

Оценка ожидаемых эквивалентных доз облучения щитовидной железы персонала при ингаляционном поступлении йода-123

В настоящее время в медицине интенсивно используются радиофармпрепараты на основе йода-123 для диагностики рака щитовидной железы, перфузионного исследования головного мозга, метаболизма инсулина и во многих других областях медицины. При изготовлении радиоактивных источников на основе йода-123 возможно его поступление в щитовидную железу персонала, выполняющего данные работы. В статье приводится порядок оценки ожидаемых эквивалентных доз облучения щитовидной железы персонала, занятого в производстве радиоактивных источников на основе йода-123, при ингаляционном поступлении радионуклида.

Ключевые слова: щитовидная железа, активность радионуклида, биокинетическая модель, ожидаемая эквивалентная доза облучения.

**В.Б.Фирсанов, Д.В.Арефьева,
С.В.Ярмийчук, А.В.Петушок**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Научно-исследовательский институт промышленной и морской медицины» Федерального медико-биологического агентства, г. Санкт-Петербург

В настоящее время в ядерной медицине для высокоинформативных диагностических исследований используются препараты на основе йода-123, такие как йодофен, натрия-йодид, о-йодгиппурат и мета-йодбензилгуанидин [1]. Данный радионуклид с преобладающей энергией гамма-излучения 159 кэВ и периодом полураспада 13,22 часа [2,3] широко используется в медицинской диагностике, в частности, для однофотонной эмиссионной компьютерной томографии и комбинированных исследований, что позволяет эффективно диагностировать рак щитовидной железы, исследовать перфузию головного мозга и метаболизм инсулина.

Разработка и производство радиофармпрепаратов на основе йода-123 включает работы с открытыми источниками ионизирующего излучения (ИИИ) [4]. Методики получения

данного радионуклида достаточно полно описаны в литературе и в основном очень схожи между собой [5-8].

Работа с открытыми ИИИ связана с опасностью воздействия проникающего излучения и инкорпорации радиоактивных веществ, что приводит к возможности как внешнего, так и внутреннего облучения персонала. При работе с открытыми ИИИ возможно загрязнение рабочей зоны, одежды и рук, попадание радиоактивных веществ в воздух, образование радиоактивных газов [9]. Инкорпорация радионуклидов происходит, в основном, в результате однократного или систематического ингаляционного поступления при нахождении персонала в производственных помещениях, где в воздухе содержатся радиоактивные вещества в виде аэрозоля или газа [10]. При выполнении работ как по изготовлению радиофармпрепаратов на основе йода-123, так и при непосредственном использовании возможно его поступление в организм человека [11-13]. Поэтому оценка ожидаемых эквивалентных доз облучения щитовидной железы персонала при ингаляционном поступлении данного радионуклида является актуальной задачей.

Ожидаемая эффективная доза внутреннего облучения (ОЭД) рассчитывается как сумма произведений эквивалентных доз для мужчин и женщин, усредненных по полу, на отдельные органы или ткани, на соответствующие взвешивающие коэффициенты [14]. Данный расчет является одним из самых сложных аспектов радиологической защиты, так как

требуется проведение математической оценки, основанной на определении поступления радионуклида в различные органы человека с применением биокинетических моделей поведения радионуклидов в организме. Биокинетические модели, разработанные МКРЗ, имеют тенденцию изменяться от публикации к публикации. Может варьироваться количество отделов модели, коэффициенты переноса активности из отдела в отдел и т. п. Использование неактуальных версий биокинетических моделей может вносить погрешность в расчеты доз облучения. Таким образом, в процессе проведения исследований необходимо иметь возможность самостоятельно проводить расчеты дозовых коэффициентов ОЭД.

Для дозиметрического контроля профессионального внутреннего облучения используют дозиметрический контроль рабочих мест

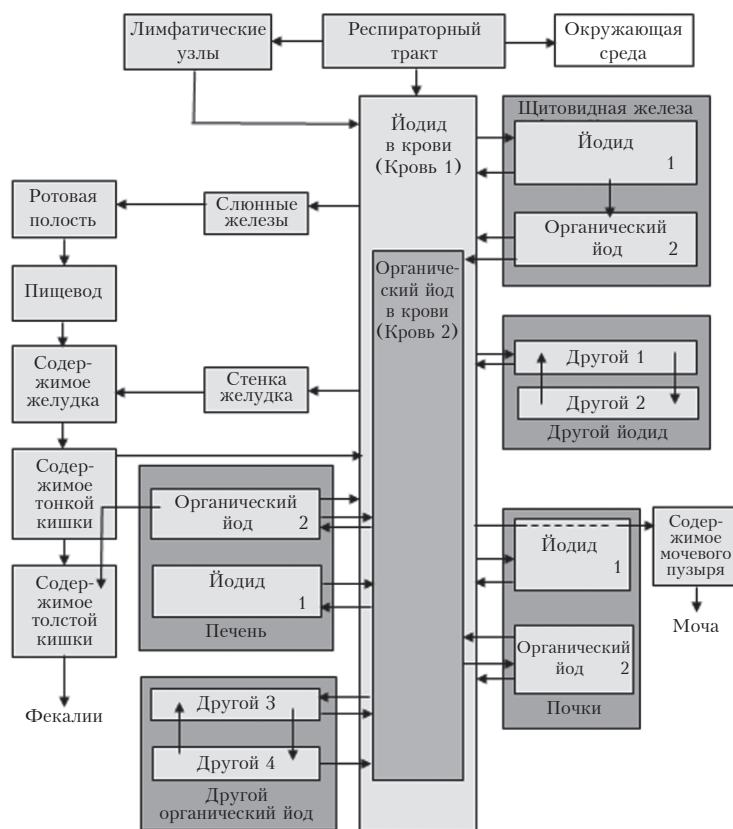


Рис.1. Биокинетическая модель йода в Публикации 137 МКРЗ с сочлененным отделом «Респираторный тракт».

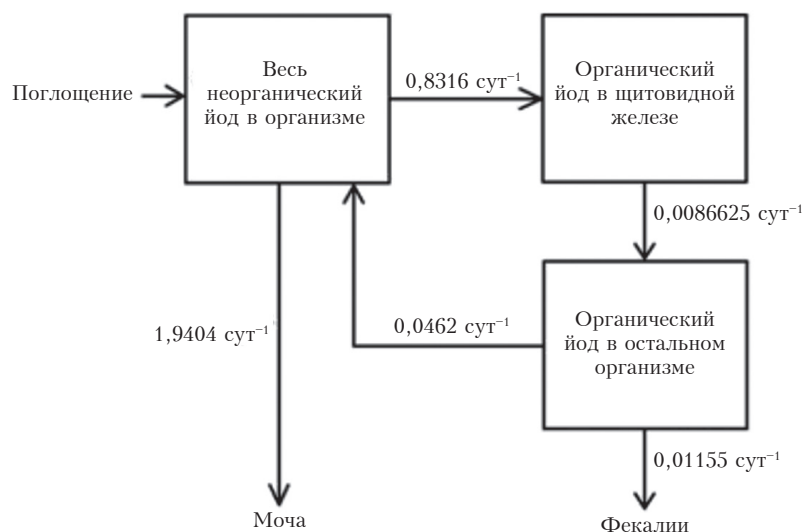


Рис.2. Биокинетическая модель йода в Публикации 66 МКРЗ.

(по результатам систематических измерений объемной активности в воздухе рабочих помещений) и индивидуальный дозиметрический контроль персонала. В данной работе приводится порядок расчета ожидаемой эквивалентной дозы облучения по результатам прямых измерений йода-123 в щитовидной железе по формулам из Публикации 130 МКРЗ [15] с учетом коэффициентов дозы для мужчин и женщин из Базы дозиметрических данных МКРЗ [16].

Для оценки поступления йода-123 в щитовидную железу персонала одного из предприятий, занимающегося изготовлением открытых источников ионизирующего излучения, проведены измерения на спектрометре излучений человека СЕГ-10П-02 (НТЦ «Радэк», Россия). Для измерения фонового спектра перед проведением измерений (или после) инкорпорированной активности в щитовидной железе проводилось измерение от области предплечья.

Целью исследования является оценка ожидаемых эквивалентных доз облучения щитовидной железы персонала от инкорпорированного радионуклида йода-123.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие задачи:

- рассмотрен порядок расчета коэффициентов эквивалентных доз;
- проведена оценка эквивалентных доз облучения щитовидной железы.

Для расчета ожидаемых эквивалентных доз облучения щитовидной железы использована биокинетическая модель поведения инкорпорированного йода в организме, предложенная в работе R.W. Leggett и представленная в Публикации 137 МКРЗ [17]. Данная модель содержит сведения о закономерностях распределения, депонирования и перераспределения радионуклидов в организме человека и позволяет рассчитать, используя значения скоростей переноса активности между отделами модели, функцию удержания активности йода-123 в щитовидной железе.

Биокинетическая модель йода из Публикации 137 МКРЗ состоит из трех подсистем:

- циркулирующего (экстратиреоидного) неорганического йода;
- йода в щитовидной железе (улавливание и органическое связывание йодида, синтез, хранение и секреция щитовидных гормонов);
- экстратиреоидного органического йода.

Структура биокинетической модели для йода из Публикации 137 МКРЗ [17], сочлененная с моделью «Респираторный тракт»

Табл.1. Коэффициенты переноса активности йода между отделами в биокинетической модели йода из [16,18]

Перенос активности ¹⁾		Коэффициент переноса активности, сут ⁻¹
Из отдела	В отдел	
1	2	3
Кровь 1	Щитовидная железа 1	7,26
Кровь 1	Мочевой пузырь	11,84
Кровь 1	Слюнная железа	5,16
Кровь 1	Стенка желудка	8,6
Кровь 1	Другой 1	600
Кровь 1	Почки 1	25
Кровь 1	Печень 1	15
Стенка желудка	Содержимое желудка	50
Слюнная железа	Ротовая полость	50
Содержимое желудка	Содержимое тонкой кишки	20,57
Содержимое тонкой кишки	Содержимое толстой кишки	6,0
Содержимое тонкой кишки	Кровь 1	594
Щитовидная железа 1	Щитовидная железа 2	95
Щитовидная железа 1	Кровь 1	36
Щитовидная железа 2	Кровь 2	0,0077
Щитовидная железа 2	Кровь 1	0 ²⁾
Другой 1	Кровь 1	330
Другой 1	Другой 2	35
Другой 2	Другой 1	56
Почки 1	Кровь 1	100
Печень 1	Кровь 1	100
Кровь 2	Другой 3	15
Другой 3	Кровь 2	21
Другой 3	Другой 4	1,2
Другой 4	Другой 3	0,62
Другой 4	Кровь 1	0,14
Кровь 2	Почки 2	3,6
Почки 2	Кровь 2	21
Почки 2	Кровь 1	0,14
Кровь 2	Печень 2	21
Печень 2	Кровь 2	21
Печень 2	Кровь 1	0,14
Печень 2	Содержимое толстой кишки	0,08
Содержимое полости рта	Пищевод (быстрый обмен)	6480 [4]
Содержимое полости рта	Пищевод (медленный обмен)	720 [4]
Пищевод (быстрый обмен)	Содержимое желудка	12,343 [4]
Пищевод (медленный обмен)	Содержимое желудка	2160 [4]

Примечание:

¹⁾ Наименования отделов в соответствии с рис.1.²⁾ Ненулевое значение только при высоком потреблении стабильного йода

(для учета растворимости поступающего соединения) приведена на рис.1.

Согласно НРБ-99/2009 [18] скорость перехода радионуклидов из легких в кровь зависит от типа химического соединения и составляет для:

- быстрорастворимых соединений (тип «Б») – 100 сут⁻¹;
- соединений, растворимых с промежуточной скоростью (тип «П») – 0,005 сут⁻¹;
- медленно растворимых соединений (тип «М») – 0,0001 сут⁻¹.

Особенностью новой модели из Публикации 137 МКРЗ по сравнению с предыдущей трехкамерной моделью, предложенной в Публикации 66 МКРЗ [19] (рис.2), является количество отделов, которое значительно увеличилось за счет разделения йодных отделов. В Публикации 137 МКРЗ отдел «Весь неорганический йод в организме» называется «Кровь», отдел «Органический йод в щитовидной железе» – «Щитовидная железа», а отдел «Органический йод в остальном организме» разделен на отделы определенных органов: слюнные железы, печень, почки и др. отделы. Кроме того, были разделены отделы неорганического и органического йода, и, соответственно, печень, почки и щитовидная железа также были разделены на неорганические и органические отделы, что позволяет учесть их различную биокинетику.

В соответствии с новой моделью из Публикации 137 МКРЗ несвязанный неорганический йодид возвращается в кровь без длительного удержания, а органически связанный йод проникает в неорганический отдел крови. Таким образом, поведение йода в щитовидной железе в модели из Публикации 137 МКРЗ описывается системой из двух отделов, представляющих собой неорганический йодид («Щитовидная железа 1») и органический йод («Щитовидная железа 2»). «Щитовидная железа 1» получает йодид из «Крови 1», передает йодид в «Щитовидную железу 2»

и пропускает некоторое количество йодида обратно в «Кровь 1». «Щитовидная железа 2» преобразует йодид в органический йод и переносит органический йод в отдел органического йода в крови («Кровь 2»).

Отделы «Другой 1» и «Другой 2» представляют собой быстрообменный йодид во внеклеточных жидкостях экстракореоидных тканей и медленнообменный йодид в экстракореоидных тканях (кроме почек и печени), соответственно. Отделы «Другой 3» и «Другой 4» представляют собой быстрообменный органический йод во внеклеточных жидкостях экстракореоидных тканей и медленнообменный органический йод во внеклеточных жидкостях экстракореоидных тканей (кроме почек и печени), соответственно.

В табл.1 приведены коэффициенты переноса активности между отделами для йода, использованные в биокинетической модели из Публикаций 130,137 МКРЗ.

Ожидаемая эквивалентная доза на щитовидную железу $H_T(50)$ от инкорпорированного радионуклида для мужчин и женщин рассчитывается по формулам [15]:

$$H_T^M(t) = A_0 \times h_T^M(t), \quad (1)$$

$$H_T^F(t) = A_0 \times h_T^F(t), \quad (2)$$

где A_0 – активность радионуклида на момент поступления, Бк; $h_T^M(t)$, $h_T^F(t)$ – дозовые коэффициенты ОЭД для мужчин и женщин, соответственно.

В Публикации 130 МКРЗ [15] активность радионуклида на момент поступления в организм A_0 рассчитывается по формуле (3):

$$A_0 = \frac{A_{изм}}{m(t)}, \quad (3)$$

где $A_{изм}$ – измеренное значение активности в органе, Бк; $m(t)$ – функция удержания/выведения.

Для расчета дозовых коэффициентов ОЭД облучения щитовидной железы за определенный интервал времени после поступления

радионуклида в организм необходимо знать функцию его удержания в организме, органе или ткани после поступления, которая описывается системой дифференциальных уравнений, с использованием известных коэффициентов переноса активности между отделами биокинетической модели.

Решение дифференциальных уравнений представляет собой функции изменения активности радионуклида во времени t в отдельных органах или тканях и функции выведения с мочой или фекалиями (функции удержания/выведения).

В общем виде перемещение активности $A(t)$ между отделами (для одного радионуклида), описываемое линейными дифференциальными уравнениями первого порядка, можно записать в следующем виде:

$$\frac{dA_j(t)}{dt} = \sum_k \lambda_{kj} A_k(t) - \left[\sum_k \lambda_{kj} + \lambda \right] A_j(t),$$

$$k, j = 1, \dots, n, \quad (4)$$

где n – количество отделов в биокинетической модели; λ_{kj} – коэффициент переноса активности между отделами (из отдела k в отдел j), сут.⁻¹; A_k, A_j – активность в соответствующем отделе; $\lambda = (\ln 2 / T_{1/2})$ – постоянная радиоактивного распада (для йода-123 $\lambda = 1,2536$ сут.⁻¹); $T_{1/2}$ – период полураспада радионуклида, сут.

Данная система представляет собой задачу Коши, решение которой может быть найдено при помощи численных методов, например, методом Розенброка или методами Рунге–Кутты [20]. Решением данной системы являются функции удержания/выведения активности $A_j(t)$ ($m(t)$) для каждого отдела биокинетической модели, представляющие собой суммы экспонент.

В Базе дозиметрических данных МКРЗ [16] приведены значения функций удержания активности в щитовидной железе для различных радионуклидов, в частности, йода-123 для раз-

личных значений активностного медианного аэродинамического диаметра (АМАД) и растворимости поступающих соединений.

Расчет коэффициентов эквивалентных доз на органы проводится с учетом справочных данных об основных анатомических и физиологических характеристиках стандартных мужчины (M – male) и женщины (F – female), приведенных в Публикации 89 МКРЗ [21], и данных об удельных поглощенных фракциях (SAF), которые были рассчитаны с использованием эталонных вычислительных фантомов человеческого тела, значения которых представлены в дополнительных материалах к Публикации 133 МКРЗ [22], по формулам, приведенным в Публикации 130 МКРЗ:

$$h^M(r_T, \tau) = \sum_{r_S} \tilde{a}(r_S, \tau) S_W^M(r_T \leftarrow r_S), \quad (5)$$

$$h^M(r_T, \tau) = \sum_{r_S} \tilde{a}(r_S, \tau) S_W^F(r_T \leftarrow r_S), \quad (6)$$

$$\tilde{a}(r_S, \tau) = \frac{A(r_S, \tau)}{\sum_j A_j(0)}, \quad (7)$$

$$A(r_S, \tau) = \sum_j \int_0^\tau A_j(t) dt, \quad (8)$$

$$S_W^M(r_T \leftarrow r_S) = \sum_R W_R E_R Y_R \Phi^M(r_T \leftarrow r_S, E_R), \quad (9)$$

$$S_W^F(r_T \leftarrow r_S) = \sum_R W_R E_R Y_R \Phi^F(r_T \leftarrow r_S, E_R), \quad (10)$$

где $h^M(r_T, \tau)$ и $h^F(r_T, \tau)$ – коэффициенты эквивалентных доз на области-мишени r_T для мужчин и женщин, соответственно, Зв·Бк⁻¹; $S_W^M(r_T \leftarrow r_S)$ и $S_W^F(r_T \leftarrow r_S)$ – взвешенные эквивалентные дозы облучения в области-мишени r_T , полученные в результате ядерных превращений радионуклида в области-источнике r_S для мужчин и женщин, соответственно, Зв·(Бк·с)⁻¹; $\tilde{a}(r_S, \tau)$ – число ядерных превращений на поглощение активности в области-источнике, r_S , Бк·с; $A_j(0)$ – активность в отделе j в момент времени $t = 0$, Бк; $A(r_S, \tau)$ – число ядерных превращений радионуклида в области-источнике r_S , Бк·с; τ – период интегриро-

вания, сут.; j – число отделов биокинетической модели, входящих в область-источник r_S ; $A_j(t)$ – активность радионуклида в отделе j в момент времени t , Бк; E_R – энергия излучения типа R , испускаемого при радиоактивных распадах радионуклида, Дж; Y_R – выход излучения типа R на радиоактивный распад, (Бк·с)⁻¹; W_R – весовой коэффициент для излучения типа R (для фотонов и электронов равен единице); $\Phi^M(r_T \leftarrow r_S, E_R)$ и $\Phi^F(r_T \leftarrow r_S, E_R)$ – удельные поглощенные фракции (SAF) для справочных взрослых мужчин и женщин, соответственно, определяемые как доля энергии $E_{R,i}$ излучения типа R , испускаемого в пределах области источника r_S , которая поглощается на единицу массы в области-мишени r_T кг⁻¹.

Справочные данные об энергии излучения типа R , испускаемого при радиоактивных распадах радионуклида, и выходе излучения типа R на ядерное превращение, приведены в Публикации 107 МКРЗ [23].

Результаты и обсуждение

Измерение содержания йода-123 в щитовидной железе у сотрудников предприятия проводилось с использованием блока детектирования (БД) на основе сцинтилляционного кристалла NaI(Tl) диаметром 25 мм и высотой 25 мм с встроенным коллиматором из состава спектрометра излучений человека СЕГ-10П-02 с применением программного обеспечения «ASW», входящего в комплект поставки установки.

Перед проведением измерений была проведена градуировка БД в геометрии измерения «щитовидная железа» с применением методов математического моделирования.

Градуировка включала следующие этапы:

- проведение спектрометрических исследований с фантомом щитовидной железы ФЩЖ-06 с радионуклидами кобальт-57 и барий-133;

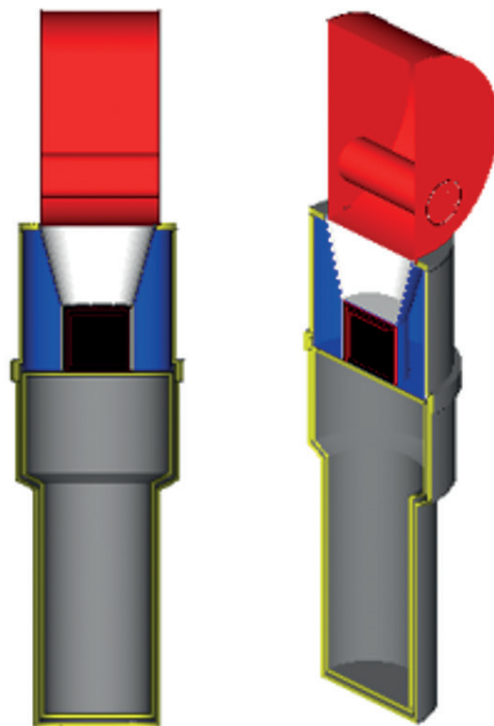


Рис.3. Имитационная модель геометрии измерения «щитовидная железа» (кристалл – черный, корпус детектора и фотоэлектронный умножитель – желтый, коллиматор – синий, ФЩЖ-06 – красный).

- разработку имитационной модели блока детектирования и фантома щитовидной железы с применением программы MCC 3D (Monte-Carlo Calculations 3D) [24], позволяющей проводить симуляцию прохождения излучения через вещество методом Монте-Карло (рис.3);
- моделирование аппаратных спектров радионуклидов кобальт-57 и барий-133 для последующего их сравнения с экспериментальными спектрами с применением критерия согласия Пирсона χ^2 [25];
- моделирование аппаратного спектра йода-123 в геометрии измерения «щитовидная железа»;
- создание калибровочного файла, предназначенного для определения содержания инкорпорированного йода-123 в щитовидной железе.

Проведенное обследование персонала предприятия на содержание в щитовидной железе инкорпорированного йода-123 выявило его наличие в количестве от 70 Бк до 270 Бк у шестерых сотрудников, непосредственно работающих с данным радионуклидом. Время измерения составляло 300 с.

Расширенная относительная неопределенность результата измерений (с коэффициентом охвата 2) не превышает 30%, и оценивалась с учетом следующих составляющих:

- доверительной случайной составляющей относительной погрешности результата измерения активности радионуклида при доверительной вероятности $P = 0,95$;
- погрешности определения коэффициента чувствительности спектрометра (равно 8%);
- методической погрешности, обусловленной неполной адекватностью фантома щитовидной железы и шеи пациента (несоответствие конфигурации, линейного коэффициента ослабления и др., равно 20%);

- систематической погрешности, обусловленной несоответствием смоделированного спектра гамма-излучения экспериментальному (при вероятности $P = 0,90$ равно 10%).

Оценка доз облучения щитовидной железы у персонала предприятия проводилась в соответствии с данными измерений содержания йода-123 [26] и справочными данными из Публикаций МКРЗ [15,21] по формулам (5)–(10).

Значение функции удержания на момент 1,5 сут. после поступления в щитовидную железу для йода-123, взятое из Базы дозиметрических данных МКРЗ [16], составляет $0,029 \text{ Бк} \cdot \text{Бк}^{-1}$ (тип соединения «Б», АМАД = 5 мкм).

Значения коэффициентов эквивалентных доз $h_T(50)$ для мужчин и женщин из [16] составляют $2,1 \cdot 10^{-9} \text{ Зв/Бк}$ и $2,5 \cdot 10^{-9} \text{ Зв/Бк}$, соответственно. Для сравнения, в Базе дозиметрических данных МКРЗ [28], разработанной на основе Публикаций 68, 72 МКРЗ [28,29], значение $h_T(50)$ составляет $2,9 \cdot 10^{-9} \text{ Зв/Бк}$.

Табл.2. Средние значения энергий и выходов излучения йода-123 из Публикации 107 МКРЗ [23] и значения удельных поглощенных фракций для мужчин и женщин из Публикации 133 МКРЗ [22].

Тип излучения R	Среднее значение энергии излучения E_R МэВ (Дж)	Средний выход излучения Y_R (Бк·с) ⁻¹	Удельная поглощенная фракция $\Phi^M(r_T \leftarrow r_T, E_R)$, кг ⁻¹	
			мужчины	женщины
Гамма	$1,714 \cdot 10^{-1}$ ($2,746 \cdot 10^{-14}$)	0,8642	1,202	1,438
Рентгеновское	$1,574 \cdot 10^{-3}$ ($2,52 \cdot 10^{-16}$)	15,84	37,8	45,5
Электроны	$1,317 \cdot 10^{-1}$ ($2,11 \cdot 10^{-14}$)	0,1591	41,9	50,7
Оже-электроны	$5,278 \cdot 10^{-4}$ ($0,845 \cdot 10^{-16}$)	13,71	42,8	51,4

Табл.3. Результаты оценки ожидаемой эквивалентной дозы облучения щитовидной железы, обусловленной содержанием йода-123.

Шифр работника	Пол	Активность на дату измерения, Бк	Активность на дату поступления, Бк	Ожидаемая эквивалентная доза $H_T(50)$, мЗв
099	ж	270	9310	0,023
152	ж	70	2410	0,006
065	м	120	4140	0,009
132	м	140	4830	0,010
002	ж	120	4140	0,010
005	ж	110	3790	0,009

Таким образом, расчет эквивалентных доз с применением дозовых коэффициентов, полученных с использованием неактуальной версии биокинетической модели для йода, может привести к завышению доз облучения щитовидной железы в 1,38 и 1,16 раза для мужчин и женщин, соответственно.

Так как в данном конкретном случае щитовидная железа представляет собой орган, который является и областью-источником, и областью-мишенью, то это означает, что $r_T = r_S$. Тогда для расчета эквивалентных доз облучения щитовидной железы необходимо использовать значения удельных поглощенных фракций (SAF) для случая Thyroid $\leftarrow$ Thyroid. В табл.2 приведены средние значения энергий и выходов излучения йода-123 из Публикации 107 МКРЗ [23], а также значения удельных

поглощенных фракций (SAF) для мужчин и женщин из дополнительных материалов к Публикации 133 МКРЗ [22].

Таким образом, значения взвешенных эквивалентных доз облучения щитовидной железы для лиц мужского и женского пола составили $5,92 \cdot 10^{-12}$ Зв·(Бк·с) $^{-1}$ и $7,12 \cdot 10^{-12}$ Зв·(Бк·с) $^{-1}$, соответственно.

Результаты расчетов ожидаемой эквивалентной дозы внутреннего облучения приведены в табл.3.

Таким образом, исходя из консервативного предположения, что работы с йодом-123 проводятся постоянно в течение года раз в семь дней (46 недель), максимальная ожидаемая эквивалентная доза на щитовидную железу от йода-123 может составить 1,06 мЗв.

Заключение

В статье показан порядок расчета коэффициентов эквивалентных доз облучения щитовидной железы с использованием биокинетической модели поведения инкорпорированного йода в организме, представленной в Публикации 137 МКРЗ [17], а также проведена оценка ожидаемых эквивалентных доз облучения щитовидной железы при ингаляционном поступлении йода-123 при выделении из облученной теллуровой мишени путем термодистилляции.

Установлено, что годовая эквивалентная доза облучения щитовидной железы у работников, участвующих в производстве радиофармпрепаратов на основе йода-123, может составлять более 1 мЗв в год, что является граничным значением для введения индивидуального дозиметрического контроля внутреннего облучения [14]. Поэтому рекомендуется при осуществлении работ с йодом-123 для корректного учета дозовой нагрузки проводить скрининговую оценку поступления радионуклида в организм персонала каждый раз непосредственно после проведения работ с последующим расчетом эквивалентной дозы облучения.

Литература

1. Семенов А.С. Разработка методов получения радиофармацевтических лекарственных препаратов на основе йода-123 для медицинской диагностики : дис. ... канд. техн. наук : 2.6.8/Семенов Артем Сергеевич. 2022.
2. F.G. Kondev et al., «The NUBASE2020 evaluation of nuclear physics properties», *Chinese Physics C.*, vol. 45, no. 3, Art. no. 030001, 2021.
3. T. Ferris, L. Carroll, S. Jenner, E.O. Aboagye, «Use of radioiodine in nuclear medicine. A brief overview», *Journal of Labelled Compounds and Radiopharmaceuticals*, vol. 64, no. 3, pp. 92-108. DOI: 10.1002/jlcr.3891. (Электрон. дан.).
4. M.C. Chang, C.L. Peng, C.T. Chen, Y.H. Shih, J.H. Chen, Y.J. Tai, Y.C. Chiang, «Iodine-123 Metaiodobenzylguanidine (I-123 MIBG) in Clinical Applications, *A Comprehensive Review Pharmaceuticals* (Basel), vol. 17, no. 12, art. no. 1563, 2024. DOI: 10.3390/ph17121563. – PMID: 39770405. – PMCID: PMC11676292. (Электрон. дан.).
5. Скуридин В.С. Разработка технологий получения короткоживущих радионуклидов и диагностических препаратов на их основе с использованием излучательных установок средней мощности. Дис. доктора техн. наук. 05.17.02. Том. политехн. университет. Томск, 2002. 203 с.
6. Скуридин В.С. Методы и технологии получения радиофармпрепаратов: учебное пособие. Томск: изд-во Том. политехн. ун-та, 2012.
7. Ларькина М.С. Способ получения и изучение биологических свойств меченной йодом-123 производной аминокислоты // Бюллетень сибирской медицины. 2018. Т. 17. № 1. С. 102–111.
8. Пат. 2756917 С1 Российская Федерация. МПК G21G 1/10. Способ получения радионуклида I-123: № 2021100703: заявл. 15.01.2021; опубл. 07.10.2021. Артюхов А.А., Загрядский В.А., Кравец Я.М. и др., заявитель и патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт». EDN PIVQSZ.
9. Архангельский В.И., Мельниченко П.И. Гигиена с основами экологии человека: учебник, М.: ГЭОТАР-Медиа. 2010. 650 с. URL: <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785970426425.html> (дата обращения: 12.09.2024). – ISBN 978-5-9704-2642-5. (Электрон. дан.).
10. Молоканов А.А. Современная методология контроля доз внутреннего облучения персонала // АНРИ. 2011. № 4(67). С. 2-18.
11. Турлаков Ю.С., Грабский Ю.В., Арефьева Д.В. и др. Скрининг активности инкорпорированных радионуклидов у персонала научно-исследовательской организации // Медицина экстремальных ситуаций. 2022. Т. 24. № 2. С. 81-86. DOI: 10.47183/mes.2022.014. – EDN DSZCGB. – (Электрон. дан.).
12. A. Bitar, M. Maghrabi, A.W. Doubal, «Assessment of intake and internal dose from iodine-131 for exposed workers handling radiopharmaceutical products», *Applied Radiation and Isotopes*, 2013, vol. 82, pp. 370-375.
13. S. Medici et al., «Detecting intake of radionuclides: In vivo screening measurements with conventional radiation protection instruments», *Radiation Measurements*, vol. 122, pp. 126-132, 2019.
14. Дозиметрический контроль профессионального внутреннего облучения. Общие требования: методические указания МУ 2.6.1.065-14. Утверждены заместителем руководителя ФМБА России, главным государственным санитарным врачом ФМБА России Романовым В.В. Введены с 01.01.2015. М., 2014. 47 с.
15. ICRP Publication 130. Occupational Intakes of Radionuclides: Part 1. Annals of the ICRP. 2015, vol. 44, no. 2, pp. 1-188. DOI: 10.1177/0146645315577539.
16. Electronic Annex. OIR Data Viewer Ver. 4.01.04.19: электрон. прогн. Copyright © ICRP. 2017-2019. Режим доступа: по запросу в ICRP.
17. ICRP Publication 137. Occupational Intakes of Radionuclides: Part 3. Annals of the ICRP. 2017, vol. 46, no. 3-4, pp. 1-486. DOI: 10.1177/0146645317734963.

18. СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). Санитарные правила и нормы. Утв. Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 07.07.2009 № 47, введ. 01.09.2009. URL: <https://base.garant.ru/4188851/> (дата обращения: 19.07.2025).
19. ICRP Publication 66. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection // Annals of the ICRP, vol. 24, no. 1-3, pp. 1-482. URL: <https://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Supporting%20Guidance%203> (дата обращения: 19.07.2025).
20. Зенков А.В. Численные методы: учебное пособие. Екатеринбург: изд-во Уральского университета. 2016. 124 с.
21. ICRP Publication 89. Basic Anatomical and Physiological Data for Use in Radiological Protection: Reference Values. Annals of the ICRP, 2002, vol. 32, no. 3-4, pp. 1-277.
22. ICRP Publication 133. The ICRP computational framework for internal dose assessment for reference adults: specific absorbed fractions. Annals of the ICRP, 2016, vol. 45, no. 2, pp. 1-74.
23. ICRP Publication 107. Nuclear Decay Data for Dosimetric Calculations. Annals of the ICRP, 2008, vol. 38, no. 3, pp. 1-96.
24. Программа для имитационного трехмерного моделирования систем детектирования и регистрации ионизирующих излучений МСС 3Д: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2008615088. 2008.
25. Арефьева Д.В., Фирсанов В.Б., Куруч Д.Д. и др. Градуировка сцинтилляционного спектрометра гамма-излучений с применением метода математического моделирования // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13. № 4. С. 93-100. DOI 10.21514/1998-426X-2020-13-4-93-100.
26. Арефьева Д.В., Фирсанов В.Б., Петушок А.В., Брюхов Р.Е. Способ градуировки сцинтилляционного спектрометра излучений человека для измерения содержания радионуклидов ^{123}I и ^{125}I в щитовидной железе // Актуальные вопросы промышленной и морской медицины. Сборник научных трудов V Всероссийской науч.-практ. конфер., посвящ. 80-летию со дня рождения Довгуши В.В., Санкт-Петербург, 03–04 апреля 2024 г. Санкт-Петербург: изд-во Политехнического университета, 2024. С. 40-49.
27. The ICRP Database of Dose Coefficients: Workers and Members of the Public, version 2.0.1 : электрон. ресурс: an extension of ICRP Publications 68 and 72 developed by Task Group on Dose Calculations on Committee 2 of the International Commission on Radiological Protection. CD-ROM. Oxford, UK: Pergamon Press, 2001.
28. ICRP Publication 68. Dose Coefficients for Intakes of Radionuclides by Workers. Replacement of ICRP Publication 61. Annals of the ICRP, 1994, vol. 24, no. 4, pp. 1-82.
29. ICRP Publication 72. Age-dependent doses to the members of the public from intake of radionuclides: Part 5, Compilation of ingestion and inhalation dose coefficients, Annals of the ICRP, 1996, vol. 26, no. 1, pp. 1-91.

Assessment of the Expected Equivalent Doses of Thyroid Radiation to Personnel Upon Inhalation of Iodine-123 Radionuclide

Firsanov Vladimir, Arefyeva Daria, Yarmiychuk Sergei, Petushok Aleksandra

Research Institute of Industrial and Marine Medicine of the Federal Medical and Biological Agency,
St. Petersburg, Russia

Abstract. Currently, radiopharmaceuticals based on iodine-123 are intensively used in medicine to diagnose thyroid cancer, study brain perfusion, insulin metabolism, and in many other areas. In the manufacture of sources based on iodine-123, it is possible for it to enter the thyroid gland of personnel performing these works. The article provides an assessment procedure for the expected equivalent doses of thyroid radiation to personnel upon inhalation of radionuclide

Keywords: *thyroid gland, radionuclide activity, biokinetic model, expected equivalent radiation dose.*

В.Б.Фирсанов (м.н.с.), Д.В.Арефьева (и.о. зав. лаб.), С.В.Ярмийчук (н.с.), А.В.Петушок (м.н.с.)

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Научно-исследовательский институт промышленной и морской медицины» Федерального медико-биологического агентства, г. Санкт-Петербург

Контакты: +7 (812) 415-94-31; vova-firsanov@yandex.ru