

© КОЛЛЕКТИВ АВТОРОВ, 2017

УДК 614.876:616.441

Шинкарев С.М., Самойлов А.С., Грановская Е.О., Корнева Е.А., Кухта Б.А., Андросова А.А., Яценко В.Н.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВКЛАДА КОРОТКОЖИВУЩИХ ИЗОТОПОВ ЙОДА В ДОЗУ ОБЛУЧЕНИЯ ЩИТОВИДНОЙ ЖЕЛЕЗЫ У НАСЕЛЕНИЯ ПОСЛЕ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ И ФУКУСИМСКОЙ АВАРИЙ

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна», 123182, Москва

Цель. Представить сравнительный анализ вклада короткоживущих изотопов йода в дозу облучения ЩЖ у населения после двух наиболее крупных аварий на атомных реакторах: на ЧАЭС в 1986 г. и на АЭС «Фукусима-1» в 2011 г.

Материал и методы. Вклад короткоживущих изотопов йода в дозу облучения ЩЖ выражен в долях дозы излучения ^{131}I в ЩЖ, основного дозообразующего радионуклида. Этот вклад учитывает соотношение между пероральной и ингаляционной компонентами дозы от ^{131}I , отношения дозовых коэффициентов ожидаемой дозы облучения ЩЖ при ингаляционном и пероральном поступлении изотопов йода и теллура, отношения интегрированной во времени концентрации в приземном слое воздуха и в продуктах питания (молоке) изотопов йода и теллура.

Результаты. Типовой вклад короткоживущих изотопов йода в дозу облучения ЩЖ у населения по сравнению с дозой от ^{131}I после аварии на ЧАЭС составил несколько процентов, а после аварии на АЭС «Фукусима-1» – около 15% для наиболее интенсивных радиоактивных выпадений 15 марта 2011 г. Для обеих аварий ведущая роль в облучении ЩЖ у населения среди короткоживущих изотопов йода принадлежит ^{133}I и ^{132}I , при этом последний изотоп йода образовывался непосредственно в организме из поступившего ^{132}Te .

Выводы. Существенные отличия в оценках типового вклада короткоживущих изотопов йода в дозу облучения ЩЖ у населения после рассмотренных двух аварий объясняются различием в доминирующих путях поступления радиойода населению. После Чернобыльской аварии доминирующим путём поступления для подавляющего большинства жителей было пероральное поступление с коровьим молоком местного производства, а после Фукусимской аварии – ингаляционное поступление, поскольку японские власти сумели оперативно предотвратить поступление радиоактивного йода по пищевому пути.

Ключевые слова: Чернобыль; Фукусима; щитовидная железа; поглощённая доза облучения; ^{131}I ; короткоживущие изотопы йода; население; ингаляционное поступление; пероральное поступление.

Для цитирования: Шинкарев С.М., Самойлов А.С., Грановская Е.О., Корнева Е.А., Кухта Б.А., Андросова А.А., Яценко В.Н. Сравнительный анализ вклада короткоживущих изотопов йода в дозу облучения щитовидной железы у населения после Чернобыльской и Фукусимской аварий. *Гигиена и санитария*. 2017; 96(9): 827-832. DOI: <http://dx.doi.org/10.18821/0016-9900-2017-96-9-827-832>

Для корреспонденции: Шинкарев Сергей Михайлович, д-р техн. наук, зав. отд. промышленной радиационной гигиены ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России; 123182, Москва. E-mail: sshinkarev@mail.ru

Shinkarev S.M., Samoylov A.S., Granovskaya E.O., Korneva E.A., Kukhta B.A., Androsova A.A., Iatsenko V.N.
COMPARATIVE ANALYSIS OF THE CONTRIBUTION OF SHORT-LIVED RADIOIODINES TO THE THYROID RADIATION DOSE FOR THE POPULATION AFTER THE CHERNOBYL AND FUKUSHIMA ACCIDENTS

A.I. Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency, Moscow, 123182, Russian Federation

Purpose. To present results of the comparative analysis of the contribution of short-lived radioiodines to the thyroid radiation dose (TRD) in the population after two severe radiation accidents at nuclear reactors: the Chernobyl accident (1986) and the Fukushima accident (2011).

Material and methods. The contribution of short-lived radioiodines to the TRD is expressed in fractions of the TRD from ^{131}I (the main dose forming radionuclide). This contribution takes into account the ratio between doses from inhalation and ingestion intake of ^{131}I , the ratios between dose factors of the expected dose to the thyroid gland in the case of inhalation and ingestion intake of iodine and tellurium isotopes, the ratios between time-integrated concentration of iodine and tellurium isotopes at the ground-level air and in foodstuffs (milk).

Results. The typical contribution of short-lived radioiodines to TRD for the population accounts of few percent of dose to the thyroid gland from ^{131}I following the Chernobyl accident as on March 15, 2011, the day of the main fallout after the Fukushima accident - within 15%. For both accidents the leading role among the short-lived radioiodines in terms of dose to the thyroid for the public belongs to ^{133}I and ^{132}I (due to the intake of ^{132}Te and its radioactive decay to ^{132}I in the body).

Conclusion. Significant differences in estimates of the typical contribution of short-lived radioiodines to TRD for the population after two considered accidents can be explained by differences in the dominant pathways of the intake of radioiodine by population. The dominant pathway for the vast majority of the population in the contaminated areas following the Chernobyl accident was ingestion intake with locally produced cow's milk. Following the Fukushima accident the dominant pathway was inhalation intake, because the Japanese authorities were able to quickly prevent the intake of radioiodine with foodstuffs.

Key words: Chernobyl; Fukushima; thyroid; absorbed dose; ^{131}I ; short-lived radioiodines; the public; inhalation intake; ingestion intake.

For citation: Shinkarev S.M., Samoylov A.S., Granovskaya E.O., Korneva E.A., Kukhta B.A., Androsova A.A., Iatsenko V.N. Comparative analysis of the contribution of short-lived radioiodines to the thyroid radiation dose for the population after the Chernobyl and Fukushima accidents. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)* 2017; 96(9): 827-832. (In Russ.). DOI: <http://dx.doi.org/10.18821/0016-9900-2017-96-9-827-832>

For correspondence: Sergey M. Shinkarev, MD, PhD, DSci., Head of the Department of Industrial Radiation Hygiene of the A.I. Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency, Moscow, 123182, Russian Federation. E-mail: sshinkarev@mail.ru

Information about authors:

Shinkarev S.M. <http://orcid.org/0000-0003-0844-4733>; Granovskaya E.O. <http://orcid.org/0000-0002-6353-0469>; Korneva E.A. <http://orcid.org/0000-0001-8338-1192>; Kukhta B.A. <http://orcid.org/0000-0002-2315-7049>; Androsova A.A. <http://orcid.org/0000-0002-1071-5793>; Iatsenko V.N. <http://orcid.org/0000-0002-4344-5654>.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgement. The study had no sponsorship.

Received: 20 June 2017

Accepted: 05 July 2017

Введение

В общей научной проблеме, связанной с оценкой радиационного воздействия на щитовидную железу (ЩЖ) у населения после крупной радиационной аварии с выходом в атмосферу продуктов деления, отдельной задачей является расчёт вклада в дозу короткоживущих изотопов йода. Обычно этот вклад выражается в долях дозы излучения ^{131}I в ЩЖ, основного дозообразующего радионуклида, которому, как правило, уделяется основное внимание при оценке радиологической опасности для населения на раннем этапе радиационной аварии. Повышенное внимание к сопоставлению дозы в ЩЖ от короткоживущих изотопов йода к дозе от ^{131}I обусловлено ведущейся с начала 60-х годов прошлого века научной дискуссией, предметом которой является обоснованность утверждения, что биологическая эффективность облучения ЩЖ короткоживущими изотопами йода превышает таковую от облучения ^{131}I . При этом биологическую эффективность облучения ЩЖ короткоживущими изотопами йода и внешним гамма-излучением в отношении канцерогенеза ЩЖ считают одинаковой. В литературе [1–5] приводятся данные (в основном, полученные на животных), согласно которым диапазон этого превышения может находиться в широких пределах от 1 (нет различий в биологических эффектах) [1] до более 10 раз [2–4]. НКДАР ООН в своих отчётах [5, 6] рекомендует принимать значение этого превышения для человека равным трём, отмечая, что необходимо проведение дальнейших научных исследований по проблеме оценки сравнительной биологической эффективности облучения ЩЖ короткоживущими изотопами йода и ^{131}I .

С учётом вышеизложенного представляется важным отдельно проводить оценки дозы облучения ЩЖ от ^{131}I и от короткоживущих изотопов йода при рассмотрении возможных последствий облучения человека. Несомненный интерес вызывает сравнительный анализ вклада короткоживущих изотопов йода в дозу облучения ЩЖ у населения после двух наиболее крупных аварий на атомных реакторах: на ЧАЭС в 1986 г. и на АЭС «Фукусима-1» в 2011 г. Проведение такого анализа является целью этой статьи.

Материал и методы

Метод оценки дозы облучения ЩЖ от короткоживущих изотопов йода подробно представлен в [7]. В основе метода лежит расчётная модель, описывающая выброс из реактора радиоактивных изотопов йода и их предшественников – изотопов теллура, последующее распространение радионуклидов во внешней среде и кинетику поступления в организм человека. Общая формула расчёта относительного вклада в поглощённую дозу в ЩЖ короткоживущих изотопов йода по сравнению с дозой от ^{131}I имеет вид:

$$S_{\text{short}} = \frac{D_{\text{gl}}}{D_1} \times S_{\text{g,short}} + \frac{D_{\text{hl}}}{D_1} \times S_{\text{h,short}} \quad (1)$$

где S_{short} – относительный вклад в дозу в ЩЖ короткоживущих изотопов йода по сравнению с дозой от ^{131}I , отн. ед; D_{gl} , D_{hl} – доза излучения ^{131}I в ЩЖ при его пероральном и ингаляционном поступлении в организм, соответственно, Гр; $D_1 = D_{\text{gl}} + D_{\text{hl}}$ – суммарная доза излучения ^{131}I в ЩЖ, обусловленная всеми путями поступления в организм, Гр; $S_{\text{g,short}}$ – относительный вклад в дозу короткоживущих изотопов йода по сравнению с дозой от ^{131}I при пероральном поступлении нуклидов, отн. ед; $S_{\text{h,short}}$ – относительный вклад в дозу короткоживущих изотопов йода по сравнению с дозой от ^{131}I при ингаляционном поступлении нуклидов, отн. ед;

Формулы расчёта параметров $S_{\text{g,short}}$ и $S_{\text{h,short}}$ имеют вид:

$$S_{\text{g,short}} = \sum_{i=2}^n \left(\frac{F_{\text{gi}}}{F_{\text{gl}}} \times \frac{Q_{\text{gi}}}{Q_{\text{gl}}} \right), \quad (2)$$

$$S_{\text{h,short}} = \sum_{i=2}^n \left(\frac{F_{\text{hi}}}{F_{\text{hl}}} \times \frac{Q_{\text{hi}}}{Q_{\text{hl}}} \right), \quad (3)$$

где n – число учитываемых радиоактивных изотопов йода и теллура; F_{gi} , F_{hi} – дозовые коэффициенты при пероральном и ингаляционном поступлении короткоживущих изотопов йода и теллура в организм соответственно, Гр/Бк; F_{gl} , F_{hl} – дозовые коэффициенты при пероральном и ингаляционном поступлении ^{131}I в организм соответственно, Гр/Бк; Q_{gi} , Q_{hi} – интегральное пероральное и ингаляционное поступление в организм короткоживущих изотопов йода и теллура соответственно, Бк; Q_{gl} , Q_{hl} – интегральное пероральное и ингаляционное поступление в организм ^{131}I , Бк.

Следует отметить, что выход в атмосферу продуктов деления из Чернобыльского реактора фактически произошёл одновременно с прекращением цепной реакции деления в результате взрыва и последующего разрушения самого реактора. Поэтому для Чернобыльской аварии необходимо рассматривать возможный вклад в дозу облучения ЩЖ у населения большого числа короткоживущих изотопов йода и теллура, период полураспада которых превышает десятки минут. Развитие аварии на АЭС «Фукусима-1» существенно отличается от аварии на ЧАЭС. Как известно, первый радиоактивный выброс в атмосферу произошёл спустя более одних суток после останова реакторов. Это привело к практически полному распаду многих короткоживущих изотопов йода и теллура, период полураспада которых составлял менее нескольких часов.

Тщательный анализ радиационной значимости всех радиоактивных изотопов йода и теллура для условий Чернобыльской аварии показал, что только 5 радионуклидов (^{132}I , ^{133}I , ^{135}I , $^{131\text{m}}\text{Te}$, ^{132}Te) могут внести парциальный вклад в поглощённую дозу в ЩЖ жителей, превышающую 1% относительно вклада в дозу излучения ^{131}I [7]. Причём, среди этих 5 поступлений в организм только 2 радионуклида

(^{133}I и ^{132}Te) фактически определяют дозу облучения ЩЖ от короткоживущих изотопов йода [7, 8]. Следует отметить, что при поступлении в организм ^{132}Te дозу в ЩЖ создаёт ^{132}I , который образуется непосредственно в организме из ^{132}Te . Аналогичный анализ радиационной значимости короткоживущих изотопов йода и теллура, выброшенных из реакторов АЭС «Фукусима-1», выявил только 2 значимых радионуклида: ^{133}I и ^{132}Te [9–11].

Необходимо подчеркнуть еще одно принципиальное различие в условиях формирования дозы облучения ЩЖ у населения после 2 рассматриваемых аварий. Основным путем поступления радиоактивного йода населению, подвергнутому радиационному воздействию после аварии на ЧАЭС, явилось его пероральное поступление со свежим коровьим молоком местного производства [4, 6], что доказано на основе анализа большого числа прямых измерений ЩЖ (десятки тысяч) у населения Белоруссии [12]. Для условий Фукусимской аварии основным путем поступления радиоактивного йода населению оказался ингаляционный путь [13, 14], что также убедительно показано в отчете МАГАТЭ [10] с использованием ограниченного массива из 1080 результатов прямых измерений ЩЖ у детей в возрасте до 15 лет из трёх населенных пунктов Фукусимской префектуры.

Расчёт вклада короткоживущих изотопов йода в дозу облучения ЩЖ у населения по формуле (1) после Чернобыльской аварии проводился при следующих исходных условиях. Поскольку значения относительного вклада в дозу излучения ^{131}I в ЩЖ пероральной ($D_{\text{gl}}/D_{\text{i}}$) и ингаляционной ($D_{\text{hi}}/D_{\text{i}}$) компонент можно оценить только расчётным путём, то предполагалось, что для взрослых жителей, постоянно проживавших в сельской местности и потреблявших в пищу загрязнённое молоко местного производства от коров, выпас которых начался до даты загрязнения мест проживания, соотношение между ингаляционной и пероральной компонентами дозы излучения ^{131}I в ЩЖ составляло 5% [7]. Это предположение было использовано при оценке аналогичных соотношений для взрослых и детей из разных возрастных групп для различных регионов, подвергшихся загрязнению. При проведении расчётов учитывались следующие факторы: различия в скоростях дыхания и суточном потреблении молока взрослыми и детьми, эвакуация, вывоз детей, прекращение потребления молока, а также более позднее по сравнению с периодом выпадений начало выпаса скота в ряде регионов [7].

При расчёте значений отношений дозовых коэффициентов для 5 выделенных нуклидов к дозовому коэффициенту для ^{131}I по шести возрастным группам (3 месяца, 1 год, 5, 10, 15 лет и взрослый) при пероральном и ингаляционном поступлении нуклидов в организм использовались данные из Публикаций МКРЗ: 56 [15] (F_{gl} для ^{131}I), 67 [16] (F_{gl} для ^{132}I , $^{131\text{m}}\text{Te}$ и ^{132}Te), 72 [17] (F_{gl} для ^{133}I и ^{135}I в предположении, что отношения дозовых коэффициентов эквивалентны значениям отношений коэффициентов эффективной дозы) и 71 [18] (F_{hi} для всех нуклидов ^{131}I , ^{132}I , ^{133}I , ^{135}I , $^{131\text{m}}\text{Te}$ и ^{132}Te в предположении поступления аэрозолей с АМАД = 1 мкм, характеризующихся растворимостью F типа). Для изотопов теллура при расчёте значений отношений дозовых коэффициентов учитывался вклад в облучение ЩЖ излучения соответствующих дочерних изотопов йода, образующихся в организме человека. Значения отношений слабо зависят от возраста, а в пределах одной возрастной группы вариация значений отношений дозовых коэффициентов обусловлена главным образом различиями в значениях периодов полураспада.

Для расчёта отношений интегрального перорального (ингаляционного) поступления короткоживущих изотопов йода и теллура к интегральному пероральному (ингаляционному) поступлению ^{131}I ($Q_{\text{gl}}/Q_{\text{gl}}$) и ($Q_{\text{hi}}/Q_{\text{hi}}$) в работе [7] принимались следующие предположения:

– Вся загрязнённая территория разделена на регионы, в каждом из которых были одинаковые условия формирования

дозы в ЩЖ от радиоактивных изотопов йода и теллура.

Выпадения были пролонгированы во времени с учетом данных работ [19, 20]; в отдельных регионах радиоактивные выпадения проходили с дождями. В ряде регионов выпас коров начался после 26 апреля 1986 г.

– Значения отношений $^{132}\text{Te}/^{131}\text{I}$ в выпадениях определялись для каждого региона на основании данных работы [21].

– Значения отношений $^{132}\text{Te}/^{131}\text{I}$ в воздухе рассчитывались на основании этих отношений в выпадениях. При этом принималось, что для сухих выпадений отношение в воздухе равно отношению в выпадениях, а для выпадений с дождём рассматриваемое отношение в воздухе в три раза меньше, чем в выпадениях.

Поскольку после Фукусимской аварии основным путём поступления радиоактивного йода в организм для населения был ингаляционный путь, то в расчётах по формуле (1) отсутствовала пероральная составляющая. При проведении оценок доз облучения ЩЖ у населения Японии НКДАР ООН использовал предположение, что радиоактивный йод распространялся в виде двух фракций: аэрозольной и газообразной элементарной [9]. Для оценки вклада короткоживущих изотопов йода в дозу облучения ЩЖ по ингаляционному пути поступления были использованы те же предположения, что и в отчете НКДАР ООН. При этом принималось, что соотношение газовой компоненты к аэрозольной фракции составляло 1,5. Кроме того, считалось, что скорости осаднения на подстилающую поверхность аэрозольной фракции йода и теллура одинаковы.

В качестве дня основных выпадений в Фукусимской и соседних префектурах принималось 15 марта 2011 года [22, 23]. Результаты оценки соотношения $^{132}\text{Te}/^{131}\text{I}$ в выпадениях, полученные по данным измерений, показывают существенную их вариабельность в зависимости от времени и места выпадений. НКДАР ООН в своих расчётах использовал два значения соотношения $^{132}\text{Te}/^{131}\text{I}$ в выпадениях, скорректированных с учётом радиоактивного распада к 15 марта 2011 г.: 1 – 0,7 для всей территории Японии за исключением южного следа и 2 – 0,8 для южного следа [9]. Такие же соотношения принимались в настоящих расчётах.

Результаты

Оценки вклада короткоживущих изотопов йода в поглощённую дозу в ЩЖ, S_{short} , у населения после аварии на ЧАЭС, выраженного в долях дозы излучения ^{131}I в ЩЖ, рассчитанные по формуле (1) с учётом приведённых выше моделей и принятых предположений, приведены в табл. 1 (первые три строки). Следующие две строки содержат оценки S_{short} для жителей Припяти (Украина). Они заимствованы из работы [8], где приводятся такие оценки для 65 жителей Припяти, эвакуированных в Ленинград (ныне Санкт-Петербург) и госпитализированных в клинику Военно-медицинской академии. В этой академии 65 жителей Припяти прошли медицинское и радиометрическое обследование, включая спектрометрические измерения содержания радионуклидов в ЩЖ и легких, проведённые в период с 30 апреля по 4 мая 1986 г. Особая ценность представленных в работе [8] оценок S_{short} заключается в том, что это единственные опубликованные данные, рассчитанные по результатам прямых измерений, проведённых в первые дни после Чернобыльской аварии у жителей.

Авторы работы [8] отмечают, что ^{133}I и ^{132}Te внесли основной вклад в дозу излучения короткоживущих изотопов йода в ЩЖ. Раздельно рассмотрены 2 группы жителей: принимавших и не принимавших таблетки KI в период 26–27 апреля 1986 г. в Припяти до эвакуации. Из представленных в табл. 1 данных следует, что для лиц, не принимавших таблетки KI, суммарный вклад короткоживущих изотопов йода по сравнению с дозой излучения ^{131}I составляет в среднем около 24%, в то время как для тех, кто принимал таблетки KI, этот вклад приблизительно в 6 раз выше (150%). Максимальные оценки

Оценки вклада короткоживущих изотопов йода в поглощённую дозу в ЩЖ, S_{short} у населения после аварии на ЧАЭС

Территория, население	Путь поступления	Короткоживущие изотопы йода и теллура	S_{short} Отн. ед.	Источник	Измерения, человек
<i>Белоруссия:</i>					
городские и сельские жители	Ингаляционный	Сумма изотопов I и Te	0,1–0,4 0,1–0,5	[24] [25]	
городские жители	Ингаляционный + пероральный	Сумма изотопов I и Te	0,003–0,03	[7]	
сельские жители	То же	Сумма изотопов I и Te	0,01–0,06 0,03–0,07 0,07–0,1& 0,003–0,04#	[24] [25] [7] [7]	
<i>Украина, Припять:</i>					
жители, не принимавшие KI	Ингаляционный	^{132}Te ^{133}I Сумма изотопов I и Te	0,13 ± 0,02\$ 0,11 ± 0,07 0,24	[8] [8] [8]	17 8
жители, принимавшие KI 26-27 апреля 1986 года	То же	^{132}Te ^{133}I Сумма изотопов I и Te	0,9 ± 0,1 0,6 ± 0,6 1,5	[8] [8] [8]	42 14
все жители	" "	^{133}I	0,3	[26]	

Примечание. & – жители отселённых деревень (до 5 мая 1986 г.) из трёх южных районов Гомельской области (потребление молока только в течение первой недели); # – жители остальных районов Белоруссии; \$ – приводятся средние значения и стандартные отклонения.

вклада ^{132}I (образованного из ^{132}Te) в дозу в ЩЖ в долях дозы излучения ^{131}I для обследованных лиц составили: $0,4 \pm 0,09$ (из числа тех, кто не принимал KI) и $3,2 \pm 0,7$ (кто принимал KI) [8]. Вместе с тем, авторы [8] подчеркивают, что для жителей, принимавших таблетки KI, доза излучения ^{131}I в ЩЖ оказалась ниже в 10 раз, а доза излучения короткоживущих изотопов йода – ниже в 5 раз по сравнению с жителями, не принимавшими KI. Приведённые в работе [8] оценки S_{short} для жителей Припяти, полученные по результатам прямых измерений, можно рассматривать в качестве усреднённых максимальных оценок вклада короткоживущих изотопов йода в поглощённую дозу в ЩЖ у сельских и городских жителей Белоруссии, не употреблявших в пищу свежее молоко. При этом следует ориентироваться на оценки S_{short} для жителей Припяти, не употреблявших таблетки KI, поскольку столь раннее и своевременное применение таблеток KI было зафиксировано только для жителей Припяти. Усреднённое значение $S_{short} = 0,24$ для жителей Припяти согласуется с теоретическими оценками S_{short} , приведёнными в работах [24, 25] для ингаляционного пути поступления.

В качестве иллюстрации на рисунке приведена зависимость вклада короткоживущих изотопов йода в дозу облучения ЩЖ по сравнению с дозой облучения ^{131}I , S_{short} , для ребёнка в возрасте 1 года от даты ингаляционного поступления радиоактивного йода после аварии на АЭС «Фукусима-1», полученная с использованием принятых выше предположений [11]. При расчётах использовано значение отношения $^{132}\text{Te}/^{131}\text{I}$ в выпадениях равное 0,7. Из рис. 1 следует, что относительный вклад ^{133}I в облучение ЩЖ (D_{133}/D_{131}) существенно снижается примерно с 0,25 на 12 марта до 0,001 на 20 марта. Только на 12 марта этот вклад превышает вклад в облучение ЩЖ от ингаляционного поступления ^{132}Te (D_{132}/D_{131}), но уже начиная с 14 марта вклад в дозу облучения ЩЖ от поступления ^{132}Te превосходит соответствующий вклад от поступления ^{133}I и становится определяющим вкладом в дозу облучения ЩЖ от короткоживущих изотопов йода. Суммарный вклад короткоживущих изотопов йода в дозу облучения ЩЖ, S_{short} , снижается с 0,40 на 12 марта до 0,05 на 20 марта.

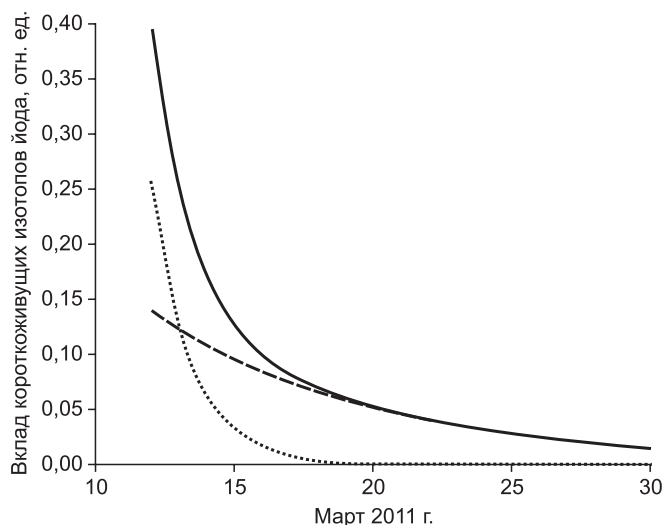
Оценки относительного вклада короткоживущих изотопов йода в дозу облучения ЩЖ, S_{short} , для лиц из населения из трёх возрастных групп (ребёнок в возрасте 1 года, дети в

возрасте 10 лет и взрослые) в предположении двух вариантов однократного ингаляционного поступления радиоактивного йода: 1 – 12 марта, в первый день начала выпадений и 2 – 15 марта, в день максимальных выпадений, даны в табл. 2.

Для основных выбросов в атмосферу, происшедших 15 марта 2011 г., оценки этого вклада находятся в пределах 0,15 дозы облучения ЩЖ от ^{131}I для лиц из рассматриваемых трёх возрастных групп при реалистичных диапазонах значений вышеупомянутых параметров. При этом относительная значимость облучения ЩЖ от ^{132}I , образованного из ^{132}Te , поступившего в организм, больше примерно в 3 раза по сравнению с облучением от ^{133}I . Иная ситуация при ингаляционном поступлении 12 марта 2011 г. В этом случае относительный вклад суммы короткоживущих радиоактивных изотопов йода составит около 0,4 от дозы облучения ЩЖ ^{131}I , а вклад ^{133}I в облучение ЩЖ окажется примерно в 2 раза больше, чем вклад от ^{132}I , образованного непосредственно в организме от ингаляционно поступившего ^{132}Te . Однако абсолютное значение дозы облучения ЩЖ от суммы всех изотопов йода, включая и ^{131}I , при ингаляционном поступлении 12 марта лицу любого возраста оказывается значительно ниже, чем аналогичная доза облучения ЩЖ при ингаляционном поступлении 15 марта. Поскольку количество радиойода, выброшенного из аварийных реакторов 15 марта, было намного больше, и сам выброс распространялся в северо-западном направлении над территорией Японии, а выбросы радиойода 12 марта были гораздо меньшими по активности и они частично были отнесены в сторону океана. Различия в значениях вклада короткоживущих изотопов йода в дозу облучения ЩЖ для лиц разного возраста не превышают 30%, а наибольшие значения этого вклада наблюдаются у ребёнка в возрасте 1 года.

Обсуждение

В работе [26] приводится теоретическая оценка S_{short} для жителей Припяти при поступлении ^{133}I , который, по мнению авторов этой статьи, являлся ведущим среди короткоживущих изотопов йода (см. табл. 1). Представляется, что эту оценку следует считать максимальной оценкой дозы излучения ^{133}I в ЩЖ, а вывод о ведущей роли ^{133}I нуждается в коррекции, поскольку по данным работы [8] вклад в дозу в ЩЖ у жителей Припяти от поступления ^{132}Te оказался не-



Зависимость вклада короткоживущих изотопов йода в дозу облучения ЩЖ по сравнению с дозой облучения ^{131}I , S_{short} , для ребенка в возрасте 1 года от даты однократного ингаляционного поступления радиоактивного йода [11] после аварии на АЭС «Фукусима-1».

скольким большим, чем от поступления ^{133}I . В табл. 1 оценки S_{short} публикации [7] для смешанного (перорального и ингаляционного) поступления являются более достоверными, чем публикаций [24, 25], поскольку основываются на более реалистичных моделях совместного поступления населению радиоактивных изотопов йода и теллура по этим двум путям.

С учетом сопоставительного анализа представленных в табл. 1 данных оценки вклада короткоживущих изотопов йода в поглощенную дозу в ЩЖ, S_{short} у населения после аварии на ЧАЭС можно характеризовать для городских и сельских жителей следующими диапазонами:

- 0,1–0,5 – для жителей, не употреблявших в пищу загрязнённое молоко;
- 0,003–0,04 – для жителей, употреблявших в пищу загрязнённое молоко.

Следует подчеркнуть, что из числа короткоживущих изотопов йода наибольший вклад в поглощенную дозу в ЩЖ у населения обусловлен ^{133}I и ^{132}I (образующимся в организме из поступившего ^{132}Te).

При сопоставлении оценок вклада короткоживущих изотопов йода в дозу облучения ЩЖ у населения после аварии на ЧАЭС и на АЭС «Фукусима-1» необходимо отметить, что этот вклад для подавляющего большинства жителей на загрязнённых после Чернобыльской аварии территориях был значительно ниже и, как правило, не превышал нескольких процентов [7]. Низкий вклад короткоживущих изотопов йода в облучение ЩЖ объясняется тем, что в 1986 г. основным путем поступления радиоактивного йода населению было потребление свежего молока от коров, содержащихся на пастбищах.

Поступление населению радиоактивного йода с загрязнённым молоком после аварии на ЧАЭС привело к многократно большему поглощенным дозам в ЩЖ от ^{131}I (до 50 Гр) [27], чем после аварии на АЭС «Фукусима-1». Согласно авторитетным оценкам НКДАР ООН [9] и МАГАТЭ [10] средние дозы облучения ЩЖ у эвакуированного населения из населённых пунктов Фукусимской префектуры составили: 0,007–0,035 Гр – взрослые и 0,015–0,083 Гр – дети в возрасте 1 года, а у неэвакуированного населения из Фукусимской и шести соседних префектур средние дозы облучения ЩЖ составили: 0,001–0,017 Гр – взрослые и 0,003–0,052 Гр – дети в возрасте 1 года [9].

Оценки вклада короткоживущих изотопов йода в поглощенную дозу в ЩЖ, S_{short} у лиц из населения из трёх возрастных групп (ребёнок в возрасте 1 года, дети в возрасте 10 лет и взрослые) после аварии на АЭС «Фукусима-1» в предположении двух вариантов однократного ингаляционного поступления радиоактивного йода: 1–12 марта 2011 г. в первый день начала выпадений и 2–15 марта 2011 г. в день максимальных выпадений [11]

Возрастная группа	D_{133}/D_{131}		D_{132}/D_{131}		S_{short}	
	12 марта	15 марта	12 марта	15 марта	12 марта	15 марта
1 год	0,26	0,030	0,14	0,096	0,40	0,126
10 лет	0,21	0,024	0,10	0,069	0,31	0,093
Взрослый	0,20	0,023	0,09	0,066	0,29	0,089

Относительно низкие дозы облучения ЩЖ от ^{131}I у жителей Японии по сравнению с дозами, полученными населением, проживавшим на территориях, загрязнённых после аварии на ЧАЭС, объясняются тем, что в случае аварии на АЭС «Фукусима-1» японские власти сумели оперативно проинформировать население о радиационной аварии и провести эффективные контрмеры по блокированию перорального поступления радиоактивного йода с продуктами питания, в том числе и с молоком местного производства. Необходимо также отметить, что структура самой диеты населения Японии существенно отличается от таковой в бывшем СССР. Так например, для населения Фукусимской и соседних префектур основное поступление радиоактивного йода происходило ингаляционным путем [10], что привело к большему отношению вклада в суммарную дозу облучения ЩЖ от короткоживущих изотопов йода, но одновременно на несколько порядков более низким дозам облучения ЩЖ от суммы радиоактивных изотопов йода, чем в случае аварии на ЧАЭС.

Заключение

В статье представлен сравнительный анализ вклада короткоживущих изотопов йода в дозу облучения ЩЖ у населения после двух наиболее крупных радиационных аварий на ЧАЭС в 1986 г. и на АЭС «Фукусима-1» в 2011 г. Отмечено, что доминирующим путём поступления радиоактивного йода для подавляющего большинства жителей после Чернобыльской аварии было пероральное поступление с коровьим молоком местного производства. Знаковое отличие ситуации с облучением ЩЖ у населения после Фукусимской аварии состояло в том, что основным путём поступления радиоактивного йода населению оказался ингаляционный путь, поскольку японские власти сумели оперативно предотвратить поступление радиоактивного йода по пищевому пути.

Согласно приведённым оценкам, типовой вклад короткоживущих изотопов йода в дозу облучения ЩЖ у населения по сравнению с дозой от ^{131}I после аварии на ЧАЭС составил несколько процентов, а после аварии на АЭС «Фукусима-1» – около 15% для наиболее интенсивных радиоактивных выпадений, происшедших 15 марта 2011 г. Важно подчеркнуть, что для обеих аварий ведущая роль в облучении ЩЖ у населения среди короткоживущих изотопов йода принадлежит ^{133}I и ^{132}I , при этом последний изотоп йода образовывался непосредственно в организме из поступившего ^{132}Te .

Вместе с тем, необходимо констатировать, что дозы облучения ЩЖ у населения от ^{131}I после аварии на ЧАЭС были на несколько порядков больше и достигали 50 Гр (по данным прямых измерений ЩЖ), в то время как после аварии на АЭС «Фукусима-1» максимальные дозы облучения ЩЖ (по модельным расчётам) могли составить несколько десятых долей Гр. Такая разница в большей степени объясняется различием в доминирующих путях поступления радиоактивного йода населению после этих двух аварий.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.
Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литература (п.п. 4–11, 13–18, 22–27 см. References)

1. Москалёв Ю.И. Актуальные проблемы радиобиологии инкорпорированных изотопов йода. В кн.: Москалёв Ю.И., Калистратова В.С., ред. Кинетика обмена, биологическое действие радиоактивных изотопов йода. М.; 1989: 7–28.
2. Василенко И.Я. Токсикологическая характеристика радиоактивных изотопов йода. В кн.: Москалёв Ю.И., Калистратова В.С. ред. Кинетика обмена, биологическое действие радиоактивных изотопов йода. М.; 1989: 29–40.
3. Публикация 96 НКРЗ США. Сравнительная канцерогенная эффективность ионизирующего излучения и химических соединений. Перев. с англ. М.: Энергоатомиздат; 1992.
12. Шинкарев С.М. Метод идентификации основного пути поступления ¹³¹I населению по результатам радиометрического обследования щитовидной железы после аварии на ЧАЭС. АНРИ. 2008; (4): 39–51.
19. Израэль Ю.А., Вакуловский С.М., Ветров В.А., Петров В.Н., Ровинский Ф.Я., Стукин Е.Д. Чернобыль: радиоактивное загрязнение природных сред. Ленинград: Гидрометеоздат; 1990.
20. Махонько К.П., Козлова Е.Г., Волокитин А.А. Динамика накопления радиойода на почве и реконструкция доз от его излучения на территории, загрязнённой после аварии на Чернобыльской АЭС. Радиация и риск. 1996; (7): 140–91.
21. Дубина Ю.В., Щекин Ю.К., Гускина Л.Н. Систематизация и верификация данных спектрометрического анализа проб почвы, травы, молока и молочных продуктов с измеренным уровнем содержания йода-131. Отчёт о НИР. ИАЭ АН БССР. Минск; 1990.

References

1. Moskalev Yu.I. Actual problems of radiobiology of incorporated iodine isotopes. In: Moskalev Yu.I., Kalistratova V.S., eds. The Kinetics of Metabolism, the Biological Effect of Radioactive Isotopes of Iodine [Kinetika obmena, biologicheskoe deystvie radioaktivnykh izotopov yoda]. Moscow; 1989: 7–28. (in Russian)
2. Vasilenko I.Ya. Toxicological characteristics of radioactive isotopes of iodine. In: Moskalev Yu.I., Kalistratova V.S., eds. The Kinetics of Metabolism, the Biological Effect of Radioactive Isotopes of Iodine [Kinetika obmena, biologicheskoe deystvie radioaktivnykh izotopov yoda]. Moscow; 1989: 29–40. (in Russian)
3. NCRP. Comparative Carcinogenicity of Ionizing Radiation and Chemicals Purchase. NCRP Report No. 96; 1989. (in Russian)
4. United Nations. Sources and effects of ionizing radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2000 Report to the General Assembly. Annex J. Exposures and effects from the Chernobyl accident. New York, 2000.
5. United Nations. Sources, effects and risks of ionizing radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 1988 Report to the General Assembly. New York; 1988.
6. United Nations. Sources and effects of ionizing radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2008 Report to the General Assembly. Annex. Health effects due to radiation from the Chernobyl accident. New York; 2008.
7. Gavrillin Yu., Khrouch V., Shinkarev S., Drozdovitch V., Minenko V., Shemiakina E., et al. Individual thyroid dose estimation for a case-control study of Chernobyl-related thyroid cancer among children of Belarus – Part I: ¹³¹I, short-lived radioiodines (¹³²I, ¹³³I, ¹³⁵I), and short-lived radiotelluriums (^{131m}Te and ¹³²Te). Health Phys. 2004; 86(6): 565–85.
8. Balonov M., Kaidanovsky G., Zvonova I., Kovtun A., Bouville A., Luckyanov N., et al. Contributions of short-lived radioiodines to thyroid doses received by evacuees from the Chernobyl area estimated using early in vivo activity measurements. Radiat. Prot. Dosimetry. 2003; 105(1-4): 593–9.
9. United Nations. Sources and effects of ionizing radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Volume 1: 2013 Report to the General Assembly. Annex A: Levels and effects of radiation exposure due to the nuclear accident after the 2011 great east-Japan earthquake and tsunami. New York; 2014.
10. IAEA. The Fukushima Daiichi Accident. International Atomic Energy Agency. Vienna; 2015.

11. Shinkarev S.M., Kotenko K.V., Granovskaya E.O., Yatsenko V.N., Imanaka T., Hoshi M. Estimation of the contribution of short-lived radioiodines to the thyroid dose for the public in case of inhalation intake following the Fukushima accident. Radiat. Prot. Dosimetry. 2015; 164(1-2): 51–6.
12. Shinkarev S.M. Method of identification of the main pathways of ¹³¹I intake to the population because of a radiometric survey of the thyroid gland after the accident. ANRI. 2008; (4): 39–51. (in Russian)
13. Kim E., Kurihara O., Kunishima N., Nakano T., Tani K., Hachiya M., et al. Early Intake of Radiocesium by Residents Living Near the TEPCO Fukushima Dai-Ichi Nuclear Power Plant after the Accident. Part 1: Internal Doses Based on Whole-body Measurements by NIRS. Health Phys. 2016; 111(5): 451–64.
14. Kim E., Kurihara O., Kunishima N., Momose T., Ishikawa T., Akashi M. Internal thyroid doses to Fukushima residents – estimation and issues remaining. J. Radiat. Res. 2016; 57(Suppl. 1): i118–i126.
15. ICRP – International Commission on Radiological Protection. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 1. Ingestion dose coefficients. ICRP Publication 56. Ann. ICRP. 1990; 20(2).
16. ICRP – International Commission on Radiological Protection. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 2. Ingestion dose coefficients. ICRP Publication 67. Ann. ICRP. 1993; 23(3/4).
17. ICRP – International Commission on Radiological Protection. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 5. Compilation of ingestion and inhalation dose coefficients. ICRP Publication 72. Ann. ICRP. 1996; 26(1).
18. ICRP – International Commission on Radiological Protection. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 4. Inhalation dose coefficients. ICRP Publication 71. Ann. ICRP. 1995; 25(3-4).
19. Izrael' Yu.A., Vakulovskiy S.M., Vetrov V.A., Petrov V.N., Rovinskiy F.Ya., Stukin E.D. Chernobyl: Radioactive Contamination of Natural Environments [Chernobyl': radioaktivnoe zagryaznenie prirodnykh sred]. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1990. (in Russian)
20. Makhon'ko K.P., Kozlova E.G., Volokitin A.A. Dynamics of accumulation of radioiodine on soil and reconstruction of doses from its radiation in the territory contaminated after the Chernobyl accident. Radiatsiya i risk. 1996; (7): 140–91. (in Russian)
21. Dubina Yu.V., Shchekin Yu.K., Guskina L.N. Systematization and Verification of Spectrometric Analysis of Soil, Grass, Milk and Dairy Products Samples with a Measured Iodine-131 Content. Report on SRW. IAE AN BSSR [Sistematzatsiya i verifikatsiya dannykh spektrometricheskogo analiza prob pochvy, travy, moloka i molochnykh produktov s izmerennym уровнем soderzhaniya yoda-131. Otchet o NIR. IAE AN BSSR]. Minsk; 1990. (in Russian)
22. Tazoe H., Hosoda M., Sorimachi A., Nakata A., Yoshida M.A., Tokonami S., et al. Radioactive pollution from Fukushima Daiichi nuclear power plant in the terrestrial environment. Radiat. Prot. Dosimetry. 2012; 152(1-3): 198–203.
23. Imanaka T., Endo S., Sugai M., Ozawa S., Shizuma K., Yamamoto M. Early radiation survey of Iitate village, which was heavily contaminated by the Fukushima Daiichi accident, conducted on 28 and 29 March 2011. Health Phys. 2012; 102(6): 680–6.
24. Shinkarev S., Gavrillin Yu., Khrouch V., Minenko V., Shemyakina E., Tretyakevitch S., et al. Chernobyl accident: Preliminary estimates of thyroid dose based on direct thyroid measurements conducted in Belarus. In: Harmonization of Radiation, Human Life and the Ecosystem, Proceedings (10th Congress of the International Radiation Protection Association). Hiroshima: International Radiation Protection Association; 2000: 11–260.
25. Gavrillin Y.I., Khrouch V.T., Shinkarev S.M., Krysenko N.A., Skryabin A.M., Bouville A., et al. Chernobyl Accident: Reconstruction of Thyroid Dose for Inhabitants of the Republic of Belarus. Health Phys. 1999; 76(2): 105–19.
26. Goulko G.M., Chumak V.V., Chepurny N.I., Henrichs K., Jacob P., Kairo I.A., et al. Estimation of thyroid doses for the evacuees from Pripyat. Radiat. Environ. Biophys. 1996; 35(2): 81–7.
27. Shinkarev S.M., Voillequé P.G., Gavrillin Y.I., Khrouch V.T., Bouville A., Hoshi M., et al. Credibility of Chernobyl thyroid doses exceeding 10 Gy based on in-vivo measurements of ¹³¹I in Belarus. Health Phys. 2008; 94(2): 180–7.

Поступила 20.06.17
Принята к печати 05.07.17