

### 3. ДОЗА ОТ РАДИОАКТИВНЫХ ГАЗОВ

#### 3.1 Техногенные газообразные радионуклиды

Радиоактивные газы реакторного происхождения: изотопы аргона, криптона, ксенона, йода, а также С-14 и тритий вследствие разных причин могут попадать в воздух производственных помещений и выбрасываться в атмосферу, создавая опасность для здоровья людей. В случае контакта с радиоактивными газами в профессиональных условиях тканевые дозы в теле человека формируются в результате поступления (йод, тритий) через органы дыхания и кожный покров, а также внешнего излучения от объемных источников ограниченных размеров (радиоактивные изотопы аргона, криптона и ксенона). Сложение доз от внутреннего и внешнего облучения может привести к крайне нежелательным последствиям.

Табл. . Радиационная характеристика газообразных изотопов

Изотоп	Период полураспада	Максимальная энергия β-частиц, МэВ	Энергия γ-квантов, МэВ	Изотоп	Период полураспада	Максимальная энергия β-частиц МэВ	Энергия γ-квантов, МэВ
<sup>3</sup> H	12,26 года	0,0186	—	<sup>133</sup> Xe	5,27 дня	0,346	0,081 (37%)
<sup>14</sup> C	5730 лет	0,156	—	<sup>133m</sup> Xe	2,3 дня	—	0,233 (14%)
<sup>41</sup> Ar	1,83 ч	2,49 (0,8%), 1,198 (99,2%)	1,293 (99%)	<sup>135</sup> Xe	9,14 ч	0,92	0,250 (91%), 0,61 (3%)
<sup>83m</sup> Kr	1,86 ч	—	0,009 (9%)	<sup>135m</sup> Xe	15,6 мин	—	0,527 (80%)
<sup>86</sup> Kr	10,76 года	0,67	0,514 (0,41%), 0,150 (74%), 0,305 (13%)	<sup>137</sup> Xe	3,9 мин	4,1	0,455 (33%)
<sup>85m</sup> Kr	4,4 ч	0,82	—	<sup>138</sup> Xe	17,5 мин	2,4	Сложный
<sup>87</sup> Kr	76 мин	3,8	0,403 (84%), 0,85 (16%), 2,57 (35%)	<sup>139</sup> Xe	43 сек	—	»
<sup>88</sup> Kr	2,8 ч	2,8	0,166 (7%), 0,191 (35%), 0,36 (5%), 0,85 (23%), 1,55 (14%), 2,19 (18%), 2,4 (35%)	<sup>140</sup> Xe	16,0 сек	—	0,13
<sup>89</sup> Kr	3,18 мин	4,0	Сложный	<sup>131</sup> I	8,05 дня	0,806	0,080 (2,6%), 0,284 (5,4%), 0,364 (8,2%), 0,637 (6,8%), 0,723 (1,6%)
				<sup>132</sup> I	2,26 ч	2,12	—
				<sup>133</sup> I	20,3 ч	1,27	0,53 (90%)
				<sup>134</sup> I	52,0 мин	2,43	—
				<sup>135</sup> I	6,68 ч	1,4	Сложный

Тканевые дозы, полученные организмом при его нахождении в поле действия радиоактивных выбросов в атмосферу, зависят от мощности выброса, изотопного состава, метеорологических параметров, которые влияют на характер распределения радиоактивных веществ в приземном слое атмосферы, и т.д. Отметим, что при попадании <sup>14</sup>C и <sup>131</sup>I в окружающую среду вклад аэрогенного поступления в тканевую дозу при внутреннем облучении становится в ряде случаев второстепенным. Определяющую роль здесь начинает играть поступление с пищевыми продуктами.

#### 3.1.1 Внутреннее облучение (криптон и ксенон)

Как уже упоминалось, если выведение радионуклида происходит по экспоненциальному закону, то кинетика накопления его в критическом органе при непрерывном поступлении выражается уравнением:

$$C_t = C_0 \frac{F}{\lambda_{эфф1}} (1 - e^{-\lambda_{эфф1} t_1})$$

Изотоп	Легкие	Кровь	Мышцы	Жировая ткань
<sup>79</sup> Kr	0,27	0,006	0,007	0,6
<sup>85m</sup> Kr	3,6	0,09	0,09	0,7
<sup>85</sup> Kr	3,7	0,084	0,08	0,9
<sup>81</sup> Kr	20	0,45	0,4	2,2
<sup>89</sup> Kr	18	0,42	0,14	0,2
<sup>90</sup> Kr	19	0,45	0,03	0,03
<sup>91</sup> Kr	4,5	0,1	0,009	0,009
<sup>131m</sup> Xe	2,0	0,17	0,13	1,4
<sup>133m</sup> Xe	2,5	0,21	0,13	0,5
<sup>133</sup> Xe	2,1	0,18	0,14	1,5
<sup>135m</sup> Xe	1,0	0,085	0,02	0,03
<sup>135</sup> Xe	4,6	0,4	0,26	2,0
<sup>137</sup> Xe	18	1,5	0,12	0,16
<sup>138</sup> Xe	12	1,0	0,27	0,45
ПДД, мБэр/неделя	300	100	300	300

Табл. 15. Основные параметры, характеризующие накопление, распределение и выведение изотопов криптона и ксенона из организма человека.

Здесь  $C_t$  – концентрация радиоактивного изотопа в органе или ткани к моменту времени  $t_1$ ,  $C_0$  – концентрация изотопа в воздухе,  $F$  – скорость поступления радионуклида в орган или ткань,  $\lambda_{эфф1} = \lambda_{\beta 1} + \lambda_{1/2}$  – эффективная постоянная выведения в процессе экспозиции человека в атмосфере радионуклида.

Скорость поступления радионуклида  $F$  удобно выражать через коэффициент распределения стабильного элемента  $f_c$ , когда  $\lambda_{1/2} = 0$ . При установившемся равновесии, когда скорость поступления данного элемента равна скорости его выведения из органа или ткани ( $t_1 \rightarrow \infty$ ):

$$C_t = C_0 \frac{E}{\lambda_0}$$

С другой стороны, концентрацию данного элемента в органе или ткани при установившемся равновесии можно определить из соотношения

$$C_t = C_0 f_c$$

Тогда  $F = f_c \lambda_{01}$ .

Теперь имеем:

$$C_t = C_0 f_c \frac{\lambda_{01}}{\lambda_{эфф1}} \left(1 - e^{-\lambda_{эфф1} t_1}\right)$$

После прекращения контакта человека с радионуклидом его концентрация в критическом органе выражается соотношением:

$$C_t = C_0 f_c \frac{\lambda_{01}}{\lambda_{эфф1}} \left(1 - e^{-\lambda_{эфф1} t_1}\right) e^{-\lambda_{эфф2} t_2}$$

где  $\lambda_{эфф2} = \lambda_{02} + \lambda_{1/2}$  – эффективная постоянная выведения после экспозиции в атмосфере радионуклида,  $t_1$  – время после экспозиции.

**Табл. 16.** Тканевые дозы в теле человека (мрад/неделя), создаваемые радиоактивными изотопами криптона и ксенона при внутреннем облучении за 36-часовую рабочую неделю при  $C_0 = 10^{-7}$  кюри/л.

Органы и ткани	Изотопы криптона			Изотопы ксенона		
	$f_c, \text{ л/кг}$	$T_{01}$	$T_{02}$	$f_c, \text{ л/кг}$	$T_{01}$	$T_{02}$
Жировая ткань	0,46	1,4 ч	2,7 ч	1,4	5 ч	6,3 ч
Мышцы и другие ткани	0,047	8 мин	8 мин	0,13	0,4 ч	0,7 ч
Кровь	0,046	30 сек	30 сек	0,17	30 сек	30 сек
Легкие	2	30 сек	30 сек	2	30 сек	30 сек

$T_{01}$  – биологический период полувыведения, когда человек контактирует с газом.

$T_{02}$  – биологический период полувыведения после контакта с газом.

Интегральная доза при внутреннем

облучении

$$D = k_a E \Gamma_a C_0 f_c \frac{\lambda_{01}}{\lambda_{эфф1}} \left[ \int_0^{t_1} \left(1 - e^{-\lambda_{эфф1} t_1}\right) dt_1 + \left(1 - e^{-\lambda_{эфф1} t_1}\right) \int_0^{t_2} e^{-\lambda_{эфф2} t_2} dt_2 \right]$$

где  $k_a$  – коэффициент, зависящий от выбора единиц,  $E$  – энергия излучения,  $\Gamma_a$  – фактор, учитывающий поглощение излучения в органе или ткани.

После интегрирования и подстановки пределов имеем

$$D = 0,59 E \mu C_0 f_c \frac{\lambda_0}{\lambda_{эфф1}} \left\{ t_1 - \left(1 - e^{-\lambda_{эфф1} t_1}\right) \left[ \frac{1}{\lambda_{эфф1}} - \frac{1}{\lambda_{эфф2}} \left(1 - e^{-\lambda_{эфф2} t_2}\right) \right] \right\}$$

Здесь приняты следующие единицы измерения:  $D$  (рад),  $C_0$  (кюри/л),  $f_c$  (л/кг),  $E$  (МэВ).

При расчетах для  $\beta$ -излучения и электронов конверсии, фактор  $\Gamma_a = 1$ . Для  $\gamma$ -излучения фактор  $\Gamma_a$  рассчитывается по рекомендациям МКРЗ:

$$\Gamma_a = \frac{E_\gamma}{E_{\gamma\text{макс}}} = 1 - e^{-\mu_e x},$$

где  $E_\gamma$  – энергия  $\gamma$ -излучения, поглощенная в органе или ткани, МэВ,  $E_{\gamma\text{макс}}$  – максимальная энергия  $\gamma$ -излучения, МэВ,  $\mu_e$  – линейный коэффициент электронного преобразования  $\gamma$ -излучения,  $\text{см}^{-1}$ ,  $x$  – эффективный радиус критического органа, см.

Некоторые параметры, характеризующие кинетику поступления РБГ в организм человека приведены в **Табл. 16**, тканевые дозы в теле человека, создаваемые изотопами криптона и ксенона при внутреннем облучении приведены в **Табл. 16**.

Известно, что после распада некоторых изотопов криптона и ксенона образуются весьма радиационноопасные изотопы:  $^{89}\text{Sr}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и др. Эти радиоактивные изотопы могут накапливаться внутри организма в результате распада изотопов криптона и ксенона, распределенных в органах или тканях человека. Величину активности дочерних продуктов  $A_{\text{дп}}$ , накопленную в организме человека в целом за время экспозиции  $t_1$ , можно оценить по формуле:

$$A_{\text{дп}} = C_0 \sum_{i=1}^n f_{ci} m_i \frac{\lambda_{01}}{\lambda_{эфф1}} \lambda_{1/2\text{дп}}$$

где  $m_i$  – масса  $i$ -критического органа,  $\lambda_{1/2\text{дп}}$  – постоянная радиоактивного распада дочернего продукта.

Рассчитанные активности  $^{89}\text{Sr}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$ , которые в конечном счете образуются из  $^{89}\text{Kr}$ ,  $^{90}\text{Kr}$  и  $^{137}\text{Xe}$  соответственно приведены в **Табл. 17**. Очевидно, что накопление дочерних продуктов распада  $^{89}\text{Sr}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  примерно в 100 раз меньше предельно допустимого поступления (ПДП) этих элементов за неделю, если

исходная концентрация материнских изотопов в воздухе будет составлять  $10^{-7}$  кюри/л. Иными словами, накопление  $^{89}\text{Sr}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в организме человека будет сравнимо с предельнодопустимым накоплением за неделю при концентрации  $^{89}\text{Kr}$ ,  $^{90}\text{Kr}$  и  $^{137}\text{Xe}$  в воздухе равной  $10^{-5}$  кюри/л и более.

Материнский изотоп	Дочерний продукт	Накопление, мкюри/год	ПДП для персонала, мкюри/год
$^{89}\text{Kr}$ $^{90}\text{Kr}$ $^{137}\text{Xe}$	$^{89}\text{Sr}$ $^{90}\text{Sr}$ $^{137}\text{Cs}$	0,18 $3,5 \cdot 10^{-4}$ $1,8 \cdot 10^{-3}$	69 2,9 36

**Табл. 17.** Накопление дочерних продуктов распада некоторых изотопов криптона и ксенона в организме человека при исходной концентрации  $10^{-7}$  кюри/л.

### 3.1.2 Внешнее облучение (инертные газы)

**$\beta$ -излучение.** Формула (Левингер) для расчета мощности глубинной дозы от полубесконечного источника  $\beta$ -излучения имеет вид:

$$P(d) = 0,5P_{\beta}\alpha \left\{ c^2 \left[ 3 - e^{-\frac{vd}{c}} - \frac{vd}{c} \left( 2 + \ln \frac{c}{vd} \right) \right] + e^{1-vd} \right\};$$

при  $d \geq \frac{c}{v} \left[ 3 - e^{-\frac{vd}{c}} - \frac{vd}{c} \left( 2 + \ln \frac{c}{vd} \right) \right] \equiv 0;$

$$P_{\beta} = 0,592 \frac{1}{\rho} C_0 \bar{E}_{\beta}$$

Здесь  $d$  – толщина поглощающего слоя, г/см<sup>2</sup>,  $\rho$  – плотность источника, г/см<sup>3</sup>,  $C_0$  – концентрация радиоактивного вещества в источнике, кюри/л,  $\bar{E}_{\beta}$  – средняя энергия  $\beta$ -спектра, МэВ.

Значения  $v$  и  $c$  для свободного воздуха определяются формулой:

$$v = \frac{16}{(E_0 - 0,036)^{1,4}} \left( 2 - \frac{\bar{E}_{\beta}}{\bar{E}_{\beta}^*} \right);$$

$$c = 3,11 e^{-0,55E_0},$$

где  $E_0$  – максимальная энергия  $\beta$ -спектра, МэВ;  $\bar{E}_{\beta}^*$  – средняя энергия для гипотетического разрешенного спектра, имеющего максимальную энергию  $E_0$ .

Отношение  $\bar{E}_{\beta} / \bar{E}_{\beta}^*$  для разрешенного спектра равно единице. Для легких тканей  $v$  и  $c$  определяются формулами:

$$v = \frac{18,2}{(E_0 - 0,036)^{1,37}} \left( 2 - \frac{\bar{E}_{\beta}}{\bar{E}_{\beta}^*} \right)$$

$$c = 1,5 \quad \begin{matrix} 0,17 < E_0 < 0,5 & \text{МэВ} \\ 0,5 \leq E_0 < 1,5 & \text{МэВ} \\ 1 & 1,0 \leq E_0 < 3 & \text{МэВ} \end{matrix}$$

Формула Левингера пригодна для расчета глубинных доз в центре полусферического радиоактивного облака, размеры которого больше или сравнимы с максимальным пробегом  $\beta$ -частиц. Для случая, когда размеры облака меньше максимального пробега  $\beta$ -частиц, справедливо следующее выражение для мощности дозы:

$$P(d) = 0,5P_{\beta}\alpha \left\{ c^2 \left[ 3 - e^{-\frac{vd}{c}} - \frac{vd}{c} \left( 2 + \ln \frac{c}{vd} \right) \right] + e^{1-vd} - e^{1-vr_0} (1 + vr_0 - vd) \right\},$$

где  $r_0$  – радиус полусферического радиоактивного облака, г/см<sup>2</sup>;  $\alpha$  – постоянный множитель.

Для приближенного расчета глубинных доз можно также использовать функцию ослабления от точечного источника  $\beta$ -излучения, описываемую простой экспонентой. Глубинная доза  $\beta$ -излучения от полусферического облака произвольного радиуса:

$$P(d) = 0,5P_{\beta} \left[ e^{-\mu'd} + \mu' d Ei(-\mu d) - e^{-\mu(r_0+d)} - \mu' d Ei(-\mu'(r_0+d)) \right]$$

где  $\mu'$  – массовый коэффициент ослабления, см<sup>2</sup>/г,  $Ei$  – интегрально-показательная функция.

Если радиус полусферического облака больше максимального пробега  $\beta$ -частиц, то

$$P(d) = 0,5P_{\beta} \left[ e^{-\mu d} + \mu d Ei(-\mu d) \right]$$

**Электроны конверсии.** Наряду с дозами, создаваемыми внешним  $\beta$ -излучением радиоактивных газов, необходимо также учитывать вклад от конверсионных электронов. Мощность глубинной дозы от объемного источника электронов

$$P(d) = 0,5 \left[ 1 - \bar{P}(E) \right] \int_E \frac{N(E)}{R(E)} \left[ 1 - \frac{d}{R(E)} \right],$$

где

$$N(E) = \frac{\int_{E_0}^{E_0} \frac{C_0}{\rho} \delta(E - E_0) dE}{\left( \frac{dE}{dx} \right)_a}, \quad \frac{\text{частиц}}{\text{МэВ} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{сек}}; N(E) - \text{поток электронов, достигающих поверхности}$$

биологической ткани;  $\bar{P}(E)$  - энергетический коэффициент обратного рассеивания. Для случая низкоатомных сред  $\bar{P}(E) \ll 1$ ;  $R(E)$  - максимальный пробег электронов в ткани с энергией  $E$ , г/см<sup>2</sup>;  $\left( \frac{dE}{dx} \right)_a$  - энергетические потери в воздухе, МэВ.см<sup>2</sup>/г;  $C_0$  - концентрация (удельная активность), кюри/л;  $\rho$  - плотность источника, г/см<sup>3</sup>;  $E_0$  - энергия конверсионных электронов, МэВ;  $d$  - толщина поглотителя, г/см<sup>2</sup>;  $\delta(E-E_0)$  - дельта-функция.

В Табл. 18 приведены данные о тканевых дозах при внешнем облучении  $\beta$ -частицами радиоактивных газов за 36-часовую рабочую неделю для эффективного радиуса помещения, равного 5 м.

Изотоп	Кожа	Подкожные ткани	Изотоп	Кожа	Подкожные ткани
<sup>41</sup> Ar	1080	260	<sup>131m</sup> Xe	170	—
<sup>79</sup> Kr	390	85	<sup>133m</sup> Xe	415	—
<sup>85m</sup> Kr	570	50	<sup>138</sup> Xe	130	—
<sup>85</sup> Kr	500	21	<sup>136m</sup> Xe	1500	—
<sup>87</sup> Kr	3120	2580	<sup>136</sup> Xe	750	85
<sup>89</sup> Kr	3400	2532	<sup>137</sup> Xe	4150	2730
<sup>90</sup> Kr	3220	2200	<sup>138</sup> Xe	2320	1300
<sup>91</sup> Kr	3780	3000			

Табл. 18. Тканевые дозы в теле человека (мрад/неделя), создаваемые  $\beta$ -частицами радиоактивных газов при внешнем облучении за 36 часовую рабочую неделю для эффективного радиуса полушарового блока 5 м при  $C_0=10^{-7}$  кюри/л.

### 3.1.3 Радиоактивный йод

Радиоактивный йод широко применяется в клинической практике. Содержание йода в организме человека составляет 20-50 мг, при этом 50% его находится в мышцах, 20% - в щитовидной железе, 10% - в коже и 6% - в скелете. Попавший внутрь организма йод быстро всасывается и распределяется по органам и тканям, причем избирательно концентрируется в щитовидной железе. Йод накапливается в щитовидной железе в количестве, превышающем в 25 раз его содержание в крови. Максимальная концентрация йода в щитовидной железе здоровых людей наблюдается через 24-28 ч после введения.

При контакте человека с газообразным радиоактивным йодом скорость изменения его активности в щитовидной железе (критическом органе) в случае экспоненциального закона выведения:

$$\frac{dA(t_1)}{dt_1} = f_1 \lambda_1 a(t_1) - \lambda A,$$

где  $A(t_1)$  - активность йода в щитовидной железе в момент экспозиции;  $t_1$  - экспозиция;  $f_1$  - доля активности йода, переходящая из крови в щитовидную железу;  $\lambda_1$  - постоянная выведения йода из крови;  $a(t_1)$  - активность йода в крови в момент экспозиции  $t_1$ ;  $\lambda$  - постоянная выведения йода из щитовидной железы.

При начальных условиях  $A(t_1)=A(0)=0$ ;  $a(t_1)=a(0)=0$  и  $a(t_1) = \frac{F}{\lambda_1} (1 - e^{-\lambda_1 t_1})$ :

$$A(t_1) = \frac{f_1 F}{\lambda} - \frac{f_1}{\lambda - \lambda_1} e^{-\lambda_1 t_1} + \frac{f_1 F \lambda_1}{\lambda(\lambda - \lambda_1)} e^{-\lambda t_1},$$

где  $F$  - скорость накопления йода в кровь через органы дыхания и кожные покровы, кюри/ч.

Изменение активности йода в щитовидной железе после окончания контакта

$$\frac{dA(t)}{dt} = f_1 \lambda_1 a(t) - \lambda A(t)$$

В этом уравнении отсчет времени  $t$  начинается с момента прекращения экспозиции. При начальных условиях  $A(t)=A(0)=A(t_1)$ ,  $a(t)=a(0)=a(t_1)$  и с учетом того, что  $a(t) = a(t_1) e^{-\lambda_1 t}$ :

$$A(t) = \frac{f_1 F}{\lambda - \lambda_1} (1 - e^{-\lambda_1 t_1}) e^{-\lambda_1 t} - \frac{f_1 F \lambda_1}{\lambda(\lambda - \lambda_1)} (1 - e^{-\lambda_1 t_1}) e^{-\lambda t},$$

где  $a(t_1)$  - активность йода в крови в момент окончания экспозиции;  $A(t_1)$  - активность йода в щитовидной железе в момент окончания экспозиции.

Коэффициент F характеризует суммарную скорость поступления газообразного йода через органы дыхания  $F_1$  и через кожные покровы  $F_2$ :  $F=F_1+F_2$ . В свою очередь

$$F_1=f_2C_0v; F_2=\alpha C_0S,$$

$f_2$  – доля активности, остающаяся в органах дыхания и переходящая в кровь,  $C_0$  – концентрация йода в воздухе, кюри/л,  $v$  – скорость легочной вентиляции, л/ч,  $S$  – площадь кожного покрова,  $m^2$ ,  $\alpha$  - коэффициент, характеризующий поступление йода через кожные покровы, л/( $m^2 \cdot ч$ ).

Коэффициент задержки газообразного йода в органах дыхания:

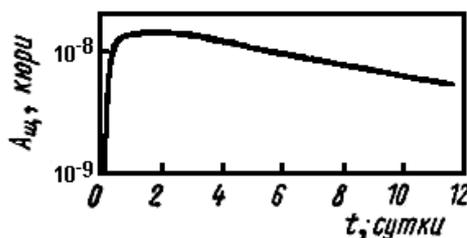
$$f_1 = 1 - \frac{C_{\text{выд}}}{C_0}$$

где  $C_{\text{выд}}$  – измеренная концентрация  $^{131}\text{I}$  в выдыхаемом воздухе,  $C_0$  – измеренная концентрация йода во вдыхаемом воздухе.

Доля активности  $^{131}\text{I}$ , переходящая в кровь

$$f_2 = \frac{A_{\text{щж}}}{f_1 C_0 v t_1} * 100\%$$

где  $A_{\text{щж}}$  – максимальная активность йода в щитовидной железе после экспозиции,  $v=6,9*10^3$  л за рабочий день – скорость легочной вентиляции,  $t_1$  – экспозиция.



**Рис. 4.** Изменение во времени активности  $^{131}\text{I}$  в щитовидной железе испытуемых после 4-часовой экспозиции газообразным  $^{131}\text{I}$ .

Пользуясь рассмотренным здесь математическим аппаратом можно определить величину предельно допустимой концентрации йода в воздухе рабочих помещений: ПДК= $9*10^{-12}$  кюри/л.

Радиоактивный йод является одним из универсальных изотопов с точки зрения радиационной опасности. Это связано с тем, что в производственных условиях он накапливается в щитовидной железе при аэробном поступлении, а в случае его выбросов в окружающую среду опасность радиоактивного йода в подавляющем числе случаев обусловлена пероральным поступлением с пищевыми продуктами, преимущественно с молоком (скорость поступления  $^{131}\text{I}$  с молоком может превышать скорость поступления непосредственно с вдыхаемым воздухом в 40 раз). Наиболее значимый путь поступления радиоактивного йода в организм человека: воздух -растения - пастбищное животное – молоко – человек. Доза от йода, поступающего с молоком, для взрослого человека в 40 раз, а для детей – в 400 раз (у детей масса щитовидной железы  $m=2$  г, т.е. в 10 раз меньше, чем у взрослого) выше, чем доза от йода, поступающего из атмосферы при дыхании.

### 3.1.4 Углерод-14

В природе углероду принадлежит особая биологическая роль. Он является структурой основой всех органических соединений. Углерод непосредственно входит в состав молекул белков и генетически значимых структур. Участвуя в обменных процессах вместе с атомами углерода, радиоактивный углерод проникает во все органы и ткани организма. Здесь проявляется его главная особенность – включаясь непосредственно в молекулы органических соединений, он является для них внутренним облучателем. Повреждающее действие  $^{14}\text{C}$ , вошедшего в состав молекул белков, ДНК и РНК, определяется двумя факторами: радиационным воздействием  $\beta$ -излучения и ядер отдачи азота и изменением химического состава молекулы в результате превращения атома углерода в атом азота после испускания  $\beta$ -частицы.

**Табл. 19.** Дозы, создаваемые в некоторых органах и тканях человеческого организма изотопом  $^{14}\text{C}$ .

В организме человека, как и во всей биосфере, равновесное количество  $^{14}\text{C}$  составляет  $14 \pm 1$  расп/(минг углерода). Вследствие того, что отдельные органы и ткани содержат различное количество стабильного углерода, концентрация  $^{14}\text{C}$  в них различна (Табл. ). Годовая доза, создаваемая  $^{14}\text{C}$  в тканях рассчитывается по формуле:

$$D = 20C_0 \bar{E}_\beta$$

Здесь D-годовая доза, мрад/год;  $C_0$  – удельная активность  $^{14}\text{C}$ , пюри/г ткани,  $\bar{E}_\beta$  - средняя энергия спектра  $\beta$ -излучения. Для  $^{14}\text{C}$   $\bar{E}_\beta = 0,054$  МэВ/расп.

При определении  $^{14}\text{C}$  в вдыхаемом  $\text{CO}_2$  пересчет к дозе можно осуществить по формуле

Орган или ткань	Содержание углерода, вес. %	Концентрация, пюри / г ткани	Поглощенная доза, мрад/год
Мышечная ткань	13	0,82	0,84
Жировая ткань	75	4,8	4,9
Костная ткань	28	1,8	1,8
Гонады	10	0,63	0,65
Красный костный мозг	11,3	0,71	0,73
Белый костный мозг	70	4,5	4,6
Все тело	18	1,14	1,12

$$D = a \frac{\text{мрад/неделя}}{\text{пкюри/моль } CO_2}$$

где  $a$  – концентрация  $^{14}C$  в вдыхаемом воздухе  $CO_2$ , пкюри/моль  $CO_2$ .

Наибольшая концентрация  $^{14}C$  и соответствующая дозовая нагрузка приходится на жировую ткань, которая является критическим органом для этого изотопа.

Главным поставщиком  $^{14}C$  в организм человека служат продукты питания растительного и животного происхождения. Накопление  $^{14}C$  в растениях – одно из существенных звеньев биологической цепочки, по которой он может поступать в организм человека. Благодаря круговороту углерода в природе происходит постоянный обмен между атмосферой, гидросферой, почвенным покровом и органическим миром. Растения поглощают  $^{14}C$  из воздуха в результате фотосинтеза, основным продуктом которого являются углеводы. В растениях радиоактивный углерод проникает также через корневую систему – до 30% общего количества. В

организм человека ежедневно попадает с пищевым рационом примерно 1/30 часть суммарной активности  $^{14}C$ , равной  $9 \cdot 10^{-8}$  кюри.

**Табл. 20.** Содержание  $^{14}C$  в различных органах и тканях человека.

Ткань	Возраст, год	Дата смерти	Содержание искусственного $^{14}C$ , % естественного
Печень »	—	11.1963	17
	71	12.3.1963	19
	55	12.3.1963	12
Кровь	26	1963	40
Почка	54	20.1.1964	49
	54	20.1.1964	42
Сердце »	43	2.6.1964	30
Кровь	63	2.11.1964	15
Хрящ	63	2.11.1964	0
Кровь	26	1 полуг. 1964	45
	26	2 полуг. 1964	55
Мозг	62	25.9.1965	47
Печень	62	25.9.1965	44
Сердце	62	25.9.1965	46
Печень	3	14.12.1965	89
Хрящ	3	14.12.1965	66
»	9	15.12.1965	41
»	25	20.12.1965	29
»	8	2.1.1966	49

Время выведения  $^{14}C$  из организма (корова, коза) 1,2 дня. Радиоактивный углерод, накопившейся в мягких тканях и жире выводится медленнее (12 суток). Еще меньшей скоростью выводится  $^{14}C$ , депонированный в костной ткани (несколько лет).

Из-за ядерных испытаний содержание искусственного  $^{14}C$  в органах и тканях людей увеличилось в 1963-65 почти в 3 раза (Табл. ) и достигло в 1965 примерно 50% естественного содержания.

Учитывая малый вклад в формирование тканевых доз в теле человека при аэробном поступлении  $^{14}C$  можно считать, что основная опасность этого изотопа может иметь место в результате накопления в объектах внешней среды как вблизи источника выброса, так и при глобальном загрязнении человека.

### 3.1.5 Тритий

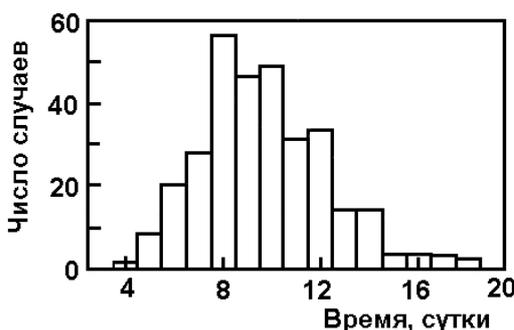
В процессе своей профессиональной работы человек может контактировать с элементарным тритием (свободным газом), окисью трития, а также с его различными соединениями.

При попадании в организм человека тритий сравнительно равномерно распределяется в водной фазе в виде окиси, включается в молекулярные структуры (нуклеиновые кислоты): газообразный элементарный тритий может находиться в растворенном виде в различных органах и тканях человека. Окись трития в виде паров практически полностью задерживается в органах дыхания.

Скорость поступления окиси трития в виде паров через органы дыхания  $F_1 = v\eta C_0$ , где  $v$  – объем вдыхаемого воздуха за единицу времени, л/ч. В профессиональных условиях  $v=1250$  л/ч.  $\eta$  – коэффициент задержки в органах дыхания, который для паров окиси трития равен 100%;  $C_0$  – концентрация тритиевой воды в воздухе. В профессиональных условиях скорость поступления паров окиси трития через органы дыхания  $F_1=1250C_0$  кюри/ч. Средняя скорость поступления через незащищенные кожные покровы

$$F_2 = \alpha S C_0$$

$\alpha$  – коэффициент, характеризующий проникновение вещества через кожные покровы. Для паров окиси трития  $\alpha = 0,84 \frac{\text{мккюри}/(\text{см}^2 \cdot \text{мин})}{\text{мккюри}/\text{см}^2}$ ;  $S=2 \cdot 10^4 \text{ см}^2$  – площадь кожных покровов тела человека.



**Рис. 5.** Распределение биологического периода полувыведения тритиевой воды из организма людей.

Скорость поступления паров тритиевой воды через незащищенные кожные покровы человека  $F_2=1000C_0$ , т.е. сравнима со скоростью поступления через органы дыхания. Период полувыведения окиси трития из организма человека колеблется от 4 до 18 суток (Рис. 5).

Мощность дозы  $P$ , создаваемая  $\beta$ -излучением трития со средней энергией  $\bar{E}_\beta$  при хроническом контакте, когда достигнуто равновесие между поступлением и выведением:

$$P\left(\frac{\text{мбэр}}{\text{сутки}}\right) = 51\bar{E}aW_r$$

где  $a$  – средняя концентрация трития в ткани, мккюри/г,  $W_r=1,7$ .

Элементарный тритий в виде свободного газа проникает в организм человека в количествах в  $10^4$  раз меньших, чем пары тритиевой воды. Окисление элементарного трития в организме составляет 0,004% поступившего количества. Поэтому элементарный тритий в виде свободного газа может представлять опасность как источник внешнего облучения.

### 3.2 Радон и продукты его распада

В работе с радоном (например, на урановых шахтах или в радонотерапии), вдыхание которого и продуктов его распада создает внутреннюю дозу, применяется своя единица - рабочий уровень (РУ) - количество продуктов распада радона (также именуемых дочерними элементами) на один литр воздуха, которые приведут к излучению 130 млрд. электрон-вольт энергии альфа-частиц. Если дочерние элементы радона находятся в состоянии равновесия с радоном в воздухе (т.е., если радон остается в воздухе в течение определенного времени), то примерно 100 пикокюри (3,7 беккерелей) радона на литр воздуха составляет 1 рабочий уровень. Месячный рабочий уровень (МУР) представляет собой показатель общей дозы радиации, которую получает шахтер при вдыхании 1 рабочего уровня в течение одного рабочего месяца (170 часов).

**Рабочий уровень (РУ):** Единица дозы, используемая при добыче урана. Рабочий уровень представляет собой единицу концентрации в воздухе потенциальной альфа-энергии, излучаемой радоном и его продуктами деления. Если радон присутствует в воздухе в течение определенного времени, 1 рабочий уровень равен примерно 100 пикокюри радона на 1 литр воздуха. Месячный рабочий уровень (МРУ): Месячный рабочий уровень определяется как воздействие 1 среднего рабочего уровня в течение рабочего месяца, равного 170 часам.

Пусть организм находится в воздушной атмосфере (или в воде), загрязненной радионуклидом, например, радоном и продуктами его распада, являющихся источниками  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучения.

#### Внешнее облучение от радона.

В среде, содержащей равномерно распределенный  $\alpha$ - или  $\beta$ -излучатель, мощность дозы, полученная организмом, равна:

$$P=2140aE, \text{ рад/час},$$

где  $E$  – средняя энергия  $\alpha$ - или  $\beta$ -частиц (в МэВ),  $a$  – удельная активность радиоактивного вещества (в мкюри/г).

При расчете биологического действия вводится взвешивающий коэффициент для данного вида излучения,  $W$ :

$$P=2140WaE \text{ бэр/час}.$$

Мощность дозы в центре воздушной полусферы радиуса  $r_0$  от  $\gamma$ -излучения изотопа, содержащегося в воздухе:

$$P_\gamma = \frac{2\pi K_\gamma a}{\mu} (1 - e^{-\mu r_0}),$$

где  $P_\gamma$  - мощность дозы в воздухе, р/ч;  $K_\gamma$  -  $\gamma$ -постоянная радиоактивного изотопа, содержащегося в воздухе;  $a$  – концентрация изотопа, мкюри/см<sup>3</sup>;  $\mu$  - коэффициент ослабления широкого пучка  $\gamma$ -излучения в воздухе, см<sup>-1</sup>.

Для воздушной полусферы большого радиуса\*

$$P_\gamma = 2\pi \frac{K_\gamma a}{\mu}.$$

\*Для радона с продуктами распада эффективный коэффициент поглощения  $\gamma$ -лучей  $\mu=3,2 \cdot 10^{-5}$  см<sup>-1</sup>. Величина  $e^{-\mu r_0}$  становится малой по сравнению с единицей, когда  $\mu r_0 \geq 3$ , что соответствует радиусу:

$$r_0 \geq \frac{3}{\mu} = \frac{3}{3,2 \cdot 10^{-5}} \text{ см} = 940 \text{ м}$$

#### Внутренняя доза от радона.

Дозиметрия радона подробно рассмотрена в курсе лекций «РАДОН: враг, врач, волонтер».