

2. ЭКВИВАЛЕНТНАЯ ДОЗА ПРИ ВНУТРЕННЕМ ОБЛУЧЕНИИ

Внутренняя доза радиации: доза, полученная органами тела в результате воздействия радиоактивного материала, проникшего внутрь организма при вдыхании, с пищей или через порезы и раны. Она может состоять из любой комбинации альфа-, бета- и гамма-излучения от попавшего внутрь радиоактивного материала. Внутренняя доза также включает в себя косвенную ионизацию, вызванную нейтронами, проходящими через тело.

Доза эквивалентная или **эффективная ожидаемая при внутреннем облучении** - доза за время t , прошедшее после поступления радиоактивных веществ в организм.

2.1. Поступление радионуклидов в организм

Источниками доз радиации могут быть вещества, проникшие внутрь организма при еде, питье, дыхании, через порезы или раны. Размер радиационной дозы зависит от качественного и количественного состава (типы распада, активности) радионуклидов в продуктах питания (или во вдыхаемом воздухе), от химической формы радионуклида и его состояния (молекулярно-дисперсное, аэрозоль, коллоид), от путей проникновения (пероральный, ингаляционный, через кожу), скорости и продолжительности его проникновения в организм, усвояемости изотопа из желудочно-кишечного тракта или легких, от характера его распределения, в частности - от склонности к отложению в жизненно важном органе этого организма, от скорости выведения радионуклида из критического органа и организма в целом (т.е. от времени его нахождения в организме, которое зависит от периода его физического полураспада и скорости выведения из организма вследствие минерального обмена) и ряда других факторов (**Рис. 1**).

При попадании радионуклида внутрь организма, человек носит источник облучения внутри себя и постоянно наращивает суммарную дозу облучения.

Рис. 1 Пути поступления радионуклида в организм человека.



При пероральном попадании в организм (пища, вода) всасывание радионуклидов в желудочно-кишечном тракте происходит с такой же вероятностью, как и их стабильных изотопов, то есть некоторая часть из них на длительное время входит в состав организма, другая быстро выводится в результате обмена веществ.

Накопление радионуклидов в системе дыхания зависит от размера аэрозолей (частиц), к которым прилипают радиоактивные атомы в атмосферном воздухе, частоте дыхания, усвояемости изотопов. Переход оставшихся в легочной ткани нуклидов в кровеносную систему происходит очень быстро.

Значения коэффициентов всасывания основных технических и естественных радионуклидов в желудочно-кишечном тракте (ЖКТ) и легких приведены в **Табл. 2**.

Табл. 2. Коэффициенты всасывания радионуклидов в желудочно-кишечный тракт и легкие человека

Радионуклид	Радионуклид		Радионуклид		
	ЖКТ	Легкие	ЖКТ	ЖКТ	Легкие
H-3	1,0	1,0	Y-131	1,0	0,75
C-14	1,0	0,75	Cs-137	1,0	0,75
Na-22	1,0	0,75	Pb-210	0,2	0,3
Al-26	0,005	-	Po-210	0,1	0,3
K-40	1,0	0,75	Rn-222	1,0	-
Co-60	0,3	0,4	Eu-152	0,001	-
Zn-65	0,5	0,3	U-238	0,2	0,25
Sr-90	0,3	0,45	Pu-239	0,0005	0,25
Cd-109	0,1	0,3			

Естественно, что эти же значения относятся и к другим радиоактивным изотопам указанных элементов. Многие радионуклиды после попадания даже на неповрежденную кожу, могут проникать через защитный слой и разноситься по всему организму с потоками лимфы и крови. Интенсивность проникновения зависит от типа химического соединения, летучести элемента, температуры среды и т.п. Проникновение некоторых технических радионуклидов в глубину неповрежденной кожи через несколько часов после их нанесения на поверхность показано на **Рис. 2**.

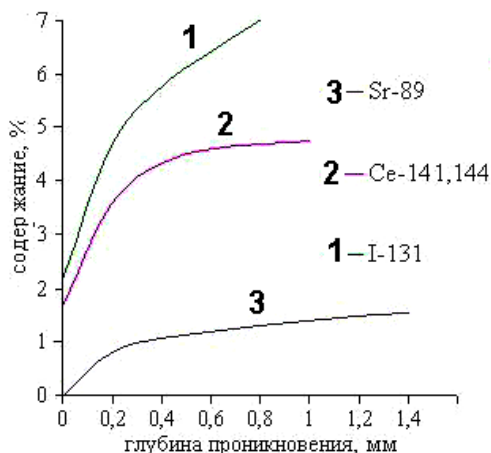


Рис. 2 Содержание различных радионуклидов в глубоких слоях кожи после ее поверхностного загрязнения

Табл. 3. Содержание различных радионуклидов в глубоких слоях кожи после ее поверхностного загрязнения

Равномерно по всем органам и тканям	H, Cs, K, Zn, Al, C, Po, Co
распределяются радиоактивные изотопы:	
Преимущественно в костной ткани:	Sr, Ra, U, Pb, P
Преимущественно в ретикуло-эндотелиальных тканях:	Th, Pu, Am
В почках:	U
В щитовидной железе:	I

Приведенные данные достаточно условны, т.к. степень усвоения и концентрации зависит и от состава химического соединения, в который входит радионуклид.

Для учета доли радиоактивности, попавшей из окружающей среды в кровь, желудочно-кишечный тракт, а затем – в критический орган, в расчеты внутренней дозы вводятся коэффициенты f_i (см. ниже).

Для определения скорости поступления радионуклидов в организм человека, необходимо знать такие параметры, как интенсивность дыхания, потребление питьевой воды и пищи, а для оценки дозы, от попавших внутрь человека радионуклидов, параметры самого человека и некоторых его органов (см. **Табл. 4** и).

Табл. 4. Параметры некоторых органов человека.

Жизненная емкость легких	
мужчины	3 – 4 л
женщины	2 – 3 л
Объем воздуха, вдыхаемого за 8 рабочих часов	10^7 мл/день
Полный объем воздуха, вдыхаемого за день	10^7 мл/день
Поверхность верхних дыхательных путей, трахей и бронхов	20 м ² 70 м ²
Полная поверхность органов дыхания	4,3 м ²
Полное содержание воды в организме	70 лет
Средняя продолжительность жизни человека	

При расчете дозы от внутренних источников радиации тело человека имитируется тканеэквивалентным цилиндром высотой 75 и радиусом 15 см.

Табл. 5. Водный баланс.

Потребление воды, мл/день		Выделение воды, мл/день	
С твердой пищей	1000	С мочой	1400
С жидкой пищей	1200	С потом	600
Вода, образованная в результате окисления	300	С выдыхаемым воздухом	300
		С испражнениями	200
Полное потребление воды	2500	Полное выделение	2500

2.2. Накопление радионуклидов в критическом органе

Радиоактивный изотоп	Критический орган	Доля изотопа, попадающая в критический орган, от общего количества изотопа в организме	Период полураспада и полувыведения, дни		
			$T_{1/2}$	T_6	$T_{эфф}$
3H	Все тело	1,0	$4,5 \cdot 10^3$	12	12
^{14}C	Все тело	1,0	$2 \cdot 10^6$	10	10
	Жировая ткань	0,6		12	12
^{32}P	Кости	0,1	14,3	40	40
	Все тело	1,0		257	13,5
^{35}S	Кости	0,21	87,1	1155	14,1
	Все тело	1,0		90	44,3
^{59}Fe	Кожа	0,02	45,1	1530	82,4
	Все тело	1,0		800	42,7
^{90}Sr	Селезенка	0,02	10^4	600	41,9
	Все тело	1,0		$1,3 \cdot 10^4$	5700
^{210}Po	Кости	0,99	138,4	$1,8 \cdot 10^4$	6400
	Все тело	1,0		30	25
^{226}Ra	Селезенка	0,07	$5,9 \cdot 10^5$	60	42
	Все тело	1,0		$8,1 \cdot 10^3$	900
	Кости	0,99		$1,64 \cdot 10^4$	$1,6 \cdot 10^4$

В организме человека представлены все химические элементы, известные в земной коре, природной воде и атмосферном воздухе. Особенностью поведения в организме химических элементов является достаточно постоянное и строгое распределение их по системам, органам и тканям.

Табл. 6 Характеристики некоторых изотопов при внутреннем облучении.

Радиоактивные изотопы при попадании в организм распределяются в нем в тех органах, где уже имеются стабильные изотопы этого элемента или химически подобные ему. Известно, что мягкая биологическая ткань на 70—80% состоит из воды, кости состоят в основном из фосфата кальция, в

состав гемоглобина крови входит железо и т. д. Изучение распределения радиоактивных изотопов в организме человека и животных показало, в частности, что тритий распределяется равномерно по всему организму, фосфор на 60—70% усваивается костями, железо на 60—80% переходит в кровь. В связи с неравномерностью распределения радиоактивных изотопов в организме и, следовательно, неравномерного облучения различных органов при расчете доз при внутреннем облучении вводится понятие критического органа.

Критические органы, органы растений, животных и человека, повреждение которых ионизирующими излучениями приводит к патологическим изменениям в них, определяющим характер и тяжесть развития лучевого поражения. Для человека критические органы — кроветворные органы, желудочно-кишечный тракт, эндокринные железы.

Критический орган (Critical organ) - орган или ткань, часть тела, облучение которых в данных условиях может причинить наибольший ущерб здоровью облученного лица или его потомства.

Критические органы (радиобиологическое), структуры, ткани и органы, повреждение которых при облучении организма вызывает существенное нарушение жизнедеятельности.

Замечание. Несмотря на то, что критический орган — важное понятие дозиметрии, оно игнорируется всеми нормативными документами. Ни в ОНБ-97 — базовом документе МАГАТЭ, ни в НРБ-99 и ОСПОРБ-99 (Россия) никаких упоминаний о критическом органе нет! Это понятие используется лишь в сфере радиационной медицины, и то - в рабочем порядке.

Критические органы (радиобиологическое), структуры, ткани и органы, повреждение которых при облучении организма вызывает существенное нарушение жизнедеятельности. К критическим органам относятся прежде всего кроветворные органы, в том числе костный мозг, и эпителий желудочно-кишечного тракта, поражения которых могут привести к гибели организма, а также хрусталик глаза и половые железы (облучение гонад может обусловить бесплодие или вызвать наследственные дефекты). Орган является критическим, если он усваивает наибольшее количество радиоактивного вещества, поступившего в организм, играет важную роль в жизнедеятельности всего организма и обладает высокой радиочувствительностью (т. е. повреждается при облучении малой дозой). Для целей ядерной и радиационной медицины установлены три группы критических органов и предельно допустимые дозы (ПДД) при внешнем и внутреннем облучении. для каждой из групп). Группы критических органов (применительно к проблемам ядерной медицины) представлены в **Табл. 7**.

Табл. 7. Предельно допустимые дозы облучения критических органов в мЗв/год

группа критических органов	критические органы	АД	БД	ВД
1	все тело, гонады, хрусталик, красный костный мозг и кроветворные органы	250	50	5,0
2	щитовидная железа, мышцы, жировая ткань, печень, почки, поджелудочная и предстательная железы, желудочно-кишечный тракт и легкие	750	150	15
3	кожа, кости, кисти и предплечья, стопы и лодыжки	1500	300	30

АД - онкобольные, подлежащие на опухолевые заболевания

БД - неонкобольные, обследуемые с диагностической целью

ВД - профилактические исследования

Равномерно по всем органам и тканям распределяются такие радиоактивные изотопы, как H, Cs, K, Zn, Al, C, Po, Co; преимущественно в костной ткани накапливаются Sr, Ra, U, Pb, P; преимущественно в ретикуло-эндотелиальных тканях - Th, Pu, Am; в почках - U; в щитовидной железе - I.

Приведенные данные достаточно условны, т.к. степень усвоения и концентрации зависит и от состава химического соединения, в который входит радионуклид.

Радий концентрируется в костной ткани, что и неудивительно - он является химическим аналогом кальция, преимущественно накапливающимся в костях (среднее содержание радия-226 в различных типах костной ткани человека составляют 0,04-0,2 Бк/кг).

Орган или ткань	Масса		Эффективный радиус, см
	г	% от массы всего тела	
Все тело *	70 000	100	30
Мышцы	30 000	43	30
Кожа и подкожная ткань **	6 100	8,7	0,1
Жировая ткань	10 000	14	20
Кости:			
без костного мозга	7 000	10	5
красный костный мозг	1 500	2,1	—
желтый костный мозг	1 500	2,1	—
Кровь	5 400	7,7	—
Желудочно-кишечный тракт	2 000	2,9	30
Содержимое желудочно-кишечного тракта:			
нисходящая кишка	150	—	5
желудок	250	—	10
тонкая кишка	1 100	—	30
восходящая кишка	135	—	5
Печень	1 700	2,4	10
Мозг	1 500	2,1	15
Легкие	1 000	1,4	10
Лимфоидная ткань	700	1,0	—
Почки	300	0,43	7
Сердце	300	0,43	7
Селезенка	150	0,21	7
Мочевой пузырь	150	0,21	—
Поджелудочная железа	70	0,10	5
Слюнные железы	50	0,071	—
Яички	40	0,057	3
Спинальный мозг	30	0,043	1
Глаза	30	0,043	0,25
Щитовидная железа	20	0,029	3
Зубы	20	0,029	—
Предстательная железа	20	0,029	3
Надпочечники	20	0,029	3
Зобная железа	10	0,014	—
Яичники	8	0,011	3
Гипофиз	0,6	$8,6 \cdot 10^{-6}$	0,5
Щитовидная железа	0,2	$2,9 \cdot 10^{-6}$	0,04
Околощитовидная железа	0,15	$2,1 \cdot 10^{-6}$	0,06
Разные ткани (кровеносные сосуды, хрящи, нервы и т. д.)	390	0,56	—

* Содержимое желудочно-кишечного тракта не учитывается.

** Вес кожи принимается равным 2000 г.

года критическим органом является желудочно-кишечный тракт. Использование f_2 предполагает, что все растворимое радиоактивное вещество, введенное в организм через рану, растворяется в крови. В случае нерастворимого радиоактивного вещества, поступающего в организм через рваную рану, $f=1$. Значения f , f_1 и f_2 приведены в дозиметрических справочниках.

В качестве примера, остановимся на случае, когда при вдыхании растворимого радиоактивного вещества, критическим органом тела являются не легкие и не желудочно-кишечный тракт, а другой орган тела (параметр f) и в случае инъекции через рваную рану, когда в организм вводятся растворимые радиоактивные вещества (параметр f_2).

Табл. 8. Масса и эффективный радиус органов взрослого человека.

2.3. Вывод радионуклида из организма

Дозиметрия от внутренних источников включает вычисление пространственно - временной конфигурации радиационных полей внутри организма, расчет локальных доз (и динамики их изменений в пространстве и времени), оценки биологически эффективной дозы и предсказание возможных медицинских последствий.

Если известен качественный и количественный состав радионуклидов в окружающем человека воздухе (или в питьевой воде), то концентрацию радионуклида в организме или критическом органе можно найти через коэффициенты f_i . Введем обозначения: f - доля радиоактивного вещества, удерживаемая в критическом органе тела, f_1 - доля радионуклида, попадающая из желудочно-кишечного тракта в кровь, f_2 - доля вещества, поступающая из крови в критический орган. При вдыхании нерастворимого вещества $f=0,125$, когда критическим органом являются легкие, и $f=0,625$,

Табл. 9.

Изотоп	Критический орган	f	f_2
^3H (НТО или T_2O)	Весь организм	0,75	1,0
^{14}C (CO_2)	Жировая ткань	0,36	0,5
^{32}P	Кости	0,2	0,3
^{35}S	Кожа	0,074	0,14
^{42}K	Мышцы	0,53	0,75
^{45}Ca	Кости	0,41	0,58
$^{55,59}\text{Fe}$	Кровь	0,65	1,0
^{60}Co	Печень	0,007	0,02
^{89}Sr	Кости	0,22	0,4
$^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$	Кости	0,22	0,4
^{96}Tc	Почки	0,003	0,005
^{210}Po	Селезенка	0,004	0,02
$^{226}\text{Ra}+55\%$ доч. пр.	Кости	0,026	0,075
Th ест	Кости	0,2	0,78
U ест	Почки	0,08	0,33
^{239}Pu	Кости	0,18	0,7

Вследствие радиоактивного распада и минерального обмена происходит уменьшение концентрации каждой порции радионуклида, ассимилированной в организме. Количество радиоактивного изотопа в организме (при однократном введении) уменьшается в результате радиоактивного распада (λ) и биологического выведения (λ_6). Оба процесса идут независимо друг от друга и могут быть охарактеризованы эффективной постоянной выведения $\lambda_{эфф}$, показывающей скорость изменения содержания радиоактивного изотопа в критическом органе:

$$\lambda_{эфф} = \lambda + \lambda_6$$

При этом для расчета поглощенных и эффективных доз, создаваемых в организме или критическом органе (орган преимущественной концентрации), используется понятие эффективного периода полувыведения радионуклидов из организма:

$$T_{эфф} = \frac{T_{1/2} * T_6}{T_{1/2} + T_6}$$

где: $T_{эфф}$ - эффективный период полувыведения, $T_{1/2}$ - период физического полураспада, T_6 - период биологического полувыведения радионуклида в процессе минерального обмена ($T_{эфф}$ - время, за которое количество радиоактивного изотопа в критическом органе уменьшится в два раза).

В **Табл. 9** приведены примеры распределения некоторых изотопов в различных органах и значения $T_{1/2}$, T_6 и $T_{эфф}$.

2.4. Кинетика накопления тканевой дозы

Динамика накопления эквивалентной дозы от излучения радионуклидов, находящихся внутри организма, определяется сочетанием кинетики поступления радионуклида в организм (критический орган) с кинетикой выхода его из организма. Общая доза складывается из дозы, полученной в ходе процесса поступления радионуклида (зависит от времени, в течение которого человек дышал загрязненным воздухом, пил радиоактивную воду, принимал пищу) и дозы, полученной уже после того, как поступление радиоактивных веществ было прекращено (зависит от времени пребывания в экологически чистом месте, после удаления из опасной зоны). В ядерной медицине доза, полученная пациентом, зависит от времени, в течение которого он получал радиофармпрепарат, и времени, прошедшего после прекращения лечения. При попадании радионуклида сквозь рваную рану, поступление радионуклида считается мгновенным, и доза определяется временем залечивания раны.

Опасность радиоактивных веществ определяется пятью случаями: 1. Вдыхание **растворимого** радиоактивного вещества, когда существенную роль играет критический орган (в том числе – организм в целом); 2. Введение **растворимого** вещества в организм через рану; 3. Введение **нерастворимого** радиоактивного вещества через рваную рану ($f=1$ и весь радионуклид остается в компактной форме в ткани весом 10^{-3} г на участке, непосредственно прилегающем к ране); 4. Вдыхание **нерастворимого** радиоактивного вещества (критический орган – легкие); 5. Вдыхание **нерастворимого** радиоактивного вещества, когда часть желудочно-кишечного тракта является критическим органом.

С точки зрения кинетики накопления дозы возможны два предельных случая: 1. Однократная доза, когда время поступления радионуклида в организм очень мало (экспериментатор в лаборатории разик вдохнул радон и пошел домой отдохнуть) и 2. Хроническое поступление, когда человек постоянно (иногда – всю жизнь) пьет радиоактивную воду и дышит радиоактивным воздухом (например, жители Цхалтубо, Белокурихи, Баден-Бадена и других курортов). Для удобства, мы выделим эти два крайних случая, хотя и коротко обсудим ситуацию в целом.

Формулы для расчета тканевых доз за счет α - или β -излучателей *

При постоянной концентрации через время t после введения	$D = 5,12 \cdot 10^7 C E t$
При уменьшении концентрации изотопа вследствие биологического выведения и радиоактивного распада через время t после окончания поступления изотопа в орган	$D = 5,12 \cdot 10^7 C_0 \frac{1 - e^{-\lambda t}}{\lambda} E$
Доза за достаточно большой промежуток времени, когда практически весь радиоактивный изотоп удалится из организма	$D = 5,12 \cdot 10^7 \frac{C_0 E}{\lambda}$
Доза за время t , малое по сравнению с эффективным периодом полувыведения $T_{эфф}$, когда изотоп медленно распадается и выводится	$D = 5,12 \cdot 10^7 C_0 E t$

* D – тканевая доза, рад; C – концентрация, кюри/г; E – средняя энергия частиц

Тканевая доза облучения критического органа за счет α - или β -излучателей за время t дней, может быть вычислена по формулам, приведенным в **Табл. 9**.

Табл. 10. Формулы для расчета тканевых доз за счет α - или β -излучателей ($\lambda = \lambda_{эфф}$).

В **Табл. 10** верхняя строчка отвечает так называемой хронической дозе облучения, когда скорость поступления радионуклида полностью сконцентрирована скоростью вывода, так что в организме (критическом органе) поддерживается постоянная концентрация радионуклида. Доза – линейно возрастает во времени. Остальные случаи –

варианты дозы от однократного поступления, когда время введения в организм радионуклида пренебрежимо мало по сравнению с временем пребывания радионуклида в организме. Отметим, что в разных ситуациях доза может возрастать по линейному закону или по закону $1 - \exp(-\lambda t)$ (линейность – при малых временах). При больших временах (организм избавился от радионуклида) доза стремится к постоянному значению, величина которого пропорциональна активности изотопа, средней энергии излучения и периоду выведения $T_{эфф}$.

Эквивалентная тканевая доза при поступлении в организм нескольких радионуклидов (или одного радионуклида, но со сложной схемой распада):

$$D_t = 73,8 C_0 T_{эфф} \sum_i n_i * E_i \left[\left(1 - e^{-\frac{0,693t}{T_{эфф}}} \right) W_{R,i} \right]$$

где $T_{эфф}$ и t измерены в сутках.

Не представляет труда найти дозу, получаемую при полном распаде введенного в ткань радиоактивного вещества. Для этого в формулах следует заменить активность C_0 , выраженную в расп/с, на параметр $C_0/\lambda_{1/2}$.

Мощность тканевой дозы за счет γ -излучателей, равномерно распределенных по телу человека:

$$P_\gamma = K_\gamma C 2\pi(76,2 - 465\mu),$$

где P_γ - мощность тканевой дозы, рад/ч; K_γ - γ -постоянная изотопа рсм²/чмкюри; C – концентрация изотопа мкюри/см²; μ - коэффициент ослабления широкого пучка γ -излучения в ткани.

При расчете дозы от внутренних источников γ -радиации тело человека имитируется тканеэквивалентным цилиндром высотой 75 и радиусом 15 см.

Расчет мощности дозы от γ -излучающего изотопа при равномерном распределении его в критическом органе осложнен тем, что в этом случае часть энергии излучения не поглощается в критическом органе, облучает соседние участки тела и выходит за пределы организма.

Приближенный расчет мощности дозы от γ -излучателя можно провести двумя путями.

Для удобства и простоты расчета принимают, что отдельные органы человека имеют форму шара, цилиндра, плоскости и т. п. с размерами, близкими к размерам соответствующих органов, В этом случае можно рассчитать мощность дозы в центре геометрической фигуры, принимая, что радиоактивный изотоп равномерно распределен по объему критического органа. Мощность дозы γ -излучения в центре критического органа (в р/ч) равна

$$P_\gamma = 10^{-3} K_\gamma * C \rho \Gamma$$

где ρ — плотность критического органа (в г/см³); Γ — геометрический фактор, учитывающий геометрическую форму и размер облучаемого органа (в см).

Например, для сферы радиуса r (в см), заполненной радиоактивным изотопом с концентрацией C мккюри/г, мощность дозы (в р/ч) в центре подсчитывается по формуле:

$$P_\gamma = \int_0^r 10^{-3} * K_\gamma * C \rho \frac{e^{-\mu x}}{x^2} 4\pi x^2 dx$$

интегрируя, получаем

$$P_\gamma = 10^{-3} * K_\gamma C \rho \frac{4\pi}{\mu} (1 - e^{-\mu r})$$

В этом случае геометрический фактор (в см) равен

$$\Gamma = \frac{4\pi}{\mu} (1 - e^{-\mu r})$$

При малых размерах сферы ($r \leq 10$ см) это выражение упрощается, и для центра шара получаем:

$$\Gamma = 4\pi r$$

Аналогичные выражения могут быть получены и для других геометрических фигур.

В Табл. 11 приведены значения геометрического фактора для сферы и цилиндра различных размеров.

Сфера			Цилиндр			
$r, \text{ см}$	$V, \text{ см}^3$	$\Gamma, \text{ см}$	$r, \text{ см}$	$h, \text{ см}$	$V, \text{ см}^3$	$\Gamma, \text{ см}$
1	4,2	12,6	3	10	293	45,5
2	33,5	25,2	5	16	1 260	73
3	103	37,8	8	30	6 000	108
4	278	50,4	12	40	18 000	156
6	905	75,6	20	60	76 000	214
8	2 140	101				
10	4 180	126				

Табл. 11. Значения величин геометрического фактора Γ для сферы и цилиндра различных размеров.

В некоторых случаях необходимо знать среднюю мощность дозы в критическом органе (или во всем организме) при внутреннем γ -облучении. Для расчета

мощности дозы вводят среднюю величину геометрического фактора $\bar{\Gamma}$. Для сферы $r < 10$ см средний геометрический фактор $\bar{\Gamma} = \frac{3}{4}\Gamma$ или $\bar{\Gamma} = 3\pi r$ т. е. средняя мощность дозы составляет 75% от мощности дозы в центре сферы.

Если радиоактивный изотоп распределен равномерно во всем организме, то для расчета мощности дозы могут быть использованы значения $\bar{\Gamma}$, приведенные в Табл. 12.

Масса, кг	Рост, 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	128	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

Табл. 12. Значения среднего геометрического фактора $\bar{\Gamma}$ (в см) для человека.

Доза γ -излучения (в р) вычисляется по формуле:

$$D_t = 10^{-3} K_\gamma C_0 \rho \Gamma \frac{T_{эфф}}{0,693} \left(1 - e^{-\frac{0,693t}{T_{эфф}}} \right)$$

где $T_{эфф}$ берется в часах.

Критический орган, содержащий γ -излучатель, не только облучается, но и облучает соседние органы и ткани. Коротко обсудим эту ситуацию.

Пусть γ -излучающий радионуклид равномерно распределен по объему биологической ткани и пусть его начальная концентрация C_0 Бк/г, тогда мощность дозы в Гр/час от некоторого элемента dV в точке, находящейся на расстоянии r от этого элемента будет равна:

$$P = \frac{K_\gamma C_0 e^{-\mu r} dV}{r^2},$$

а мощность дозы, создаваемая всем объемом

$$P = K_\gamma C_0 \int \frac{e^{-\mu r}}{r^2} dV = K_\gamma C_0 g$$

Интеграл g можно найти приближенно, т.к. для гамма-лучей μ мало.

Пусть теперь критический орган имеет форму шара радиуса r_0 . Тогда:

$$g = \int_0^{r_0} \frac{e^{-\mu r}}{r^2} 4\pi r^2 dr = \frac{4\pi}{\mu} [1 - e^{-\mu r_0}] \approx 4\pi r_0$$

Если критический орган имеет форму цилиндра высотой h и радиуса r_0 , то приближенно

$$g = 2\pi \left\{ h \ln \left(1 + \frac{r_0^2}{h^2} \right) + 2r_0 \arctg \frac{h}{r_0} - \mu \left[h \sqrt{r_0^2 + h^2} - h^2 + r_0^2 \left(\ln \left[h^2 + \sqrt{r_0^2 + h^2} \right] - \ln r_0 \right) \right] \right\}$$

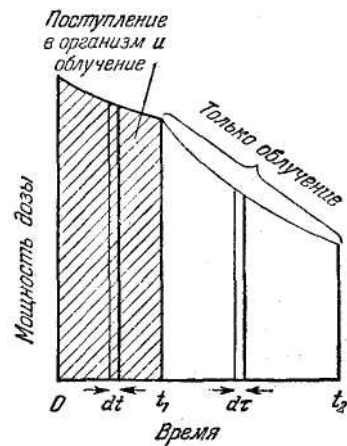
При $h=30$ см, $r_0=20$ см, $g=314-4140\mu \approx 190/$

Если в объекте облучения одновременно находятся α -, β - и γ -излучающие изотопы, то доза (в бэрад), полученная объектом облучения, является суммой соответствующих доз:

$$D_{\alpha,\beta,\gamma} = D_\alpha + D_\beta + D_\gamma$$

Коротко остановимся на уравнениях дозы, полученной в результате однократного облучения радиоактивным изотопом в разных практически важных ситуациях. Рассмотрим некоторые из упомянутых выше ситуаций.

Рис. 3. Изменение во времени мощности дозы в критическом органе.



Случай 1. Вдыхание растворимого радиоактивного вещества. В этом случае предполагается, что определенная доля f от C (мккюри) поступает в критический орган тела, откуда она экспоненциально выводится как вследствие радиоактивного распада, так и вследствие биологического удаления. Доза определяется уравнением

$$D = C \int_0^{t_1} \int_t^{t_2} f e^{-\lambda_{1/2} t} e^{-\lambda_{эфф}(\tau-t)} dt d\tau = C \int_0^{t_1} \int_t^{t_2} f e^{-\lambda_6 t} e^{-\lambda_{эфф} \tau} dt d\tau$$

Здесь D - доза (в бэр) — за счет излучения от поступившего в организм радионуклида (C - в мккюри); t_1 - время поступления радиоактивного вещества в организм, t_2 — время после окончания поступления в организм радионуклида; $\lambda_{эфф}$, $\lambda_{1/2}$ и λ_6 - соответственно коэффициенты общего выведения радиоактивного изотопа из организма, радиоактивного распада и биологического удаления.

Интегрируя, получим:

$$D = C \int_0^{t_1} \frac{f}{\lambda_{эфф}} e^{\lambda_0 t} \left(e^{-\lambda_{эфф} t} - e^{-\lambda_{эфф} t_2} \right) dt = C \int_0^{t_1} \frac{f}{\lambda} \left(e^{-\lambda_{1/2} t} - e^{-\lambda_{эфф} t} \right) dt =$$

$$= \frac{-Cf}{\lambda_{эфф}} \left[\frac{e^{-\lambda_{1/2} t}}{\lambda_{1/2}} + \frac{e^{-\lambda_{эфф} t} e^{-\lambda_0 t}}{\lambda_0} \right]_0^{t_1} = \frac{Cf}{\lambda_{эфф}} \left[\frac{1 - e^{-\lambda_{1/2} t_1}}{\lambda_{1/2}} + \frac{e^{-\lambda_{эфф} t_2} (1 - e^{-\lambda_0 t_1})}{\lambda_0} \right]$$

Случай 2. Введение растворимого вещества в организм через рану В этом случае предполагается, что растворимое радиоактивное вещество в количестве С (мккюри) поступает в организм через рану в момент времени $t=0$ и что доля f_2 этого количества с кровью достигает критического органа тела. Здесь вещество остается в течение времени t_2 и обуславливает дозу D, определяемую уравнением

$$D = Cf_2 \int_0^{t_2} e^{-\lambda_{эфф} t} dt = \frac{Cf_2}{\lambda_{эфф}} (1 - e^{-\lambda_{эфф} t_2})$$

2.4.3. Хроническая доза.

Как уже упоминалось выше, мощность тканевой дозы Р, создаваемая содержащимися в органе α - и β -излучателями с удельной концентрацией С и средней энергией α - или β -частиц Е МэВ, может быть вычислена по формуле:

$$P = kCE,$$

Константа А в зависимости от выбора единиц удельной активности и мощности дозы

Удельная активность в единицах	Мощность дозы в единицах						
	эрг/сек·г	рад/сек	рад/мин	рад/ч	рад/сутки	рад/неделя	рад/год
расп/сек·г	$1,60 \cdot 10^{-6}$	$1,60 \cdot 10^{-8}$	$9,60 \cdot 10^{-7}$	$5,76 \cdot 10^{-5}$	$1,38 \cdot 10^{-3}$	$9,65 \cdot 10^{-3}$	0,505
расп/мин·г	$2,67 \cdot 10^{-8}$	$2,67 \cdot 10^{-10}$	$1,6 \cdot 10^{-8}$	$9,60 \cdot 10^{-7}$	$2,30 \cdot 10^{-5}$	$1,61 \cdot 10^{-4}$	$8,37 \cdot 10^{-3}$
мккюри/г	$5,92 \cdot 10^{-2}$	$5,92 \cdot 10^{-4}$	$3,55 \cdot 10^{-2}$	2,13	$5,12 \cdot 10^{-1}$	$3,58 \cdot 10^2$	$1,86 \cdot 10^4$
мкюри/г	$5,92 \cdot 10^1$	$5,92 \cdot 10^{-1}$	$3,55 \cdot 10^1$	$2,13 \cdot 10^3$	$5,12 \cdot 10^{-4}$	$3,58 \cdot 10^5$	$1,86 \cdot 10^7$
кюри/г	$5,92 \cdot 10^4$	$5,92 \cdot 10^2$	$3,55 \cdot 10^4$	$2,13 \cdot 10^6$	$5,12 \cdot 10^{-7}$	$3,58 \cdot 10^8$	$1,86 \cdot 10^{10}$

где k – константа, зависящая от выбора единиц удельной активности изотопа и мощности дозы (**Табл. 12**)

Табл. 12. Константа k в зависимости от выбора единиц удельной активности и мощности дозы

Доза, полученная критическим органом с учетом сложной схемы распада α - и β -излучающего радионуклида, может быть

определена из условия полного поглощения излучения в критическом органе. Если масса критического органа m (в г) и количество радиоактивного изотопа в критическом органе А (в мккюри), то мощность дозы (в бэрад/сек) равна

$$P(\alpha, \beta) = 1,60 \cdot 10^{-8} \frac{A}{m} * 3,7 \cdot 10^4 \sum_i n_i * E_i * W_R = 5,92 \cdot 10^{-4} C \sum_i n_i * E_i * W_R$$

где n_i — относительное содержание частиц с энергией E_i в спектре (для β -частиц $E_i = \bar{E}_{\beta, i}$).

Если известно годовое поступление радионуклидов в организм человека (выраженное в единицах активности, например, беккерелях, то оценку годовой эффективной дозы внутреннего облучения, полученную этим организмом, можно получить, умножив эту величину на соответствующий дозовый коэффициент (**Табл. 13** – для случая ингаляционного введения радионуклида и **Табл.** для случая перорального введения).

Табл. 13 Значения дозовых коэффициентов для расчета максимальной ожидаемой эффективной дозы внутреннего облучения при ингаляционном поступлении радионуклида

Радионуклид	Дозовый коэффициент мбэр/Бк (мЗв/Бк)
Уран-233	3,7 (0,037)
Уран-235	3,3 (0,033)
Плутоний-238	6,3 (0,063)
Плутоний-239, 240	6,9 (0,069)
Плутоний-241	0,13 (0,0013)
Америций-241	7,1 (0,071)
Америций-242m	6,7 (0,067)
Америций-243	7,1 (0,071)
Нептуний-237	7,8 (0,078)
Кюрий-243	5,0 (0,050)
Кюрий-244	4,0 (0,040)

Кюрий-245	7,3 (0,073)
Кюрий-247	6,6 (0,066)
Калифорний-249	8,6 (0,086)
Калифорний-251	8,7 (0,087)
Стронций-90	0,35 (3,5*10 ⁻⁴)
Йод-129	0,078 (7,8*10 ⁻⁵)
Цезий-137	8,6*10 ⁻⁴ (8,6*10 ⁻⁶)

Примечание. Из разных классов растворимости (транспортабельности) радионуклида в легочной ткани человека выбраны те, которые соответствуют максимальным значениям дозовых коэффициентов.

Из **Табл. 14** видно, что наиболее опасным радионуклидом ингаляционное поступление которого в организм человека приведет к формированию максимальной дозы внутреннего облучения при прочих равных условиях, является калифорний-251.

Табл. 14. Значения дозовых коэффициентов для расчета максимальной ожидаемой эффективной дозы внутреннего облучения при пероральном поступлении радионуклидов

Радионуклид	Дозовый коэффициент мБэр/Бк (мЗв/Бк)
Уран-233	5,0*10 ⁻³ (5,0*10 ⁻⁵)
Уран-235	4,0*10 ⁻³ (4,0*10 ⁻⁵)
Плутоний-238	8,8*10 ⁻² (8,8*10 ⁻⁴)
Плутоний-239, 240	9,7*10 ⁻² (9,7*10 ⁻⁴)
Плутоний-241	1,9*10 ⁻³ (1,9*10 ⁻⁴)
Америций-241	5,8*10 ⁻² (5,8*10 ⁻⁴)
Америций-242m	5,5*10 ⁻² (5,5*10 ⁻⁴)
Америций-243	5,8*10 ⁻² (5,8*10 ⁻⁴)
Нептуний-237	6,4*10 ⁻² (6,4*10 ⁻⁴)
Кюрий-243	4,0*10 ⁻² (4,0*10 ⁻⁴)
Кюрий-243	3,3*10 ⁻² (3,3*10 ⁻⁴)
Кюрий-245	5,9*10 ⁻² (5,9*10 ⁻⁴)
Кюрий-247	5,4*10 ⁻² (5,4*10 ⁻⁴)
Калифорний-249	7,0*10 ⁻² (7,0*10 ⁻⁴)
Калифорний-251	7,1*10 ⁻² (7,1*10 ⁻⁴)
Стронций-90	2,7*10 ⁻³ (2,7*10 ⁻⁵)
Йод-129	1,2*10 ⁻² (1,2*10 ⁻⁴)
Цезий-137	1,5*10 ⁻³ (1,4*10 ⁻⁵)

Как видно из **Табл. 14**, при прочих равных условиях наиболее опасными радионуклидами являются плутоний-239 и плутоний-240.

В качестве примера, приведем способы оценки хронической дозы от радия-226 и калия-40, накопившихся в организме.

Доза облучения костной ткани за счет инкорпорированного в костях ²²⁶Ra определяется по формуле:

$$D_{Ra} = 2,6 * C_{Ra} \text{ мБэр/год,}$$

где C_{Ra} – содержание радия в костях, г/г костной ткани.

Замечание. Средняя доза на костный мозг, обусловленная β -активностью продуктов распада радия, составляет 1,3% дозы в костной ткани.

Наибольшая мощность тканевой дозы в организме за счет γ -излучения ⁴⁰K:

$$P_{\gamma} = 8,8 * 10^9 \text{ С Мрад/сутки.}$$

где C выражено в кюри/г ткани.