\text{эфф}}] = C.$$

Если $[T_{\text{эфф}}] = \text{сут}$, то

$$D_{\beta} = 7,39 \cdot 10^4 \cdot \bar{E} \cdot C_0 \cdot T_{\text{эфф}} \left(1 - e^{-\frac{0,693 \cdot t}{T_{\text{эфф}}}} \right).$$

Если t велико, то

$$D_{\beta} = 7,39 \cdot 10^4 \cdot \bar{E} \cdot C_0 \cdot T_{\text{эфф}}, \text{ рад.}$$

Доза, создаваемая β -излучателем в критическом органе, после заглатывания 1 мКи изотопа определяется соотношением

$$D_{\beta} = \frac{7,39 \cdot 10^4 \cdot \bar{E} \cdot C_0 \cdot T_{\text{эфф}} \cdot f}{m} \text{ рад,}$$

где m – масса органа, г;

f – доля изотопа, достигающая критического органа.

Поглощенная тканевая доза от инкорпорированного γ -излучателя рассчитывается по формуле

$$D_{\gamma} = \frac{\tau \cdot K_{\gamma} \cdot g \cdot 97}{100 \cdot m},$$

где τ – средняя продолжительность жизни, ч

$$\tau = \frac{T_{\text{эфф}}}{0,693} = \frac{1}{\lambda_{\text{эфф}}};$$

K_{γ} – гамма постоянная;

m – масса, г;

100 – переходной коэффициент для выражения поглощенной дозы в радах (1 рад = 100 эрг);

97 – поглощенная доза в эрг при поглощении 1 Р в 1 г ткани;

g – геометрический фактор (для туловища человека $g \approx 200$).

Введение понятия геометрического фактора вызвано следующим. Вследствие большой проникающей способности γ -квантов при расчете дозы внутреннего облучения возникают определенные математические трудности. Для упро-

щения расчетов все органы представляют в виде простых геометрических тел: сферы, цилиндра. Рассчитаны числовые значения g для центров сферы и цилиндра в зависимости от их радиуса и высоты цилиндра при $\mu = 0,03 \text{ см}^{-1}$ (биологическая ткань) и для человеческого тела. Средний геометрический фактор для всего сферического объема: $\bar{g} = 3\pi \cdot R_{\text{сф}}$, если $R_{\text{сф}} < 10 \text{ см}$.

Примеры решения задач

1. Расчитайте величину предела эффективной дозы для категории В при ингаляционном поступлении ^{90}Sr (референтный тип S) в организм взрослого человека в виде аэрозоля с медианным по активности аэродинамическим диаметром 0,1 мкм.

Дано:

^{90}Sr

АМАД=0,1 мкм

тип S

$PC^{inhal} = 2 \cdot 10^{-1} \text{ Бк/м}^3$

(Табл. 1 Приложения)

референтный возраст

«Взрослый»

Найти: DL_E

Отсюда

Решение:

Для категории В (населения) величины допустимых концентраций в воздухе PC^{inhal} рассчитываются по формуле

$$PC^{inhal} = \min\left(\frac{DL_E}{g_\tau}\right).$$

Значение PC^{inhal} взято из таблицы 1 Приложения и введено в «Дано».

$$DL_E = PC^{inhal} \cdot g_\tau.$$

Величина дозы на единицу концентрации в воздухе, рассчитанная для референтного типа S, АМАД = 0,1 мкм и референтного возраста «Взрослый», определяется по рис.3 Приложения. g_τ равен $3 \cdot 10^{-3} \text{ Зв м}^3/\text{год Бк}$.

Тогда $DL_E = 0,2 \cdot 0,003 = 6 \cdot 10^{-4} \text{ Зв/год}$.

Ответ: $6 \cdot 10^{-4} \text{ Зв/год}$.

2. Определите уточненное значение допустимой концентрации ^{137}Cs в воздухе в виде аэрозоля с медианным по активности аэродинамическим диаметром 5 мкм референтного типа F при его поступлении в организм человека возрастом до 15 лет. Предельная эффективная доза составляет $4,5 \cdot 10^{-6} \text{ Зв/год}$.

Дано:

^{137}Cs

АМАД = 5 мкм

тип F

$DL_E = 4,5 \cdot 10^{-6} \text{ Зв/год}$

Референтный возраст «15 лет»

Найти : PC^{inhal}

Решение: Величину PC^{inhal} рассчитываем по уравнению

$$PC^{inhal} = \min\left(\frac{DL_E}{q_\tau}\right).$$

Значение q_τ определяем по рис. 4 Приложения для аэрозоля референтного типа F, возраста 15 лет и АМАД = 5 мкм. Ось OX (АМАД) всех рисунков Приложения является логарифмической, чтобы найти величину АМАД = 5 мкм, надо определить логарифм АМАД: $\lg 5 = 0,7$.

Находим значение $\lg \text{АМАД} = 0,7$ между 0 ($\lg 1$) и 1 ($\lg 10$). От этой точки восстанавливаем перпендикуляр до пересечения с кривой (возраст 15 лет) и опускаем перпендикуляр на ось ОУ (q_t). Значение q_t равно $5 \cdot 10^{-6} \text{ Зв} \cdot \text{м}^3/\text{год} \cdot \text{Бк}$.

Отсюда
$$PC^{inhal} = \frac{4,5 \cdot 10^{-6}}{5 \cdot 10^{-6}} = 0,9 \text{ Бк}/\text{м}^3.$$

Ответ: $0,9 \text{ Бк}/\text{м}^3$.

3. Определите медианный по активности аэродинамический диаметр аэрозоля ^{239}Pu референтного типа М при его поступлении в организм пятилетнего ребенка. Величина предельной эффективной дозы составляет $3,2 \cdot 10^{-4} \text{ Зв}/\text{год}$.

Дано:
 ^{239}Pu
 $DL_E = 3,2 \cdot 10^{-4} \text{ Зв}/\text{год}$
 $PC^{inhal} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ Бк}/\text{м}^3$
(табл.1 Приложения) референтный возраст «5 лет»

Найти: АМАД

Решение:

Определим величину дозы на единицу концентрации в воздухе

$$q_t = \frac{DL_E}{PC^{inhal}} = \frac{3,2 \cdot 10^{-4}}{4 \cdot 10^{-4}} = 0,8$$

$\text{Зв} \cdot \text{м}^3/\text{год} \cdot \text{Бк}$.

Используя рис. 8 Приложения, определим АМАД аэрозоля ^{239}Pu (тип М) при его поступлении в организм ребенка возрастом «5 лет». По графической зависимости $q_t - \lg \text{АМАД}$ получаем значение $\lg \text{АМАД} = -1,5$ или $\text{АМАД} = 10^{-1,5} = 0,03 \text{ мкм}$.

Ответ: $0,03 \text{ мкм}$.

4. Рассчитайте предельно допустимое годовое поступление (ПДП) ^{235}U в почки человека.

Дано:
 ^{235}U
орган – почки человека
 $ДС_A = 37 \text{ Бк}$
 $T_{эф} = 15 \text{ сут}$
 $f_2 = 0,065$

Найти: ПДП

Решение:

Расчет ПДП проводится по формуле

$$ПДП = \frac{ДС}{T_{эф} \cdot f \left(1 - e^{\frac{-0,693t}{T_{эф}}} \right)},$$

Однако $T_{эф}$ выведения ^{235}U из почек человека мал (15 сут),

поэтому формула преобразуется до $ПДП = \frac{ДС}{T_{эф} \cdot f_2}$.

Значения $ДС$, f_2 и $T_{эф}$ взяты из таблицы 2 Приложения «Биологические и физические константы некоторых радионуклидов» и введены в «Дано».

Расчет ПДП

$$ПДП = \frac{37}{15 \cdot 0,065} = 37,95 \text{ Бк}/\text{сут}.$$

Общепринятой единицей измерения ПДП является $\text{мкКи}/\text{год}^{-1}$, пересчитаем ПДП в данную единицу

$$ПДП = \frac{37,95 \cdot 365 \cdot 10^6}{3,7 \cdot 10^{10}} = 0,37 \text{ мкКи}/\text{год}.$$

5. Определите предельно допустимое годовое поступление ^{131}I в критический орган.

Дано: ^{131}I

Щитовидная железа

$$ДС_A = 2,59 \cdot 10^3 \text{ Бк}$$

$$T_{\text{эф}} = 7,6 \text{ сут}$$

$$f_2 = 0,2$$

(табл. 2 Приложения)

Найти: ПДП

Решение: Критическим органом для ^{131}I в организме человека является щитовидная железа, что определяется по максимальной величине доли нуклида, попадающей в рассматриваемый орган (f_2) (табл. 2 Приложения).

В подобных случаях исключают значение $f_2 = 1$ для всего тела, так как для всего организма f_2 органов суммируются.

Расчет ПДП проводят по упрощенной формуле, так как значение $T_{\text{эф}}$ мало

$$\text{ПДП} = \frac{ДС}{f_2 \cdot T_{\text{эф}}} = \frac{2,59 \cdot 10^3}{0,2 \cdot 7,6} = 1703,95 \text{ Бк/сут.}$$

Проведем пересчет ПДП в единицы измерения мкКи/год

$$\text{ПДП} = \frac{1703,95 \cdot 365 \cdot 10^6}{3,7 \cdot 10^{10}} = 16,8 \text{ мкКи/год.}$$

Ответ: 16,8 мкКи/год.

6. Рассчитайте предельно допустимое годовое поступление (ПДП) радионуклидов ^{60}Co и ^{95}Zr в тело человека при их активностях 1,8% и 16,5% соответственно.

Дано: все тело

$$ДС_{A \text{ Co}} = 4,81 \cdot 10^3 \text{ Бк}$$

$$ДС_{A \text{ Zr}} = 6,66 \cdot 10^3 \text{ Бк}$$

$$T_{\text{эф.Co}} = 9,5 \text{ сут}$$

$$T_{\text{эф.Zr}} = 55,5 \text{ сут}$$

(табл. 2 Приложения)

$$f_{2\text{Co}} = f_{2\text{Zr}} = 1$$

$$n_{\text{Co}} = 1,8 \%$$

$$n_{\text{Zr}} = 16,5 \%$$

Найти: ПДП_{смеси}

Решение: ПДП_{смеси} радионуклидов рассчитывается по формуле

$$\text{ПДП}_{\text{смеси}} = \frac{100}{\sum \frac{n_i}{\text{ПДП}_i}} = \frac{100}{\frac{n_{\text{Co}}}{\text{ПДП}_{\text{Co}}} + \frac{n_{\text{Zr}}}{\text{ПДП}_{\text{Zr}}}}$$

Для расчета ПДП_{смеси} первоначально необходимо рассчитать ПДП отдельных радионуклидов.

$$\text{ПДП}_{\text{Co}} = \frac{4,81 \cdot 10^3}{9,5 \cdot 1} = 506,32 \text{ Бк/сут.}$$

$$\text{ПДП}_{\text{Zr}} = \frac{6,66 \cdot 10^3}{55,5 \cdot 1} = 120 \text{ Бк/сут.}$$

$$\text{Отсюда ПДП}_{\text{смеси}} = \frac{100}{\frac{1,8}{506,32} + \frac{16,5}{120}} = 708,8 \text{ Бк/сут} = \frac{708,8 \cdot 365}{3,7 \cdot 10^4} = 6,99 \text{ мкКи/год.}$$

Ответ: 6,99 мкКи/год.

7. Рассчитайте допустимую концентрацию радионуклида ^{90}Sr в критическом органе, если доля нуклида, удерживаемая легкими равна 0,01.

Дано: ^{90}Sr
 $\text{ДС}_A = 7,4 \cdot 10^4$ Бк
 $f_2 = 0,99$
 $f_1 = 0,01$
 $T_{\text{эф}} = 6,4 \cdot 10^3$ сут
 (табл. 2 Приложения)

Решение: Расчет ДК_A проводят по формуле

$$\text{ДК}_A = \frac{\text{ПДП}}{2,5 \cdot 10^6 \cdot 10^6 \cdot f_1},$$

поэтому первоначально рассчитаем ПДП для критического органа – костной ткани: $f_2 = 0,99$ (табл. 2 Приложения)

Найти: ДК_A

$$\text{ПДП} = \frac{\text{ДС}}{f_2 \cdot T_{\text{эф}}} = \frac{7,4 \cdot 10^4}{0,99 \cdot 6,4 \cdot 10^3} = 11,68 \text{ Бк/сут} = 0,12 \text{ мкКи/год.}$$

$$\text{Отсюда } \text{ДК}_A = \frac{0,12}{2,5 \cdot 10^{12} \cdot 0,01} = 0,048 \cdot 10^{-10} = 4,8 \cdot 10^{-12} \text{ Ки/л.}$$

Ответ: $4,8 \cdot 10^{-12}$ Ки/л.

8. В костной ткани человека произошло накопление радионуклида ^{226}Ra с одновременным поглощением 0,8 Дж энергии. Рассчитайте эквивалентную дозу для ткани.

Дано:
 $E = 0,8$ Дж
 $m_{\text{костн}} = 5000$ г
 $Q = 5$

Решение: Для расчета $\text{Д}_{\text{экв}}$ необходимо знать $\text{Д}_{\text{погл}}$. Ее рассчитывают по уравнению

$$\text{Д}_{\text{погл}} = \frac{E}{m},$$

Найти: $\text{Д}_{\text{экв}}$

где m – это масса органа, поглощающего излучение, в рассматриваемом случае – костной ткани берем из Табл. 3 Приложения «Массы органов условного человека»: $m = 5000$ г = 5 кг;

E – энергия ионизирующего излучения.

$$\text{Отсюда } \text{Д}_{\text{погл}} = \frac{0,8}{5} = 0,16 \text{ Гр.}$$

Расчет $\text{Д}_{\text{экв}}$ проводят по формуле

$$\text{Д}_{\text{экв}} = Q \cdot \text{Д}_{\text{погл}},$$

где Q – коэффициент распределения излучения (для внутреннего облучения), который для α - и β -излучений равен 5, а γ -излучений – 1. Так как ^{226}Ra – α – излучатель, то $Q = 5$. Отсюда

$$\text{Д}_{\text{экв.}} = 5 \cdot 0,16 = 0,8 \text{ Зв.}$$

Ответ: 0,8 Зв.

9. Накопление радионуклида ^{210}Po в критическом органе привело к выделению суммарной энергии $6 \cdot 10^5$ эрг. Рассчитайте эквивалентную дозу для ткани данного органа.

Дано:

$$E = 6 \cdot 10^5 \text{ эрг}$$

$$m_{\text{почки}} = 310 \text{ г}$$

(табл. 3 Приложения)

$$Q=5 \text{ (}\alpha\text{-излучатель)}$$

Найти: $D_{\text{экв}}$

Решение: Критическим органом для ^{210}Po являются почки: $f_2 = 1,13$ (табл. 2 Приложения).

Для расчета $D_{\text{экв}}$ необходимо знать $D_{\text{погл}}$. Поглощенную дозу можно рассчитать в Гр и рад, в зависимости от того в каких единицах будет энергия излучения E . Если E берут в Дж, то надо помнить, что $1 \text{ Дж} = 10^7 \text{ эрг}$ (система СГС), тогда

$$D_{\text{погл}} = \frac{E}{m} = \frac{6 \cdot 10^5 \cdot 10^{-7} \text{ (Дж)}}{310 \cdot 10^{-3} \text{ (кг)}} = 0,19 \text{ Гр.}$$

$$\text{Отсюда } D_{\text{экв}} = Q \cdot D_{\text{погл}} = 5 \cdot 0,19 = 0,95 \text{ Зв.}$$

Если E берут в эрг, то надо помнить, что единица измерения $D_{\text{погл}}$ рад соответствует поглощению 100 эрг излучения одним граммом вещества.

Тогда
$$D_{\text{погл}} = \frac{6 \cdot 10^5}{310 \cdot 10^2} = 19 \text{ рад.}$$

Отсюда
$$D_{\text{экв}} = 5 \cdot 19 = 95 \text{ бэр.}$$

Ответ: 0,95 Зв или 95 бэр.

10. Рассчитайте допустимое содержание радионуклида ^{90}Sr с $E_{\text{эф}\beta} = 1,46$ МэВ/распад и $\text{ПДД}_{\text{костн}} = 3,45 \cdot 10^{-7}$ бэр при условии продолжительности работы 10 ч/неделя.

Дано:

^{90}Sr

$$\text{ПДД} = 3,45 \cdot 10^{-7} \text{ бэр}$$

$$E_{\text{эф}\beta} = 1,46 \text{ МэВ/распад}$$

$$t = 10 \text{ ч/неделя}$$

$$Q = 5 \text{ (}\beta^- \text{ – излучатель)}$$

$$m = 5000 \text{ г}$$

(табл.3 Приложения)

Решение: Расчет допустимого содержания ДС проводят по формуле

$$ДС = \frac{\text{ПДЭ}}{3,7 \cdot 10^4 \cdot E_{\text{эф}}},$$

где предельная допустимая энергия ПДЭ рассчитывается по соотношению

$$\text{ПДЭ} = \frac{100 \cdot \text{ПДД} \cdot m}{1,6 \cdot 10^{-6} \cdot Q \cdot t},$$

Найти: ДС

где m – масса критического органа или ткани. В нашем случае это масса костной ткани 5000 г (табл. 3 Приложения), что мы определили по значению $f_2 = 0,99$ (табл. 2 Приложения);

t – рабочее время за год, выраженное в секундах

$$t = 10 \cdot 50 \cdot 3600 = 1,8 \cdot 10^6 \text{ с/год.}$$

При расчете учтено, что в году 50 рабочих недель, а в часе 3600 секунд.
Отсюда

$$\text{ПДЭ} = \frac{100 \cdot 3,45 \cdot 10^{-7} \cdot 5000}{1,6 \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot 1,8 \cdot 10^6} = \frac{3,45 \cdot 5 \cdot 10^{-2}}{1,6 \cdot 5 \cdot 1,8} = 1,2 \cdot 10^{-2} \text{ МэВ/с орган};$$

$$\text{ДС} = \frac{1,2 \cdot 10^{-2}}{3,7 \cdot 10^4 \cdot 1,46} = 2,22 \cdot 10^{-7} \text{ мкКи/орган}.$$

Ответ: $2,2 \cdot 10^{-7}$ мкКи/орган.

11. Рассчитайте допустимое содержание β^- , γ -активного радионуклида ^{131}I со значениями эффективных энергий излучений: β^- – 0,61 МэВ/распад; γ – 0,36 МэВ/распад, при условии 4- часового рабочего дня с использованием данного радионуклида. ПДД йода- 131 для критического органа $1,38 \cdot 10^{-4}$ бэр.

Дано: ^{131}I

ПДД= $1,38 \cdot 10^{-4}$ бэр

$E_{\text{эф}\beta^-}$ =0,61 МэВ/распад

$E_{\text{эф}\gamma}$ =0,36 МэВ/распад

t =4 ч/сут

Q =5 (β^- – излучатель)

$m_{\text{щитовидной железы}}$ =20 г

(табл.3 Приложения)

Найти: ДС

Решение: Рассчитаем предельную допустимую энергию ПДЭ по формуле

$$\text{ПДЭ} = \frac{100 \cdot \text{ПДД} \cdot m}{1,6 \cdot 10^{-6} \cdot Q \cdot t},$$

где m – масса критического органа, для ^{131}I масса щитовидной железы ($f_2=0,2$ – табл.2 Приложения) равна 20 г (табл. 3 Приложения);

Q – коэффициент распределения.

В случае смешанного излучения значения Q_i перемножаются:

$$Q = Q_{\beta^-} \cdot Q_{\gamma} = 5 \cdot 1 = 5;$$

t – рабочее время в с за год: $t=4 \cdot 5 \cdot 50 \cdot 3600=3,6 \cdot 10^6$ с/год.

$$\text{Отсюда ПДЭ} = \frac{1,38 \cdot 10^{-4} \cdot 100 \cdot 20}{1,6 \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot 3,6 \cdot 10^6} = \frac{1,38 \cdot 2 \cdot 10^{-1}}{1,6 \cdot 5 \cdot 3,6} = 9,58 \cdot 10^{-3} \text{ МэВ/с орган}.$$

Расчет ДС

$$\begin{aligned} \text{ДС} &= \frac{\text{ПДЭ}}{3,7 \cdot 10^4 \cdot E_{\text{эф}}} = \frac{\text{ПДЭ}}{3,7 \cdot 10^4 (E_{\text{эф}\beta^-} + E_{\text{эф}\gamma})} = \\ &= \frac{9,58 \cdot 10^{-3}}{3,7 \cdot 10^4 (0,61 + 0,36)} = 2,67 \cdot 10^{-7} \text{ мкКи/орган}. \end{aligned}$$

Ответ: $2,7 \cdot 10^{-7}$ мкКи/орган.

12. Рассчитайте допустимую концентрацию смеси радионуклидов ^{135}Xe и ^{137}Xe , из которых первый дает 20 % в общую активность, для категории А облучаемых в помещении объемом 250 м^3 .

Дано:
 Категория А
 $V_{\text{пом.}} = 250 \text{ м}^3$
 $N_{\text{Xe-135}} = 20 \%$
 $n_{\text{Xe-137}} = 80 \%$

Найти: ДК_{смеси}

Решение: Истинное значение ДК_{смеси} радионуклидов будет равно наименьшему значению из трех рассчитанных значений: для кожи, подкожных тканей и гонад. Значения ДК отдельных радионуклидов для указанных тканей представлены в табл. 4 Приложения «Допустимая концентрация ДК радионуклидов РБГ, содержащихся в воздухе рабочих помещений и на открытой местности».

Расчет ДК проводят по формуле

$$\text{ДК} = \frac{100}{\sum_i \frac{n}{\text{ДК}_i}}$$

$$\begin{aligned} \text{ДК}_{\text{кожи}} &= \frac{100}{\frac{20}{7,6 \cdot 10^{-8}} + \frac{80}{2,1 \cdot 10^{-8}}} = \frac{100}{2,63 \cdot 10^8 + 38,1 \cdot 10^8} = \\ &= \frac{100}{(2,63 + 38,1) \cdot 10^8} = \frac{10^{-6}}{40,73} = 2,46 \cdot 10^{-8} \text{ Ки/л}; \end{aligned}$$

$$\text{Отсюда} \quad \text{ДК}_{\text{подкожн}} = \frac{100}{\frac{20}{2,8 \cdot 10^{-7}} + \frac{80}{1,5 \cdot 10^{-8}}} = 1,85 \cdot 10^{-10} \text{ Ки/л};$$

$$\text{ДК}_{\text{гонад}} = \frac{100}{\frac{20}{6,8 \cdot 10^{-7}} + \frac{80}{8,7 \cdot 10^{-7}}} = 8,24 \cdot 10^{-9} \text{ Ки/л};$$

Наименьшим значением является ДК_{подкожных тканей}, следовательно
 $\text{ДК}_{\text{смеси}} = 1,85 \cdot 10^{-10} \text{ Ки/л}$.

Ответ: $1,85 \cdot 10^{-10} \text{ Ки/л}$.

13. Рассчитайте мощность дозы β - и γ -излучений при облучении подкожных тканей человека РБГ, состоящей из 4 % ^{88}Kr 12 % ^{89}Kr при их концентрациях, Ки/л: ^{88}Kr - 0,6; ^{89}Kr - 1,3; на открытой местности.

Дано:
 Открытая местность
 $N_{\text{Кр-88}}=4\% (0,04)$
 $N_{\text{Кр-89}}=12\% (0,12)$
 $C_{\text{Кр-88}}=0,6 \text{ Ки/л}$
 $C_{\text{Кр-89}}=1,3 \text{ Ки/л}$

Решение: Расчет мощности дозы излучения от РБГ проводится по формуле

$$P = \sum_i P_i \cdot C_i \cdot N_i,$$

где C_i -концентрация i -го радионуклида в смеси;

N_i – его доля в смеси;

P_i – мощность дозы, создаваемая в отдельных органах РБГ. Значения $P_{\beta i}$ и $P_{\gamma i}$ берутся из табл. 5 Приложения «Мощность дозы, создаваемая в критических органах человека...»

Найти: P_{β}, P_{γ}

Отсюда

$$P_{\beta} = P_{\beta\text{Кр-88}} \cdot C_{\text{Кр-88}} \cdot N_{\text{Кр-88}} + P_{\beta\text{Кр-89}} \cdot C_{\text{Кр-89}} \cdot N_{\text{Кр-89}} =$$

$$= 38 \cdot 0,6 \cdot 0,04 + 158 \cdot 1,3 \cdot 0,12 = 0,912 + 24,648 = 25,56 \text{ рад/с};$$

$$P_{\gamma} = P_{\gamma\text{Кр-88}} \cdot C_{\text{Кр-88}} \cdot N_{\text{Кр-88}} + P_{\gamma\text{Кр-89}} \cdot C_{\text{Кр-89}} \cdot N_{\text{Кр-89}} =$$

$$501 \cdot 0,6 \cdot 0,04 + 414 \cdot 1,3 \cdot 0,12 = 12,024 + 64,584 = 76,6 \text{ рад/с}$$

Суммарная мощность дозы равна

$$(P_{\beta} + P_{\gamma}) = 25,56 + 76,6 = 102,16 \text{ рад/с},$$

при этом мощность дозы γ -излучения превышает мощность дозы β -излучения

$$\frac{P_{\gamma}}{P_{\beta}} = \frac{76,6}{25,56} = 3.$$

Ответ: $P_{\beta}=25,56 \text{ рад/с}; P_{\gamma}=76,6 \text{ рад/с}$.

14. Человеку ростом 160 см и весом 60 кг ввели 0,06 мКи радионуклида ^{90}Y со средней энергией β -излучения 2,28 МэВ. Определите суммарную тканевую дозу β и γ -излучений и соотношение этих доз.

Дано:
 $h = 160 \text{ см}$
 $m = 60 \text{ кг}$
 $C_0 = 0,06 \text{ мКи}$
 $E_{\beta} = 2,28 \text{ МэВ}$
 $f_2 = 1$ (все тело)
 $T_{\text{эф}} = 2,68 \text{ сут}$
 (Табл. 2 Приложения)
 $q = 122$
 $K_{\gamma} = 0,019 \text{ Р}\cdot\text{см}^2/\text{мКи}\cdot\text{ч}$

Решение: Расчет D_{β} проводится по формуле

$$D_{\beta} = \frac{7,39 \cdot 10^4 \cdot C_0 \cdot E \cdot T_{\text{эф}} \cdot f_2}{m} =$$

$$= \frac{7,39 \cdot 10^4 \cdot 0,06 \cdot 2,28 \cdot 2,68 \cdot 1}{60000} = 0,45 \text{ рад}$$

Расчет D_{γ} проводится по формуле

Найти: $\frac{D_{\beta}}{D_{\gamma}}; (D_{\beta} + D_{\gamma})$

$$D_{\gamma} = \frac{K_{\gamma} \cdot \tau \cdot q \cdot 97}{100 \cdot m},$$

где K_{γ} – полная гамма постоянная ^{90}Y равная $0,019 \text{ Р}\cdot\text{см}^2/\text{мКи}\cdot\text{ч}$ (взята из Табл. 6 Приложения «Полные γ -постоянные радионуклидов»);

q – геометрический фактор для радионуклида, распределенного в теле человека: при $h=160 \text{ см}$ и $m=60 \text{ кг}$ $q=122$ (взяты из табл. 7 Приложения «Средний геометрический фактор для γ -активного радионуклида, равномерно распределенного в теле человека»);

τ – средняя продолжительность жизни радионуклида, ч. τ определяется по величине эффективного периода полувыведения $T_{\text{эф}}$ по формуле

$$\tau = \frac{T_{\text{эф}}}{0,693} = \frac{2,68 \cdot 24}{0,693} = 92,8 \text{ ч.}$$

Отсюда
$$D_{\gamma} = \frac{0,019 \cdot 92,8 \cdot 122 \cdot 97}{100 \cdot 60000} = 3,48 \cdot 10^{-3} \text{ рад.}$$

Тогда
$$\frac{D_{\beta}}{D_{\gamma}} = \frac{0,45}{3,48 \cdot 10^{-3}} = 129,3;$$

Суммарная тканевая доза равна

$$(D_{\beta} + D_{\gamma}) = 0,45 + 3,48 \cdot 10^{-3} = 0,45 + 0,00348 = 0,4535 \text{ рад.}$$

Ответ: 129; 0,4535 рад.

Задания для самоконтроля

1. Рассчитайте величину предела эффективной дозы категории В при ингаляционном пути поступления ^{137}Cs (референтный тип М) в организм человека в виде аэрозоля с медианным по активности аэродинамическим диаметром $0,1 \text{ мкм}$. Ответ: $1,2 \cdot 10^{-4} \text{ Зв/год}$.

2. Определите уточненное значение допустимой концентрации ^{239}Pu в воздухе в виде аэрозоля с медианным по активности аэродинамическим диаметром $0,01 \text{ мкм}$ референтного типа S при его поступлении в организм человека возрастом 10 лет. Предельная эффективная доза составляет $1,8 \cdot 10^{-4} \text{ Зв/год}$. (Ответ: $3,75 \cdot 10^{-4} \text{ Бк/м}^3$).

3. Определите предельно допустимое годовое поступление ^{144}Ce в критический орган. Ответ: $6,72 \text{ мКи/год}$.

4. Рассчитайте предельно допустимое годовое поступление смеси радионуклидов ^{90}Sr и ^{144}Ce в костях человека при активностях соответственно 4 % и 2,8 %. Ответ: $2,87 \text{ мКи/год}$.

5. Рассчитайте допустимую концентрацию изотопов ^{60}Co в теле человека, если $f_1 = 0,08$. Ответ: $2,5 \cdot 10^{-11} \text{ Ки/л}$.

6. В щитовидной железе человека произошло накопление ^{131}I с одновременным поглощением 800 эрг энергии. Рассчитайте $D_{\text{экв}}$ для данного органа. Ответ: $0,02 \text{ Зв}$.

7. Определите допустимое содержание радионуклида ^{95}Zr с $E_{\text{эф}\beta^-} = 1,55$ МэВ и ПДД = $2,36 \cdot 10^{-9}$ бэр при условии продолжительности работы 18 час/нед. Ответ: $7,93 \cdot 10^{-10}$ мкКи/орган.

8. Рассчитайте допустимую концентрацию смеси радионуклидов ^{85}Kr и ^{135}Xe , из которых первый дает 20 % в общую активность при облучении лиц категории А в помещении объемом 250 м^3 . Ответ: $8 \cdot 10^{-8}$ Ки/л.

9. Рассчитайте мощность дозы β^- и γ -излучения при облучении на открытой местности кожи человека смесью РБГ, состоящей из 0,8 % ^{88}Kr и 3,6 % ^{89}Kr при их концентрации (Ки/л) соответственно: 6,2 и 8,5. Ответ: 228,2 рад/с.

10. Человеку весом 69 кг и ростом 170 см ввели 0,46 мКи изотопа ^{131}I со средней энергией β^- -излучения 0,61 МэВ/распад. Вычислите суммарную дозу β^- и γ -облучения. Ответ: 3,73 рад.

Тема 7. ВЫВЕДЕНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ ИЗ ОРГАНИЗМА

Теоретическая часть

Наибольшее количество радионуклидов выделяется через ЖКТ, особенно элементы, которые плохо всасываются в пищеварительном тракте: трансурановые элементы, лантаноиды.

Растворимые соединения радионуклидов, а также ^3H , ^{137}Cs хорошо выделяются через почки в первые сутки. Отметим, что почки – основной путь выделения радионуклидов.

Радиоактивные газы (^3H , ^{222}Rn , ^{133}Xe , ^{85}Kr), радиоактивные аэрозоли и продукты распада Rn, Ra, Th выделяются через легкие и кожу.

Длительно задерживаются в органах и тканях изотопы элементов с большой атомной массой, а также радионуклиды, находящиеся в организме в коллоидном состоянии (^{210}Po , ^{226}Ra , ^{238}U) и редкоземельные элементы.

Уменьшение содержания радионуклида в организме может происходить не только вследствие его выведения, но и благодаря радиоактивному распаду, что особенно характерно для короткоживущих радионуклидов ^{131}I , ^{24}Na , ^{32}P и других. Важно помнить, что биологическое выведение и распад – это два независимых процесса, которые, следовательно, имеют и разные количественные характеристики. Время, в течение которого из организма выделяется половина однократно поступившего радионуклида, называют *биологическим периодом полувыведения* – T_6 . Фактическая же убыль радионуклида в организме измеряется *эффективным периодом полувыведения* – $T_{\text{эф}}$ – это время, в течение которого организм освобождается от половины депонированного в нем вещества, как путем биологического выведения, так и вследствие распада.

Два этих периода связаны друг с другом следующей формулой

$$T_{\text{эф}} = \frac{T \cdot T_6}{T + T_6},$$

которая выведена из соотношений

$$\lambda_{\text{эф}} = \lambda + \lambda_{\text{б}};$$

$$\lambda_{\text{эф}} = \frac{0,693}{T_{\text{эф}}};$$

$$\lambda_{\text{б}} = \frac{0,693}{T_{\text{б}}};$$

$$\lambda = \frac{0,693}{T},$$

где $\lambda_{\text{эф}}$ – эффективная постоянная радиоактивного распада и выведения;

$\lambda_{\text{б}}$ – постоянная выведения данного радионуклида, то есть доля данного радионуклида, выводимая за единицу времени.

Отсюда

$$T_{\text{эф}} = \frac{0,693}{\lambda_{\text{эф}}} = \frac{0,693}{\lambda + \lambda_{\text{б}}} = \frac{0,693}{0,693\left(\frac{1}{T} + \frac{1}{T_{\text{б}}}\right)} = \frac{T \cdot T_{\text{б}}}{T + T_{\text{б}}}.$$

Если $T \gg T_{\text{б}}$, то $T_{\text{эф}} = T_{\text{б}}$, то есть для долгоживущих радионуклидов $T_{\text{эф}}$ определяется биологическим выведением и химической, а не радиационной токсичностью. Например, для α -излучателей ^{144}Nd ($T=2,4 \cdot 10^{15}$ лет), ^{147}Sm ($1,05 \cdot 10^{11}$ лет), ^{147}Nf ($2 \cdot 10^{15}$ лет).

В случае β^- -излучателей с $T > n \cdot 10^5$ лет также невозможно получить остролетальный эффект за счет радиационного воздействия, так как на первый план будет выступать химическая токсичность элемента. Так, для получения остролетального действия от ^{40}K ($T=1,28 \cdot 10^9$ лет) необходимо было бы вводить его в количестве 155000 кБк на крысу, что по массе (620 г) в 3 раза превышает массу крысы. Другой пример заключается в том, что остролетальное действие ^{129}I ($T=1,57 \cdot 10^7$ лет) за счет β^- -распада можно ожидать при введении его в количестве 886000 кБк на крысу.

И наоборот, если $T \ll T_{\text{б}}$, то $T_{\text{эф}} = T$.

Таким образом, при инкорпорации радионуклида в остролетальных дозах (ЛД_{50/30}) для радионуклидов:

с $T > 10^6$ лет на первый план будет выступать их химическая токсичность;

с $T=10^5$ лет будет в равной мере проявляться радиационная и химическая токсичность;

с $T < 10^4$ и 10^3 лет – преимущественно радиационная токсичность.

Примеры решения задач

1. Определите биологический период полувыведения ^{144}Ce из почек и постоянные выведения данного радионуклида и распада и выведения.

Дано:

$$T = 284,5 \text{ сут}$$

$$T_{\text{эф}} = 191 \text{ сут}$$

Найти: T_6 , λ_6 , $\lambda_{\text{эф}}$

Решение:

Из искомых величин проще всего найти $\lambda_{\text{эф}}$ исходя из соотношения $\lambda_{\text{эф}} = \frac{0,693}{T_{\text{эф}}}$. Значение $T_{\text{эф}}$ приведено в табл. 2

Приложения, для почек $T_{\text{эф}} = 191$ сут, что внесено в «Дано».

$$\text{Тогда } \lambda_{\text{эф}} = \frac{0,693}{191} = 3,62 \cdot 10^{-3} \text{ сут}^{-1}.$$

Аналогично находим λ

$$\lambda = \frac{0,693}{T} = \frac{0,693}{284,5} = 2,43 \cdot 10^{-3} \text{ сут}^{-1}.$$

Значение T взято из табл. 2 Приложения. Имея величины λ и $\lambda_{\text{эф}}$, находим $\lambda_6 = \lambda_{\text{эф}} - \lambda = (3,62 - 2,43) \cdot 10^{-3} = 1,19 \cdot 10^{-3} \text{ сут}^{-1}$.

$$\text{Величина } T_6 = \frac{0,693}{\lambda_6} = \frac{0,693}{1,19 \cdot 10^{-3}} = 563 \text{ дня}.$$

Ответ: 563 дн.; $1,19 \cdot 10^{-3} \text{ сут}^{-1}$; $3,62 \cdot 10^{-3} \text{ сут}^{-1}$.

2. Определите в каком органе наиболее длительно задерживается ^{210}Po ? Как можно обнаружить ^{210}Po в организме? Как можно ускорить его выведение из организма?

Решение: Показателем, характеризующим задержку радиоизотопа в органе, является T_6 . В случае ^{210}Po $T_6 = \frac{T \cdot T_{\text{эф}}}{T - T_{\text{эф}}} = \frac{138,4 \cdot 46}{138,4 - 46} = 70 \text{ сут}$. Значения

T и $T_{\text{эф}}$ для ^{210}Po взяты из табл. 2 Приложения. Кстати, почки являются органом, в котором ^{210}Po накапливается в большем количестве, об этом судят по коэффициенту f_2 (1,13), приведенному в таблице 2 Приложения. f_2 – это доля радионуклида, удерживаемая каким-либо органом.

^{210}Po можно обнаружить косвенным методом как α -излучатель по анализу кала или мочи, преимущественно кала, так как ^{210}Po выводится через ЖКТ.

Выведение ^{210}Po из организма можно ускорить методом ионного антагонизма, введя соединения элементов VI группы теллура, селена, серы. Исходя из данных табл. 2 Приложения, можно сказать, что ^{210}Po наиболее эффективно выводится из костей ($T_{\text{эф}} = 20 \text{ сут}$).

Список литературы

1. Ярмоненко С.П. Радиобиология человека и животных. – М.: Высш. шк., 1977. – 498 с.
2. Ионизирующие излучения: источники и биологические эффекты. НКДАР при ООН. Н-Й., 1982. – 69 с.
3. Ионизирующие излучения: источники и биологические эффекты. НКДАР при ООН. Н-Й., 1982. – 69 с.
4. Биохимические основы действия радиопротекторов. / Е.Ф. Романцев, В.Д. Блохина, З.И. Жуланова и др. – М.: Медицина, 1980. – 285 с.
5. Москалев Ю.И. Радиобиология инкорпорированных радионуклидов. – М.: Медицина, 1989. – 391 с.
6. Голутвина М.М., Абрамов Ю.В. Контроль за поступлением и содержанием радиоактивных веществ в организм человека. – М.: Медицина, 1989. – 319 с.
7. Савинский А.К. Взаимодействие электронов с тканеэквивалентными средами. – М.: Энергоиздат, 1984. – 289 с.
8. Вредные химические вещества. Радиоактивные вещества: Справ. Изд./ В.А. Батенов, Л.А. Булдаков, И.Я. Василенко и др. – Л.: Химия, 1990. – 554 с.
9. Нормы радиационной безопасности Украины (НРБУ-97). – К.: 1998. – 159 с.
10. Пределы поступления радионуклидов для работающих с радиоактивными веществами в открытом виде. Публ. 30 МКРЗ, 1983. – 77 с.
11. Пределы ингаляционного поступления дочерних продуктов радона для профессиональных работников. Публ. 32 МКРЗ, 1984. – 91 с.
12. Кириллов В.Ф., Книжников В.А., Коренков И.П. Радиационная гигиена. М.: Медицина, 1988. – 383 с.
13. Радиация: Дозы, эффект, риск. – М.: Мир, 1988. – 171 с.
14. Выброс радионуклидов в окружающую среду. Расчет доз облучения человека. Публ. 29 МКРЗ, 1980. – 107 с.
15. Модель определения дозовых нагрузок с учетом миграции радионуклидов и поступления их по пищевым цепочкам. Серия ОРБ – 11, 1980. – 124 с.
16. Гусев Н.Г., Беляев В.А. Радиоактивные выбросы в биосфере. Справочник, М.: Энергоиздат, 1991. – 589 с.
17. Петин В.Г., Комаров В.П. Количественное описание модификации радиочувствительности. – М.: Медицина, 1989. – 418 с.
18. Поляков Ю.А. Радиоэкология и дезактивация почв. – М.: Атомиздат, 1970. – 327 с.
19. Методические рекомендации по санитарному контролю за содержанием радиоактивных веществ в объектах внешней среды. – М., 1980. – 208 с.
20. Юдинцева Е.В., Гулякин И.В. Агрохимия радиоактивных изотопов Sr и Cs. – М.: Атомиздат, 1968. – 117 с.
21. Гродзинський Д.М. Радіобіологія. К.: Либідь, 2000. – 448 с.

Таблица 1 – Допустимые концентрации в воздухе PC^{inhal} и питьевой воде PC^{ingest} для категории В

Радионуклид	Период полураспада	PC^{inhal} , Бк · м ⁻³	PC^{ingest} , Бк · м ⁻³
⁹⁰ Sr	29,12 лет	0,2	10 ⁴
¹³⁷ Cs	30 лет	0,8	10 ⁵
²³⁹ Pu	2,4·10 ⁴ лет	4·10 ⁻⁴	10 ³

Таблица 2 – Биологические и физические константы некоторых радионуклидов

Нуклид, период полураспада	Растворимость соединения	Критический орган	Период полувыведения, $T_{эф}$, сут	Доля нуклида в критическом органе, f_2	ДС _A , Бк	Группа радиационной опасности
1	2	3	4	5	6	7
⁶⁰ Co 5,25 года	Р	Все тело Печень Селезенка Поджелудочная железа	9,5 9,5 9,5 9,5	1,0 0,02 $1,1 \cdot 10^{-3}$ $2,0 \cdot 10^{-3}$	$4,81 \cdot 10^3$ - - -	В
⁹⁰ Sr 28,6 года	Р Р НР	Все тело Кости Легкие, ЖКТ	5700 $6,4 \cdot 10^3$ $6,4 \cdot 10^3$	1,0 0,99 -	- $7,4 \cdot 10^4$ $2,8 \cdot 10^4$	Б
⁹⁰ Y 2,68 сут	- -	Все тело Кости	2,68 2,68	1,0 0,75	- -	В
⁹⁵ Zr 65 сут	Р	Все тело Кости Почки Селезенка Печень	55,5 59,5 59,5 59,0 53,0	1,0 0,38 0,02 $6,4 \cdot 10^{-3}$ 0,07	$6,66 \cdot 10^3$ - - - -	В
²³⁵ U $7,1 \cdot 10^8$ лет	Р	Все тело Почки Кости	100 15 300	1,0 0,065 0,85	- 37 $8,88 \cdot 10^2$	Б

Продолжение табл. 2

1	2	3	4	5	6	7
^{131}I 8,06 сут	P	Все тело Щитовидная железа Почки Печень Селезенка	7,6	1,0	-	Б
			7,6	0,2	$2,59 \cdot 10^3$	
			3,73	0,02	-	
			3,73	0,06	-	
^{137}Cs 30 лет	P	Все тело Мышцы Легкие Почки Селезенка Печень Кости	3,73	0,0025	-	B
			70	1,0	$1,22 \cdot 10^6$	
			138	0,79	$5,18 \cdot 10^5$	
			138	$6 \cdot 10^{-3}$	$7,4 \cdot 10^4$	
			42	$6 \cdot 10^{-3}$	-	
			97	$7 \cdot 10^{-3}$	$1,258 \cdot 10^4$	
^{144}Ce 284,5 сут	P	Все тело Кости Печень Почки	89	0,09	$1,295 \cdot 10^5$	Б
			137	0,08	-	
			191	1,0	$6,29 \cdot 10^4$	
			243	0,38	-	
^{210}Po 138,4 сут	P	Все тело Почки Селезенка Печень кости	146	0,19	-	A
			191	0,02	-	
			25	1,0	$8,14 \cdot 10^2$	
			46	1,13	$4,07 \cdot 10^2$	
			42	0,07	-	
			32	0,22	$7,4 \cdot 10^2$	
^{226}Ra 1600 лет	P P HP	Кости Почки Легкие	20	0,08	$1,887 \cdot 10^3$	A
			44 года	-	$4,07 \cdot 10$	
			44 года	-	$1,332 \cdot 10^2$	
			44 года	-	-	
^{228}Th 1,9 года	P HP	Кости Легкие	693	-	210	A
			693	-	63	

Таблица 3 – Массы органов условного человека

Орган	Масса, г
Все тело	70000
Мышцы скелета	28000
Костная ткань	5000
Костный мозг	3000
Пищевод	40
Желудок	150
Кишечник	1000
Тонкий кишечник	640
Печень	1800
Легкие	1000
Почки	310
Сердце	330
Селезенка	180
Щитовидная железа	20

Таблица 4 – Мощность дозы, создаваемая в критических органах человека (кожа, подкожные ткани, все тело) внешним бета- и гамма-излучением отдельных радионуклидов РБГ, содержащихся в воздухе помещений различного объема и на открытой местности, радл/(с·Ки) (для кожи и подкожной ткани указана мощность дозы β-излучения, а для всего тела-мощность дозы γ-излучения) при концентрации 1 Ки/л

Впо- ме- щен.	7м ³			50 м ³			250 м ³			2000 м ³			17000м ³			На открытой местности		
	β		γ	β		γ	β		γ	β		γ	β		γ	β		γ
	кожа	ПОДКОЖН.	тело	кожа	Подкожн тк.	тело	кожа	ПОДКОЖН.	тело	кожа	ПОДКОЖН.	тело	кожа	ПОДКОЖН.	тело	кожа	ПОДКОЖН.	тело
⁴¹ Ar	78	19	1,5	79	19,4	3,0	80	19,7	4,9	80	19,8	10	80	19,8	20	80	19,8	315
⁸⁵ Kr	34	1,3	0,1	35	1,4	0	35	1,4	0,01	35	1,4	0,00 2	35	1,4	0,0 04	35	1,4	0,5
^{85m} Kr	43	4,4	0,3	44	5	0,5 0	45	5,2	0,85	45	5,2	1,7	45	5,2	3,4	45	5,2	38,6
⁸⁷ Kr	85	51	0,8	117	68,3	1,6	169	107	2,8	219	145	5,5	228	152	11	228	152	191
⁸⁸ Kr	47	16	2,2	63	24,6	4,3	76	33,5	7,0	83	38	14	84	38	28	84	38	501
⁸⁹ Kr	67	40	2,3	125	74	4,5	175	113	7,6	226	150	15	237	158	30	237	158	414
¹³³ Xe	11	0,02	0,11	11	0,02	0,2	11	0,02	0,35	11	0,02	1	11	0,02	1,3	11	0,02	11,1
^{133m} Xe	31	0,15	0,1	37	0,2	0,3	40	0,25	0,40	42	0,3	0,8	42	0,3	1,4	42	0,3	8,7
¹³⁵ Xe	50	5,4	0,3	53	6,2	0,6	53	6,2	1,0	53	6,2	1,9	53	6,2	3,8	53	6,2	59
^{135m} Xe	24	0,07	0,6	27	0,1	1,1	27	0,15	1,9	27	0,15	3,7	27	0,15	7,3	27	0,15	104
¹³⁷ Xe	66	41	0,2	130	83	0,4	195	131	0,76	250	177	1,4	257	177	3,0	257	177	45,2
¹³⁸ Xe	91	55	1,2	131	71	2,3	162	90	4,0	172	96	7,9	172	96	15	172	96	264

Таблица 5 – Допустимая концентрация ДК радионуклидов РБГ, содержащихся в воздухе рабочих помещений и на открытой местности, Ки/л

Радионуклид	Критический орган	Объем помещения, м ³					Открытая местность	
		7	50	250	2000	17000	Категория А	Категория Б
⁴¹ Ar	кожа подкож. ткани гонады	5,2·10 ⁻⁸	5,0·10 ⁻⁸	4,9·10 ⁻⁸	4,6·10 ⁻⁸	4,1·10 ⁻⁸	1,0·10 ⁻⁸	2,3·10 ⁻¹⁰
		1,0·10 ⁻⁷	9,2·10 ⁻⁸	8,4·10 ⁻⁸	6,9·10 ⁻⁸	5,0·10 ⁻⁸	6,1·10 ⁻⁹	1,3·10 ⁻¹⁰
		4,5·10 ⁻⁷	2,2·10 ⁻⁷	1,3·10 ⁻⁷	6,8·10 ⁻⁸	3,4·10 ⁻⁸	2,1·10 ⁻⁹	4,9·10 ⁻¹¹
⁸⁵ Kr	кожа подкож. ткани гонады	1,2·10 ⁻⁷	1,2·10 ⁻⁷	1,1·10 ⁻⁷	1,1·10 ⁻⁷	1,1·10 ⁻⁷	1,1·10 ⁻⁷	2,6·10 ⁻⁹
		1,5·10 ⁻⁶	1,4·10 ⁻⁶	1,5·10 ⁻⁶	1,4·10 ⁻⁶	1,4·10 ⁻⁶	1,0·10 ⁻⁶	2,4·10 ⁻⁸
		2,3·10 ⁻⁴	1,1·10 ⁻⁴	6,9·10 ⁻⁵	3,4·10 ⁻⁵	1,7·10 ⁻⁵	1,2·10 ⁻⁶	2,8·10 ⁻⁸
^{85m} Kr	кожа подкож. ткани гонады	9,6·10 ⁻⁸	9,3·10 ⁻⁸	9,0·10 ⁻⁸	8,9·10 ⁻⁸	8,5·10 ⁻⁸	4,9·10 ⁻⁸	1,1·10 ⁻⁹
		4,4·10 ⁻⁷	3,7·10 ⁻⁷	3,4·10 ⁻⁷	3,0·10 ⁻⁷	2,3·10 ⁻⁷	4,6·10 ⁻⁸	1,0·10 ⁻⁹
		2,6·10 ⁻⁸	1,3·10 ⁻⁶	7,9·10 ⁻⁷	4,0·10 ⁻⁷	1,9·10 ⁻⁷	1,7·10 ⁻⁸	4,0·10 ⁻¹⁰
⁸⁷ Kr	кожа подкож. ткани гонады	4,8·10 ⁻⁸	3,5·10 ⁻⁸	2,4·10 ⁻⁸	1,8·10 ⁻⁸	1,7·10 ⁻⁸	9,8·10 ⁻⁹	2,2·10 ⁻¹⁰
		4,0·10 ⁻⁸	2,9·10 ⁻⁸	1,8·10 ⁻⁸	1,3·10 ⁻⁸	1,2·10 ⁻⁸	6,0·10 ⁻⁹	1,3·10 ⁻¹⁰
		8,0·10 ⁻⁷	4,0·10 ⁻⁷	2,4·10 ⁻⁷	1,2·10 ⁻⁷	6,0·10 ⁻⁸	3,5·10 ⁻⁹	8,1·10 ⁻¹¹
⁸⁸ Kr	кожа подкож. ткани гонады	8,4·10 ⁻⁸	6,1·10 ⁻⁸	4,9·10 ⁻⁸	4,2·10 ⁻⁸	3,6·10 ⁻⁸	7,0·10 ⁻⁹	1,6·10 ⁻¹⁰
		1,1·10 ⁻⁷	7,1·10 ⁻⁸	5,0·10 ⁻⁸	3,9·10 ⁻⁸	3,0·10 ⁻⁸	3,8·10 ⁻⁹	8,6·10 ⁻¹¹
		3,1·10 ⁻⁷	1,5·10 ⁻⁷	9,2·10 ⁻⁸	4,6·10 ⁻⁸	2,2·10 ⁻⁸	1,3·10 ⁻⁹	3,1·10 ⁻¹¹
⁸⁹ Kr	кожа подкож. ткани гонады	6,0·10 ⁻⁸	3,2·10 ⁻⁸	2,2·10 ⁻⁸	1,7·10 ⁻⁸	1,5·10 ⁻⁸	5,5·10 ⁻⁹	1,2·10 ⁻¹⁰
		4,9·10 ⁻⁸	2,6·10 ⁻⁸	1,7·10 ⁻⁸	1,2·10 ⁻⁸	1,1·10 ⁻⁸	3,0·10 ⁻⁹	7,0·10 ⁻¹¹
		2,9·10 ⁻⁷	1,4·10 ⁻⁷	8,9·10 ⁻⁸	4,4·10 ⁻⁸	2,2·10 ⁻⁸	1,3·10 ⁻⁹	3,0·10 ⁻¹¹
⁴¹ Ar	кожа подкож. ткани гонады	3,9·10 ⁻⁷	3,8·10 ⁻⁷	3,7·10 ⁻⁷	3,6·10 ⁻⁷	3,4·10 ⁻⁷	1,9·10 ⁻⁷	4,3·10 ⁻⁹
		1,5·10 ⁻⁵	8,6·10 ⁻⁶	5,3·10 ⁻⁶	2,7·10 ⁻⁶	1,3·10 ⁻⁶	1,8·10 ⁻⁷	4,2·10 ⁻⁹
		6,3·10 ⁻⁶	3,1·10 ⁻⁶	1,8·10 ⁻⁶	9,2·10 ⁻⁷	4,6·10 ⁻⁷	6,1·10 ⁻⁸	4,3·10 ⁻⁹
⁸⁵ Kr	кожа подкож. ткани гонады	1,3·10 ⁻⁷	1,1·10 ⁻⁷	1,0·10 ⁻⁷	9,8·10 ⁻⁸	9,6·10 ⁻⁸	8,2·10 ⁻⁸	1,8·10 ⁻⁹
		7,4·10 ⁻⁶	4,5·10 ⁻⁶	3,0·10 ⁻⁶	1,7·10 ⁻⁶	1,0·10 ⁻⁶	2,2·10 ⁻⁷	5,1·10 ⁻⁹
		5,3·10 ⁻⁶	2,6·10 ⁻⁶	1,6·10 ⁻⁶	8,0·10 ⁻⁷	3,9·10 ⁻⁷	7,8·10 ⁻⁸	1,7·10 ⁻⁹
^{85m} Kr	кожа подкож. ткани гонады	8,2·10 ⁻⁸	7,7·10 ⁻⁸	7,6·10 ⁻⁸	7,5·10 ⁻⁸	7,1·10 ⁻⁸	3,6·10 ⁻⁸	8,3·10 ⁻¹⁰
		3,6·10 ⁻⁷	3,0·10 ⁻⁷	2,8·10 ⁻⁷	2,5·10 ⁻⁷	2,0·10 ⁻⁷	3,0·10 ⁻⁸	7,0·10 ⁻¹⁰
		2,2·10 ⁻⁶	1,1·10 ⁻⁶	6,8·10 ⁻⁷	3,4·10 ⁻⁷	1,7·10 ⁻⁷	1,1·10 ⁻⁸	2,5·10 ⁻¹⁰
⁸⁷ Kr	кожа подкож. ткани гонады	1,6·10 ⁻⁷	1,4·10 ⁻⁷	1,4·10 ⁻⁷	1,3·10 ⁻⁷	1,1·10 ⁻⁷	3,1·10 ⁻⁸	7,1·10 ⁻¹⁰
		3,1·10 ⁻⁶	1,6·10 ⁻⁶	9,8·10 ⁻⁷	5,1·10 ⁻⁷	2,6·10 ⁻⁷	1,9·10 ⁻⁸	4,4·10 ⁻¹⁰
		1,1·10 ⁻⁶	5,8·10 ⁻⁷	3,5·10 ⁻⁷	1,7·10 ⁻⁷	8,8·10 ⁻⁸	6,5·10 ⁻⁹	1,4·10 ⁻¹⁰
⁸⁸ Kr	кожа подкож. ткани гонады	6,2·10 ⁻⁸	3,6·10 ⁻⁸	2,1·10 ⁻⁸	1,6·10 ⁻⁸	1,6·10 ⁻⁸	1,3·10 ⁻⁸	3,1·10 ⁻¹⁰
		5,0·10 ⁻⁶	2,4·10 ⁻⁸	1,5·10 ⁻⁸	1,2·10 ⁻⁸	1,1·10 ⁻⁸	9,3·10 ⁻⁹	2,1·10 ⁻¹⁰
		2,8·10 ⁻⁶	1,4·10 ⁻⁶	8,7·10 ⁻⁷	4,4·10 ⁻⁷	2,2·10 ⁻⁷	1,4·10 ⁻⁸	3,4·10 ⁻¹⁰
⁸⁹ Kr	кожа подкож. ткани гонады	4,5·10 ⁻⁸	3,1·10 ⁻⁸	2,5·10 ⁻⁸	2,3·10 ⁻⁸	2,2·10 ⁻⁸	9,3·10 ⁻⁹	2,1·10 ⁻¹⁰
		3,7·10 ⁻⁸	2,8·10 ⁻⁸	2,2·10 ⁻⁸	1,9·10 ⁻⁸	1,8·10 ⁻⁸	5,7·10 ⁻⁹	1,3·10 ⁻¹⁰
		5,7·10 ⁻⁷	2,8·10 ⁻⁷	1,7·10 ⁻⁷	8,5·10 ⁻⁸	4,2·10 ⁻⁸	2,5·10 ⁻⁹	5,8·10 ⁻¹¹

Таблица 6 – Полные γ – постоянные радионуклидов, $P \cdot \text{см}^2/(\text{ч} \cdot \text{мКи})$

Радионуклид	K_γ	Радионуклид	K_γ	Радионуклид	K_γ
⁷ Be	0,325	⁸⁵ Sr	2,94	¹⁴⁰ Ba	1,16
¹⁶ N	15,28	^{87m} Sr	1,72	¹⁴⁰ La	11,14
¹⁹ O	5,07	⁸⁹ Sr + ^{89m} Y	$5 \cdot 10^{-4}$	¹⁴¹ Ce	0,292
²² Na	11,89	⁹¹ Sr + ^{91m} Y	5,98	¹⁴⁴ Ce	0,04
²⁴ Na	18,55	⁹⁰ Sr	6,60	¹⁴⁷ Nd	0,756
²⁸ Mg	7,72	⁹¹ Y	0,019	¹⁴⁴ Pm	8,62
⁴¹ Ar	6,58	⁹⁸ Zr	1,98	¹⁵⁵ Sm	0,439
⁴⁰ K	0,80	⁹⁵ Zr + ^{85m} Nb	4,10	¹⁴⁷ Eu	11,6
⁴² K	1,36	⁹⁵ Nb	4,31	¹⁵⁶ Eu	6,14
⁴⁷ Ca	5,50	^{93m} Mo	11,36	¹⁸⁵ W	$3 \cdot 10^{-4}$
⁴⁹ Ca	12,82	⁹⁹ Mo + ^{99m} Tc	1,23	¹⁸⁷ W	2,85
⁴⁴ Sc	11,82	¹⁰³ Ru + ^{103m} Rh	1,22	¹⁹² Ir	4,65
⁴⁶ Sc	10,87	¹⁰⁶ Ru + ^{106m} Rh	1,54	¹⁹⁵ Au	0,028
⁴⁷ Sc	0,45	¹⁰⁵ Ag	6,71	¹⁹⁶ Au	2,39
⁴⁸ Sc	17,61	^{125m} Sn	0,584	¹⁹⁸ Au + ^{198m} Hg	2,30
⁵¹ Cr	0,165	¹²⁵ Sn	1,99	^{193m} Hg + ¹⁹³ Hg	0,552
⁵² Mn	18,03	¹²¹ I	2,18	¹⁹³ Hg	0,102
⁵⁴ Mn	4,69	¹²² I	4,84	^{197m} Hg	0,322
⁵⁶ Mn	8,28	¹³² I	0,685	¹⁹⁷ Hg	0,109
⁵⁹ Fe + ^{59m} Co	6,25	¹²⁴ I	7,11	^{199m} Hg	1,34
⁵⁶ Co	17,40	¹²⁵ I	$2 \cdot 10^{-3}$	²⁰³ Hg	1,25
⁵⁷ Co	0,576	¹²⁶ I	2,27	²¹⁰ Pb	$9,9 \cdot 10^{-4}$
⁵⁸ Co	5,47	¹²⁸ I	0,521	²¹² Pb	0,664
⁶⁰ Co	12,93	¹²⁹ I	0,020	²¹² Bi	0,567
⁵⁷ Ni	10,07	¹³⁰ I	13,59	²¹⁰ Po	$5 \cdot 10^{-5}$
⁶⁵ Ni	2,23	¹³¹ I	2,15	²²⁰ Rn	0,001
⁶⁴ Cu	1,12	¹³² I	11,55	²²² Rn	0,002
⁶⁷ Cu	0,545	¹³³ I	3,80	²²⁴ Ra	0,039
⁶² Zn	1,79	¹³⁴ I	12,60	²²⁶ Ra	9,36
⁶⁵ Zn	3,02	¹³⁵ I + ^{135m} Xe	7,55	в равновесии с основными дочерними продуктами распада	0,003
⁶⁴ Ga	13,90	¹³⁶ I	14,01	²³⁰ Th	0,067
⁶⁶ Ga	11,89	¹²⁷ Xe	1,38	²³² Th	0,028
⁷² Ga	15,70	^{129m} Xe	0,104	²³⁴ Th	0,005
⁷⁴ As	4,43	^{131m} Xe	0,019	²³⁰ U	0,741
⁷⁶ As	1,98	^{133m} Xe	0,195	²³⁵ U	0,072
⁷² Se	0,24	¹³³ Xe	0,145	²³⁸ U	0,931
⁷⁵ Se	1,94	¹³⁵ Xe	1,34	²³⁹ Np	0,002
⁷⁶ Br	10,55	¹²⁶ Cs	5,54	²³⁸ Pu	$3,6 \cdot 10^{-5}$
⁸² Br	14,47	¹²⁸ Cs	4,20	²³⁹ Pu	0,630
⁷⁷ Kr	5,64	¹²⁹ Cs	1,36	²⁴¹ Am	$1,8 \cdot 10^{-4}$
⁷⁹ Kr	1,17	¹³⁰ Cs	5,81	²⁴² Cm	
^{85m} Kr	0,804	¹³² Cs	3,97		
⁸⁵ Kr	0,021	^{134m} Cs	0,159		
⁸⁷ Kr	5,03	¹³⁴ Cs	8,58		
⁸⁴ Rb	4,55	¹³⁶ Cs	12,62		
⁸⁶ Rb	0,55	¹³⁷ Cs + ^{137m} Ba	3,10		
^{85m} Sr	1,10	¹³⁸ Cs	10,77		

Таблица 7 – Средний геометрический фактор для γ – активного радионуклида, равномерно распределенного в теле человека

Масса человека, кг	Рост человека, см						
	200	190	180	170	160	150	140
100	138	139	142	145	147	150	154
90	134	136	138	140	143	146	148
80	129	130	131	134	136	139	141
70	123	124	125	126	129	131	135
60	117	118	119	120	122	125	128
50	112	113	114	116	117	119	122
40	102	104	105	106	108	109	110

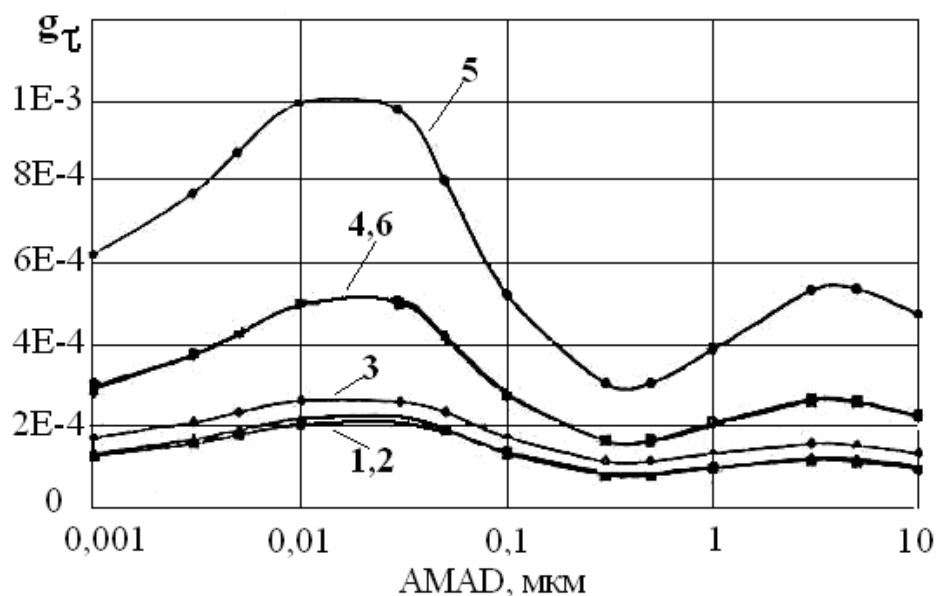


Рис.1 – Доза на единицу концентрации в воздухе g_{τ} , $\text{Зв}\cdot\text{год}^{-1}\cdot\text{Бк}^{-1}\cdot\text{м}^3$ при ингаляции ^{90}Sr (референтный тип F) в зависимости от AMAD и возраста: 1 – 3 месяца; 2 – 1 год; 3 – 5 лет; 4 – 10 лет; 5 – 15 лет; 6 – взрослый.

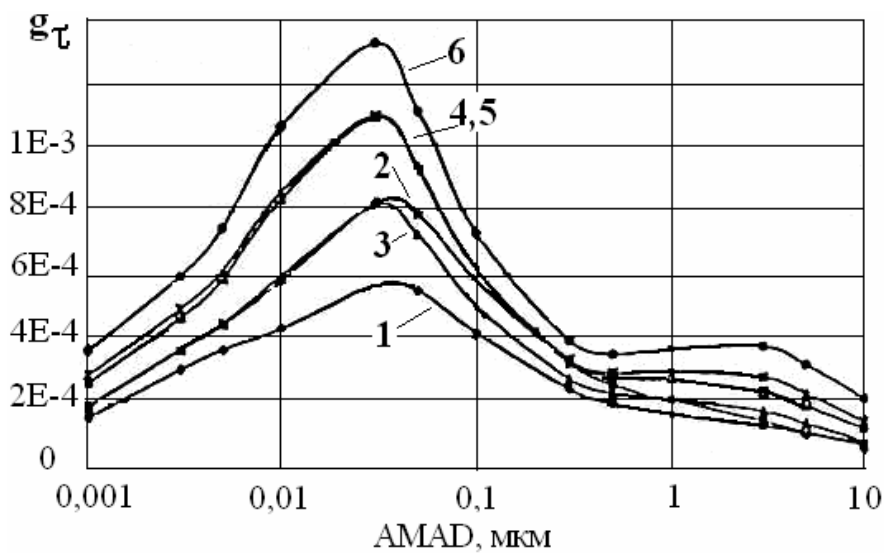


Рис.2 – Доза на единицу концентрации в воздухе g_{τ} , $\text{Зв}\cdot\text{год}^{-1}\cdot\text{Бк}^{-1}\cdot\text{м}^3$ при ингаляции ^{90}Sr (референтный тип M) в зависимости от AMAD и возраста: 1 – 3 месяца; 2 – 1 год; 3 – 5 лет; 4 – 10 лет; 5 – 15 лет; 6 – взрослый

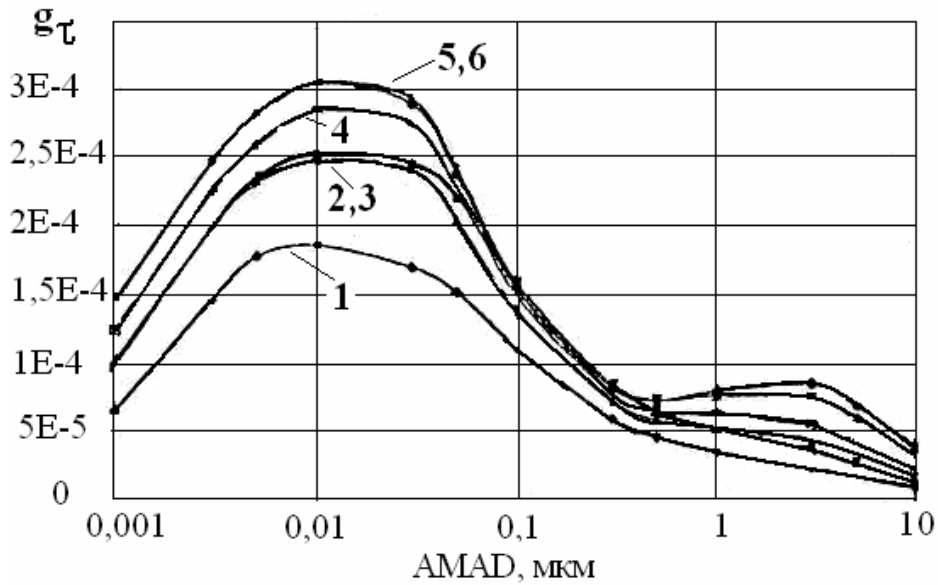


Рис.3 – Доза на единицу концентрации в воздухе g_{τ} , $\text{Зв}\cdot\text{год}^{-1}\cdot\text{Бк}^{-1}\cdot\text{м}^3$ при ингаляции ^{90}Sr (референтный тип S) в зависимости от AMAD и возраста: 1 – 3 месяца; 2 – 1 год; 3 – 5 лет; 4 – 10 лет; 5 – 15 лет; 6 – взрослый

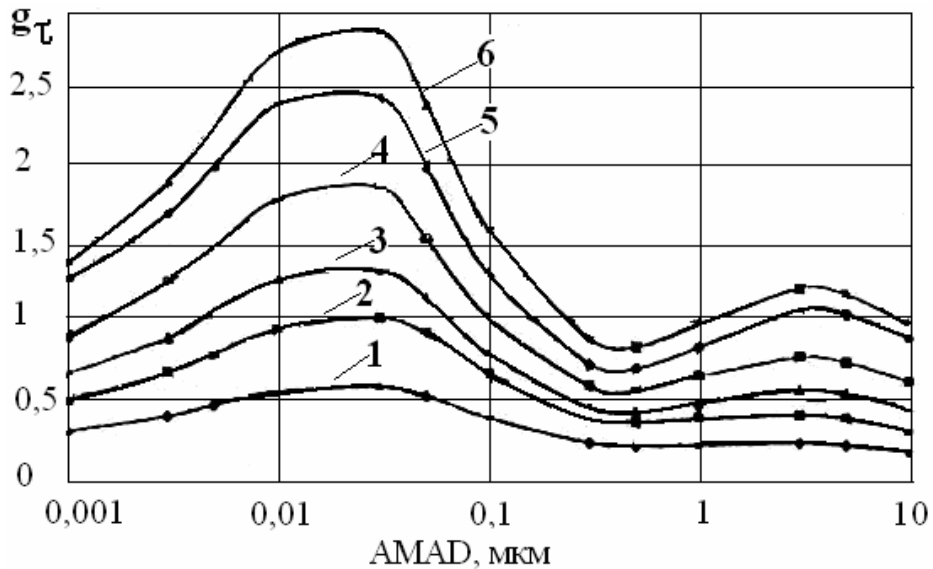


Рис.4 – Доза на единицу концентрации в воздухе g_{τ} , $\text{Зв}\cdot\text{год}^{-1}\cdot\text{Бк}^{-1}\cdot\text{м}^3$ при ингаляции ^{137}Cs (референтный тип F) в зависимости от AMAD и возраста: 1 – 3 месяца; 2 – 1 год; 3 – 5 лет; 4 – 10 лет; 5 – 15 лет; 6 – взрослый

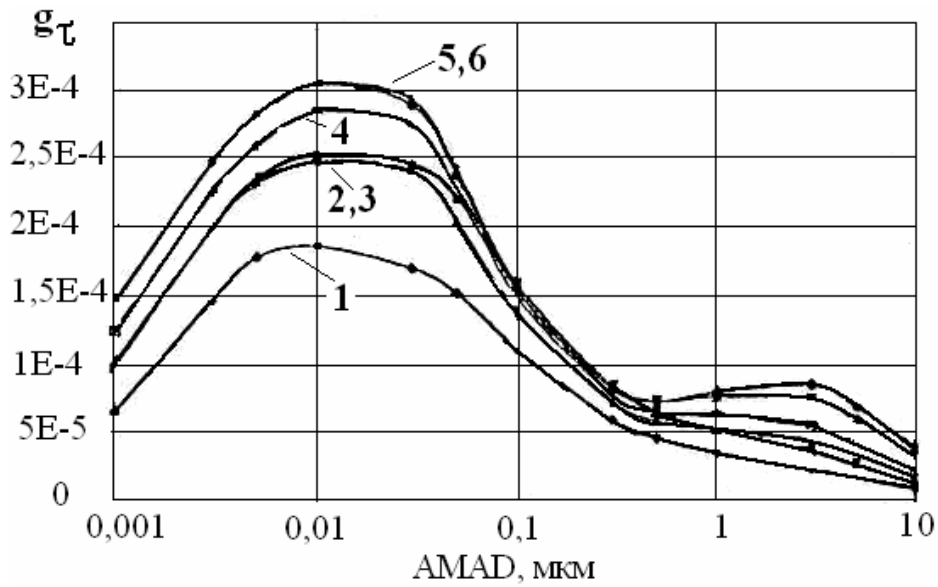


Рис.5 – Доза на единицу концентрации в воздухе g_{τ} , $\text{Зв}\cdot\text{год}^{-1}\cdot\text{Бк}^{-1}\cdot\text{м}^3$ при ингаляции ^{137}Cs (референтный тип *M*) в зависимости от AMAD и возраста: 1 – 3 месяца; 2 – 1 год; 3 – 5 лет; 4 – 10 лет; 5 – 15 лет; 6 – взрослый

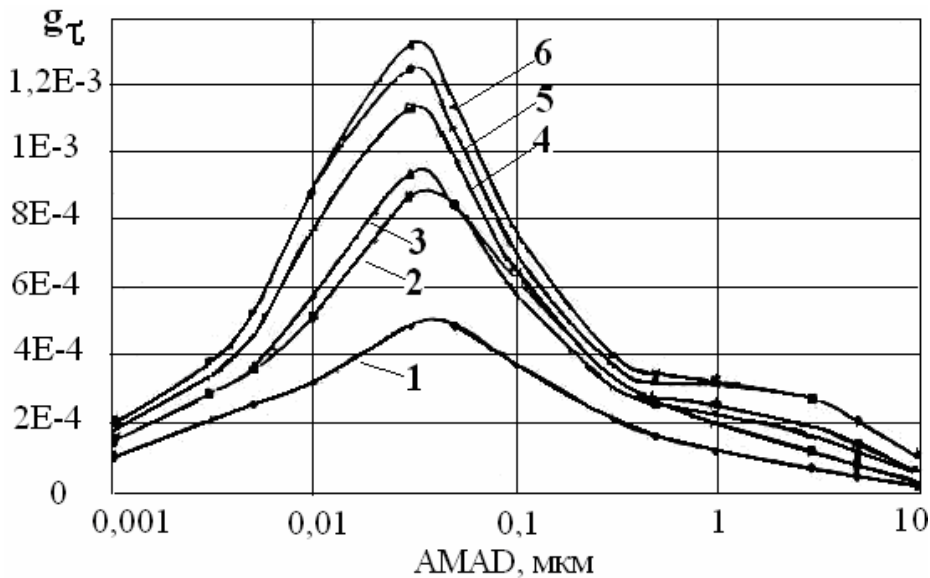


Рис.6 – Доза на единицу концентрации в воздухе g_{τ} , $\text{Зв}\cdot\text{год}^{-1}\cdot\text{Бк}^{-1}\cdot\text{м}^3$ при ингаляции ^{137}Cs (референтный тип *S*) в зависимости от AMAD и возраста: 1- 3 месяца; 2 – 1 год; 3 – 5 лет; 4- 10 лет; 5 – 15 лет; 6 – взрослый

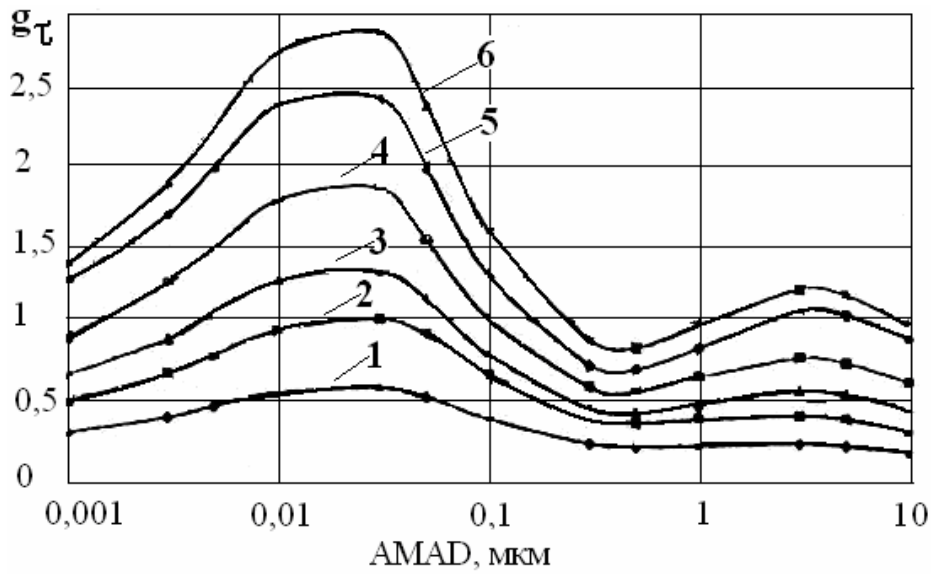


Рис.7 – Доза на единицу концентрации в воздухе g_{τ} , $\text{Зв}\cdot\text{год}^{-1}\cdot\text{Бк}^{-1}\cdot\text{м}^3$ при ингаляции ^{239}Pu (референтный тип F) в зависимости от AMAD и возраста: 1 – 3 месяца; 2 – 1 год; 3 – 5 лет; 4 – 10 лет; 5 – 15 лет; 6 – взрослый

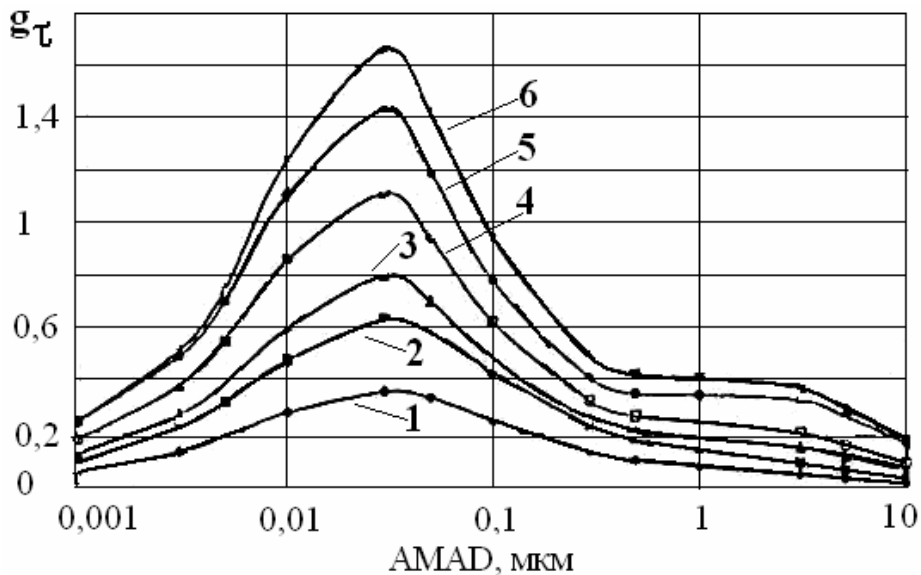


Рис.8 – Доза на единицу концентрации в воздухе g_{τ} , $\text{Зв}\cdot\text{год}^{-1}\cdot\text{Бк}^{-1}\cdot\text{м}^3$ при ингаляции ^{239}Pu (референтный тип M) в зависимости от AMAD и возраста: 1 – 3 месяца; 2 – 1 год; 3 – 5 лет; 4 – 10 лет; 5 – 15 лет; 6 – взрослый

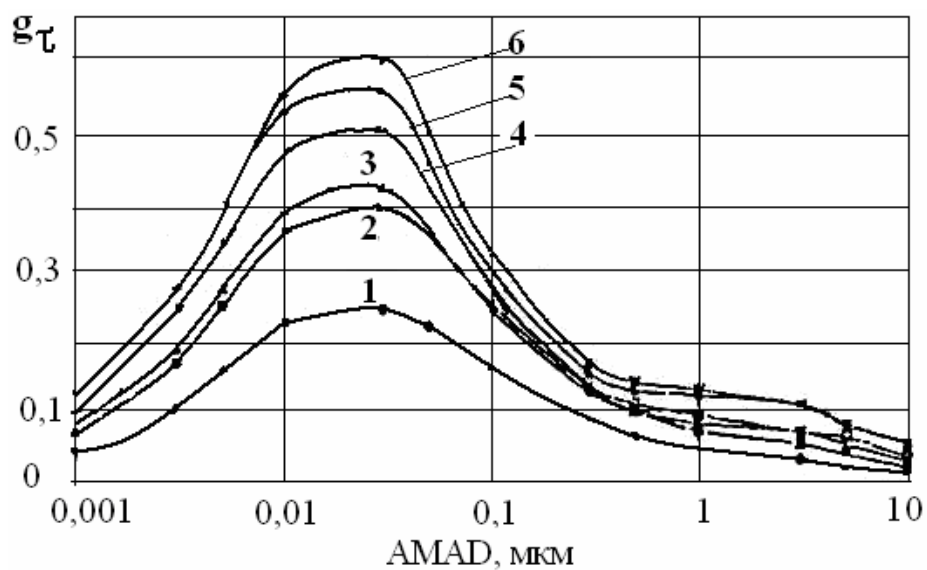


Рис.9– Доза на единицу концентрации в воздухе g_{τ} , $\text{Зв}\cdot\text{год}^{-1}\cdot\text{Бк}^{-1}\cdot\text{м}^3$ при ингаляции ^{239}Pu (референтный тип S) в зависимости от AMAD и возраста: 1 – 3 месяца; 2 – 1 год; 3 – 5 лет; 4 – 10 лет; 5 – 15 лет; 6 – взрослый

Учебное издание

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к самостоятельной работе
по дисциплине «Радиобиология»
для студентов специальности 7.070801
факультета заочного обучения

Составитель ХОБОТОВА Элина Борисовна

Ответственный за выпуск *Н.В. Внукова*

Технический редактор *М.Л. Пиц*

Компьютерная верстка *В.В. Подчалимова*

Подписано к печати 23.11.2006 г.

Формат 60×84 1/16. Бумага газетная. Гарнитура Times New Roman.

Печать RISO. Усл. печ. л. 4,4. Уч.-изд 6,2.

Заказ № 970/06. Тираж 110 экз. Цена договорная.

Издательство ХНАДУ, 61002, г. Харьков-ГСП, ул. Петровского, 25

Свидетельство Государственного комитета информационной политики, телевидения и радиовещания Украины про внесение субъекта издательского дела в государственный реестр издателей, изготовителей и распространителей издательской продукции, серия ДК № 897 от 17.04.2002 г.