8. Thakur P, Ballard S, Nelson R. An overview of Fukushima radionuclides measured in the northern hemisphere. Sci Total Environ 2013; 458–460: 577–613.

9. Suto Y, Hraii M, Akiyama M, et al. First report on biodosimetry of restorstion workers for Tokyo Electric Power Company Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident. In: The Joint International Simposium on EPR Dosimetry and Dating and the International Conference on Biological Dosimetry: Abstracts of lectures and poster presentations. Leiden, The Netherlands, March 24–28, 2013; p. 119.

10. Lee J-K, Han E-A, Lee S-S, et al. Cytogenetic biodosimetry for Fukushima travelers after the nuclear power plant accident: no evidence of enhanced yield of dicentrics. J Radiation Research 2012; 53 (6): 876–881.

11. Chen Y, Zhou PK, Zhang XQ, et al. Cytogenetic studies for a group of people living in Japan 1 year after the Fukushima nuclear accident. Radiat Prot Dosimetry 2014; 159 (1-4): 20–25.

УДК 613.64 Оригинальная статья

УЧЕТ ВКЛАДА ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ИНКОРПОРИРОВАННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ ЦЕЗИЯ ПРИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ РАДИОМЕТРИЧЕСКОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ ЖИТЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ СОДЕРЖАНИЯ РАДИОАКТИВНОГО ЙОДА В ЩИТОВИДНОЙ ЖЕЛЕЗЕ ПОСЛЕ РАДИАЦИОННОЙ АВАРИИ НА АЭС

С. М. Шинкарев *— ФГБУ «Государственный научный центр Российской Федерации — Федеральный медицинский биофизический центр им. А. И. Бурназяна» ФМБА России, заведующий отделом, доктор технических наук;* ***Ю. И. Гаврилин*** *— ФГБУ «Государственный научный центр Российской Федерации — Федеральный медицинский биофизический центр им. А. И. Бурназяна» ФМБА России, ведущий научный сотрудник, доктор технических наук;* ***А. А. Андросова*** *— ФГБУ «Государственный научный центр Российской Федерации — Федеральный медицинский биофизический центр им. А. И. Бурназяна» ФМБА России, научный сотрудник.*

ESTIMATION OF THE CONTRIBUTION OF GAMMA-EMISSION OF INCORPORATED CESIUM RADIOISOTOPES IN INTERPRETATION OF THE RESULTS OF THE PUBLIC SURVEY TO ASSESS THE THYROIDAL IODINE CONTENT FOLLOWING A RADIATION ACCIDENT AT THE NUCLEAR POWER PLANT

S. M. Shinkarev *— Federal Medical and Biophysical Center n.a. A. I. Burnazyan, Head of Department, Doctor of Engineering;* ***Yu. I. Gavrilin*** *— Federal Medical and Biophysical Center n.a. A. I. Burnazyan, Leading researcher, Doctor of Engineering;* ***A. A. Androsova*** *— Federal Medical and Biophysical Center n.a. A. I. Burnazyan, Researcher.*

Дата поступления — 14.11.2014 г. Дата принятия в печать — 10.12.2014 г.

Шинкарев С. М., Гаврилин Ю. И., Андросова А. А. **Учет вклада гамма-излучения инкорпорированных радионуклидов цезия при интерпретации результатов радиометрического обследования жителей для оценки содержания радиоактивного йода в щитовидной железе после радиационной аварии на АЭС. Саратовский научно-медицинский журнал 2014; 10 (4): 800–804.**

Цель: на примере анализа результатов массовых радиометрических обследований щитовидной железы у жителей после аварии на ЧАЭС детально рассмотреть значимость вклада гамма-излучения радиоактивных изотопов цезия в измеряемую мощность дозы над щитовидной железой (ЩЖ) и получить эмпирические соотношения для учета этого вклада при интерпретации результатов обследования. *Материал и методы.* Для оценки вклада гамма-излучения радиоактивных изотопов цезия в измеряемую с помощью радиометрических приборов мощность дозы над ЩЖ проведены модельные расчеты для типовых вариантов поступления радионуклидов в организм жителей, проживавших в загрязненной местности после Чернобыльской аварии. При этом рассматривались два наиболее значимых пути поступления: 1) ингаляционный и 2) пероральный с коровьим молоком. *Результаты.* Согласно полученным оценкам вклад радиоактивных изотопов цезия в результат измерения мощности дозы над щитовидной железой в течение первых 20 дней не превышает 20% для жителей южных районов Гомельской области и 30% для жителей Могилевской области. Спустя 60 дней после аварии этот вклад составит (50–80) % для жителей южных районов Гомельской области и (80-95) % для жителей Могилевской области. *Заключение.* Для периода массовых измерений в южных районах Гомельской области (вторая половина мая) учет вклада инкорпорированных изотопов цезия относительно незначим, а для Могилевской области (конец мая) он существен. В июньских 1986 г. измерениях учет вклада инкорпорированных изотопов цезия актуален для жителей на всей территории Белоруссии.

Ключевые слова: радиоактивный йод, радиоактивные изотопы цезия, Чернобыльская авария, щитовидная железа, население.

Shinkarev SM, Gavrilin YuI, Androsova AA. **Estimation of the contribution of gamma-emission of incorporated cesium radioisotopes in interpretation of the results of the public survey to assess the thyroidal iodine content following a radiation accident at the nuclear power plant. Saratov Journal of Medical Scientific Research 2014; 10 (4): 800–804.**

Aim. A detail consideration has been done to assess an importance of the contribution of gamma-emission of incorporated cesium radioisotopes to the exposure rate measured near the thyroid by the public survey for following the Chernobyl accident. Empirical ratios have been derived to take into account that contribution under interpretation of the results of survey meter monitoring of the public. *Materials and methods*. Model calculations for typical radionuclide intake by the residents living in contaminated territories after the Chernobyl accident have been carried out in order to assess the contribution of gamma-emission of incorporated cesium radioisotopes to the exposure rate measured near the thyroid by the survey. Under such calculations two the most important modes of intake have been considered: 1) inhalation and 2) ingestion with cow milk. *Results.* According to the estimates received the contribution of gamma-emission of incorporated cesium radioisotopes to the exposure rate measured near the thyroid during the first 20 days does not exceed 20% for the residents of southern areas of Gomel region and 30% for the residents of Mogil'yov region. During 60 days following the accident that contribution is estimated to be within (50-80) % for the residents of southern areas of Gomel region and (80-95) % for the residents of Mogil'yov region. *Conclusion*. For the period of intensive thyroid measuring in the southern areas of Gomel region (the second part of May) account of the contribution

of gamma-emission of incorporated cesium radioisotopes is relatively unimportant, but for Mogil'yov region (the end of May) — it is important to account for. For the thyroid measurements conducted in June of 1986 it is important for all residents living in Belarus to take into account the contribution of gamma-emission of incorporated cesium radioisotopes.

Key words: radioactive iodine, cesium radioactive isotopes, Chernobyl accident, thyroid, public

Введение. Опыт изучения последствий широкомасштабных радиационных аварий на ЧАЭС (26 апреля 1986 г.) [1] и АЭС «Фукусима-1» (11 марта 2011 г.) [2] показал, что основным фактором радиационного воздействия на население является облучение щитовидной железы (ЩЖ) радиоактивными изотопами йода. В первые несколько недель после Чернобыльской аварии на загрязненных территориях Белоруссии, России и Украины развернулись массовые радиометрические обследования жителей, охватившие за двухмесячный период около 450 тыс. человек в трех республиках. Эти обследования проводились с помощью радиометрических и дозиметрических приборов (СРП-68–01, ДРГЗ–02, ДП-5) путем измерения мощности экспозиционной дозы над ЩЖ с целью определения содержания радиоактивных изотопов йода на момент измерения. Поскольку самые ранние измерения начались спустя несколько дней после аварии на ЧАЭС, то в ЩЖ к тому времени оставался в основном ^{131}I (период радиоактивного распада 8,04 сут). В то же время помимо гамма-излучения ^{131}I, сконцентрированного в ЩЖ, в измеряемую мощность дозы над ЩЖ вносили вклад: 1) гамма-излучение радиоактивных изотопов цезия (^{134}Cs, ^{136}Cs и ^{137}Cs), 2) гамма-излучение радиоактивного загрязнения одежды и тела человека, 3) радиационный фон в месте измерения. Из числа инкорпорированных радионуклидов (помимо ^{131}I в ЩЖ) наиболее важными в отношении вклада в измеряемое значение мощности дозы являются радиоактивные изотопы цезия [3–5].

Цель: на примере анализа результатов массовых радиометрических обследований жителей после аварии на ЧАЭС провести детальное рассмотрение значимости вклада гамма-излучения радиоактивных изотопов цезия в измеряемую мощность дозы над ЩЖ и получить эмпирические соотношения для учета этого вклада при интерпретации результатов обследования.

Согласно сообщениям японских специалистов после аварии на АЭС «Фукусима-1» наиболее массовое радиометрическое обследование ЩЖ у японского населения проведено 26–30 марта 2011 г. При этом определялось содержание радиойода в ЩЖ у 1080 детей в возрасте до 15 лет из трех населенных пунктов: деревня Иитате, поселок Кавамата и город Иваки [6]. Поскольку при проведении измерений были использованы радиометры, то при интерпретации результатов этих измерений также необходимо учитывать вклад гамма-излучения радиоизотопов цезия в измеряемую мощность дозы над ЩЖ. Следует подчеркнуть, что в период 8–20 апреля 2011 г. на территории российского посольства в Токио специалистами ФМБА России проведены обследования содержания ^{131}I в ЩЖ у персонала посольства и других российских граждан, находившихся в тот период на территории Японии [7]. Эти обследования выполнены с помощью переносных спектрометрических приборов «InSpector 1000-Canberra», позволявших регистрировать непосредственно пики ^{131}I, что избавляло от необходимости учитывать вклад гамма-излучения радиоактивных изотопов цезия.

Ответственный автор — Шинкарев Сергей Михайлович
Тел. (8499) 1909629
E-mail: sshinkarev@mail.ru

Материал и методы. Для оценки вклада гамма-излучения радиоактивных изотопов цезия в измеряемую с помощью радиометрических приборов мощность дозы над ЩЖ проведены модельные расчеты для типовых вариантов поступления радионуклидов в организм жителей, проживавших в загрязненной местности после Чернобыльской аварии. При этом рассматривались два наиболее значимых пути поступления: 1) ингаляционный и 2) пероральный с коровьим молоком.

Основные предположения и допущения, положенные в основу модели расчета, следующие:

— населенный пункт (НП) загрязнен в результате однократных выпадений;

— выпас коров в НП начался до момента радиоактивных выпадений;

— население проживало постоянно в НП и употребляло молоко от коров, выпасавшихся на пастбищах;

— очищение пастбищной травы от радиоактивных изотопов йода и цезия описывается с помощью однокамерной модели [8];

— очищение коровьего молока от радиоактивных изотопов йода и цезия описывается с помощью однокамерной и двухкамерной моделей соответственно [9, 10];

Учет вклада инкорпорированных радиоактивных изотопов цезия удобно рассматривать в следующем виде:

$$P_I = P_0 \text{ Ч } k_{cor}, \quad (1)$$

где P_I — вклад в показания прибора ДП-5 (СРП-68–01, ДРГЗ-02) гамма-излучения ^{131}I, содержащегося в ЩЖ, мР ч$^{-1}$ (мкР ч$^{-1}$, мкР с$^{-1}$); P_0 — вклад в показания прибора гамма-излучения ^{131}I, содержащегося в ЩЖ, и изотопов цезия в теле человека, мР ч$^{-1}$ (мкР ч$^{-1}$, мкР с$^{-1}$); k_{cor} — корректирующий коэффициент, учитывающий вклад инкорпорированного радиоцезия в показания прибора, отн. ед.

В формуле (1) параметр P_0 фактически представляет собой показания прибора за вычетом радиационного фона и вклада от внешнего радиоактивного загрязнения тела и одежды (если таковое имеется). Таким образом, вклад инкорпорированного радиоцезия будем оценивать путем расчета значений корректирующего коэффициента k_{cor}. С учетом формулы (1) формулу расчета значений коэффициента k_{cor} можно записать как

$$k_{cor} = \frac{1}{1 + \frac{G_{body}(^{137}Cs, t)}{G(t)} \times \frac{k_g}{k_{137}} \times S_{\Sigma Cs}(t)}, \quad (2)$$

где G_{body} (^{137}Cs,t) — содержание ^{137}Cs в теле человека на момент времени t, Бк; G (t) — содержание ^{131}I в ЩЖ на момент времени t, Бк; k_g — коэффициент перехода от показаний прибора к содержанию ^{131}I в ЩЖ, Бк мР$^{-1}$ ч (Бк мкР$^{-1}$ ч, Бк мкР$^{-1}$ с); k_{137} — коэффициент перехода от показаний прибора к содержанию ^{137}Cs в теле человека, Бк мР$^{-1}$ ч (Бк мкР$^{-1}$ ч, Бк мкР$^{-1}$ с); $S_{\Sigma Cs}$ (t) — коэффициент, учитывающий вклад в показания прибора суммы радиоактивных изотопов цезия (^{134}Cs, ^{136}Cs и ^{137}Cs), отн. ед.

Расчет коэффициента $S_{\Sigma Cs}$ проводится по формуле

$$S_{\Sigma Cs}(t)=1+R_{134}\times(k_{137}/k_{134})+R_{136}\times(k_{137}/k_{136})\times\exp(-\lambda_{136}\times t) \quad (3$$

где k_{134} и k_{136} — коэффициенты перехода от показаний прибора к содержанию ^{134}Cs и ^{136}Cs в теле чело-

века соответственно, Бк мР$^{-1}$ ч (Бк мкР$^{-1}$ ч, Бк мкР$^{-1}$ с); R_{134} и R_{136} — изотопные отношения ^{134}Cs и ^{136}Cs к ^{137}Cs в активной зоне реактора на момент аварии, принятые равными 0,5 и 0,27 [1] отн. ед.; λ_{136} — постоянная скорости радиоактивного распада ^{136}Cs, (0,053 сут$^{-1}$); t — время, прошедшее с момента аварии, сут.

Для оценки отношения G_{body} (^{137}Cs,t)/G (t) в формуле (2) необходимо рассмотреть процессы перехода радиоактивных изотопов йода и цезия от выпадений в НП до поступления в организм человека.

В случае однократного ингаляционного поступления радионуклидов жителю возраста (i) в период радиоактивного загрязнения местности оценка отношения $G_{body,i}$ (^{137}Cs,t)/G_i (t) на момент времени t проводится по формуле

$$G_{body,i}(^{137}Cs,t)/G_i(t) = (\sigma_{137}/\sigma_{131})\times(V_{g,131}/V_{g,137})\times(f_{body}/f_{th})\times$$
$$\times\exp[(\lambda_{th,i}+\lambda_{131})\times(t-t_{fall})]\times\sum_{j=1}^{2}B_{Cs,j,i}\times$$
$$\times\exp[-(\lambda_{Cs,j,i}+\lambda_{137})\times(t-t_{fall})], \quad (4)$$

где σ_{137} и σ_{131} — интегральные плотности выпадений в НП ^{137}Cs и ^{131}I соответственно, Бк м$^{-2}$; $V_{g,137}$ и $V_{g,131}$ — скорости осаждения на подстилающую поверхность ^{137}Cs и ^{131}I соответственно, м сут$^{-1}$; f_{body} и f_{th} — доля ^{137}Cs и ^{131}I поступающие из крови в тело человека и в ЩЖ соответственно, (f_{body}=1 и f_{th}=0,3 [11]) отн. ед.; $\lambda_{th,i}$ — постоянная биологической скорости очищения ЩЖ от ^{131}I для жителя возраста (i) [11], сут$^{-1}$; λ_{131} — постоянная скорости радиоактивного распада ^{131}I, (0,086 сут$^{-1}$); t_{fall} — время, прошедшее с момента аварии до момента выпадений в НП, сут; $B_{Cs,j,i}$ — константа, принятая для цезия и камеры (j) в организме жителя возраста (i) [11], отн. ед; $\lambda_{Cs,j,i}$ — постоянная скорости биологического очищения организма жителя возраста (i) от цезия в камере (j) [11], сут$^{-1}$; λ_{137} — постоянная скорости радиоактивного распада ^{137}Cs, (6Ч10^{-5} сут$^{-1}$).

Для случая перорального поступления радионуклидов с молоком необходимо рассмотреть весь комплекс перехода радионуклидов по цепочке «трава — корова — молоко — человек». Для описания перехода ^{131}I и ^{137}Cs по этой цепочке применяются следующие модельные представления.

Расчет содержания радионуклида k (^{131}I или ^{137}Cs) в пастбищной траве проводится по формуле (5) [9, 10]:

$$C_{gr,k}(t)=\sigma_k\times(F_{v,k}/Y)\times\exp[-(\lambda_{gr,k}+\lambda_k)\times(t-t_{fall})], \quad (5)$$

где $C_{gr,k}$ (t) — удельная концентрация радионуклида k в пастбищной траве, Бк кг$^{-1}$; σ_k — интегральная плотность выпадений радионуклида k в НП, Бк м$^{-2}$; $F_{v,k}$ — доля радионуклида k, задержанная на пастбищной траве, отн. ед.; Y — плотность травяного покрова (сырой вес), кг м$^{-2}$; $\lambda_{gr,k}$ — постоянная скорости биологического очищения травы от радионуклида k, (^{131}I — 0,082 сут$^{-1}$; ^{137}Cs — 0,069 сут$^{-1}$) [8]; λ_k — постоянная скорости радиоактивного распада радионуклида k, сут$^{-1}$.

Расчет содержания радионуклида k в коровьем молоке проводится по формуле (6) [9, 10]:

$$C_{mlk,k}(t)=\sum_{j=1}^{n}A_{k,j}\times\int_0^t C_{g,k}(\tau)\times Q_f\times f_{mlk,k}\times\lambda_{k,j}\times e^{-\lambda_{k,j}\times(t-\tau)}d\tau, \quad (6)$$

где $C_{mlk,k}$ (t) — удельная концентрация радионуклида k в коровьем молоке, Бк кг$^{-1}$; Q_f — суточное поступление корове пастбищной травы (сырой вес), кг сут$^{-1}$; $f_{mlk,k}$ — коэффициент перехода радионуклида k по цепочке трава-молоко, (принят одинаковым для йода и цезия [10]) сут л$^{-1}$; n — число камер, используемых для описания метаболизма радионуклида k в корове, (n=1 для ^{131}I и n=2 для ^{137}Cs) [8, 10]; $A_{k,j}$ — константа, принятая для радионуклида k и камеры (j), (^{131}I — A=1; ^{137}Cs — A_1=0,8 и A_2=0,2) [10], отн. ед; $\lambda_{k,j}$ — постоянная скорости биологического перехода радионуклида k из коровы в молоко для камеры (j) (^{131}I — λ=0,7; ^{137}Cs — λ_1=0,46 и λ_1=0,046) [10], сут$^{-1}$.

Следует отметить, что основные закономерности миграции радиоактивного йода по цепочке «трава — корова — молоко» были описаны в оригинальной работе К.И. Гордеева [9]. Однако для территорий, загрязненных после аварии на ЧАЭС, более предпочтительно использование значений параметров, полученных экспериментально для Чернобыльской аварии [10], чем в исследованиях на коровах, выпасавшихся в октябре 1965 г. на следе ядерного экскавационного взрыва на Семипалатинском полигоне [9].

Расчет содержания радионуклида k в теле человека возраста (i), $G_{k,i}$ (t), проводится по формуле

$$G_{k,i}(t)=\sum_{j=1}^{n}B_{k,j,i}\times\int_0^t C_{mlk,k}(\tau)\times V_{mlk,i}\times e^{-(\lambda_{k,j,i}+\lambda_k)\times(t-\tau)}d\tau, \quad (7)$$

где $V_{mlk,i}$ — среднесуточное потребление молока жителем возраста (i), л сут$^{-1}$; n — число камер, используемых для описания метаболизма радионуклида k в организме человека, (n=1 для ^{131}I в ЩЖ и n=2 для ^{137}Cs в теле) [11]; $B_{k,j,i}$ — константа, принятая для радионуклида k и камеры (j) в организме человека возраста (i) [11], отн. ед; $\lambda_{k,j,i}$ — постоянная скорости биологического очищения организма человека возраста (i) от радионуклида k в камере (j) [11], сут$^{-1}$.

С учетом формул (5)–(7) искомое отношение $G_{body,i}$ (^{137}Cs,t)/G_i (t) на момент времени t для жителя возраста (i), постоянно употреблявшего молоко, выражается расчетной формулой

$$G_{body,i}(^{137}Cs,t)/G_i(t)=(\sigma_{137}/\sigma_{131})\times(F_{v,137}/F_{v,131})\times\times(f_{mlk,137}/f_{mlk,131})\times(1/f_{th})\times$$
$$\times\{\sum_{j2=1}^{2}B_{Cs,j2,i}e^{-\lambda_{Cs,j2,i}t}\sum_{j1=1}^{2}A_{Cs,j1}\frac{\lambda_{Cs,j1}}{\lambda_{Cs,j1}-\lambda_{gr,Cs}}[\frac{(1-e^{-(\lambda_{gr,Cs}-\lambda_{Cs,j2,i})t})}{\lambda_{gr,Cs}-\lambda_{Cs,j2,i}}-\frac{(1-e^{-(\lambda_{Cs,j1}-\lambda_{Cs,j2,i})t})}{\lambda_{Cs,j1}-\lambda_{Cs,j2,i}}]\}/$$
$$/\{e^{-(\lambda_{th,i}+\lambda_{131})t}\times\frac{\lambda_{cow,I}}{\lambda_{cow,I}-\lambda_{gr,I}}\times[\frac{(1-e^{-(\lambda_{gr,I}-\lambda_{th,i})t})}{\lambda_{gr,I}-\lambda_{th,i}}-\frac{(1-e^{-(\lambda_{cow,I}-\lambda_{th,i})t})}{\lambda_{cow,I}-\lambda_{th,i}}]\}, \quad (8)$$

где $\lambda_{gr,I}$ — постоянная эффективной скорости очищения травы от ^{131}I, сут$^{-1}$; $\lambda_{cow,I}$ — постоянная эффективной скорости очищения молока от ^{131}I, сут$^{-1}$.

Для расчета значений корректирующего коэффициента k_{cor} по формуле (2) при ингаляционном поступлении привлекаются формулы (3) и (4), а при пероральном пути поступления — формулы (3) и (8). В формуле (4) для $\sigma_{137}/\sigma_{131}$ принимаются следующие типовые значения: (1) 1/16 для южных и западных районов Гомельской области и (2) 1/8 для северо-восточных районов Гомельской области и наиболее загрязненных районов Могилевской области. Значение отношения $V_{g,131}/V_{g,137}$ в общем случае зависит от соотношения между фракциями ^{131}I в воздухе (аэрозольной, газообразной в виде молекулярного йода и в виде йодистого метила), а также типа выпадений (сухие или мокрые). При сухих выпадениях скорость осаждения молекулярного йода примерно в 6–10 раз выше, чем аэрозолей, а скорость осаждения фракции йодистого метила на несколько порядков ниже аэрозолей [10]. При мокрых выпадениях преимущественно вымываются аэрозоли. Следовательно, $V_{g,131}/V_{g,137}$<1, а его конкретное значение будет фактически определяться долей йода на аэрозолях. Из работы [12] следует, что при сухих выпадениях соотношение усредненных значений $V_{g,131}/V_{g,137}$ будет меньше 1, если фракция молекулярного йода не превышает (10-20) %, и больше 1 в противном случае. В

Значения коэффициентов перехода k_{Cs} (кБк мкР$^{-1}$ ч) от показаний прибора СРП-68–01 к содержанию изотопов цезия в теле человека для разных возрастов, полученные расчетным путем [13] и определенные экспериментально [14]

Возраст	Значения коэффициентов перехода k_{Cs} (кБк мкР$^{-1}$ ч)				
	^{137}Cs [13]	^{134}Cs [13]	^{136}Cs [13]	^{137}Cs+0,45^{134}Cs	
				расчет [13]	эксперим. [14]
3 месяца	1,33	0,52	0,34		
1 год	1,70	0,67	0,44		
5 лет	2,52	1,00	0,67		
10 лет	3,74	1,48	1,00		
15 лет	5,55	2,18	1,52		
Взрослый	6,85	2,66	1,89	4,60	5,15

первом приближении для наших расчетов значение отношения $V_{g,131}/V_{g,137}$ можно принять равным единице для сухих выпадений (южные районы Гомельской обл.) и равным 0,5 для территорий, где были осадки (северо-восток Гомельской обл. и загрязненные районы Могилевской обл.). Значения отношения $F_{v,137}/F_{v,131}$ зависят от типа выпадений; для сухих выпадений это отношение принято равным 0,5, а для территорий, где были осадки, равным единице [10, 13].

В опубликованной литературе приводятся значения коэффициентов перехода от показаний прибора СРП-68–01 к содержанию изотопов цезия в теле человека, определенные экспериментально для взрослых [14] и расчетным путем для взрослых и детей [13]. Эксперимент проведен на шести взрослых добровольцах, которым давали смесь изотопов цезия ^{134}Cs и ^{137}Cs в соотношении 1 к 0,45 [14], а модельные расчеты проведены для каждого из трех изотопов цезия (^{134}Cs, ^{136}Cs и ^{137}Cs) (таблица).

В последних двух колонках таблицы проведено сопоставление коэффициента перехода от показаний прибора к содержанию смеси двух изотопов цезия, определенных экспериментально (последняя колонка [14]) и полученных по данным расчетов, проведенных по каждому изотопу (предпоследняя колонка [13]). Относительная погрешность определения этого коэффициента по результатам измерений составила 23 в 95% доверительном интервале [14], погрешность расчета по модели не приводится [13]. С учетом изложенного можно констатировать согласованность двух оценок коэффициента перехода для рассмотренной смеси изотопов цезия.

Результаты. Зависимости значений корректирующего коэффициента k_{cor} от времени обследования ЩЖ, прошедшего с момента выпадений, для двух регионов Белоруссии: 1) южных и западных районов Гомельской области и 2) северо-восточных районов Гомельской области и наиболее загрязненных районов Могилевской области приведены на рис. 1 (ингаляционное поступление) и рис. 2 (а, б) (пероральное поступление с молоком). Поскольку выражение

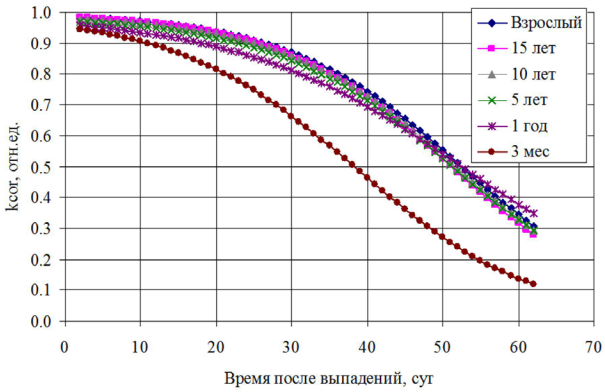
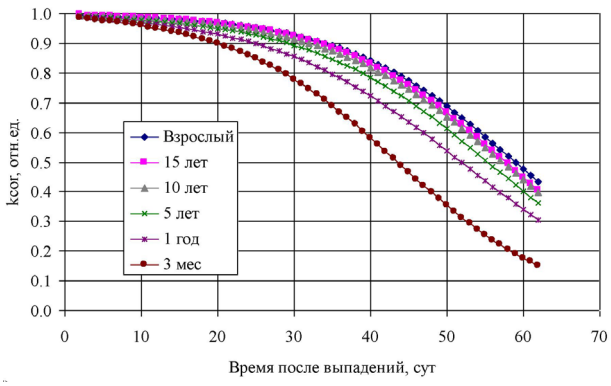
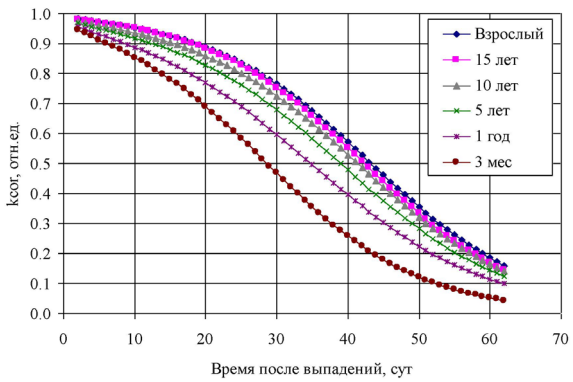


Рис. 1. Зависимость значений корректирующего коэффициента k_{cor} от времени обследования ЩЖ, прошедшего с момента выпадений, для рассмотренных регионов Белоруссии: южных и западных районов Гомельской обл., северо-восточных районов Гомельской обл. и загрязненных районов Могилевской обл. при ингаляционном поступлении радионуклидов



а)



б)

Рис. 2. Зависимости значений корректирующего коэффициента k_{cor} от времени обследования ЩЖ, прошедшего с момента выпадений, для двух регионов Белоруссии: (а) южных и западных районов Гомельской обл. и (б) северо-восточных районов Гомельской обл. и загрязненных районов Могилевской обл. при пероральном поступлении радионуклидов с молоком

$(\sigma_{137}/\sigma_{131}) \times (V_{g,131}/V_{g,137})$ в формуле (4) принимает одинаковые значения для выпадений сухих и с осадками, то и зависимость значений коэффициента k_{cor} от времени будет одна и та же для двух рассмотренных регионов Белоруссии при ингаляционном поступлении (рис. 1).

Из представленных графиков на рис. 1 и рис. 2 (а, б) следует, что наибольшие изменения значений коэффициента k_{cor} со временем отмечаются для жителей, употреблявших молоко, на территориях с мокрыми выпадениями рис. 2 (б). Зависимость значений коэффициента k_{cor} от времени при ингаляционном поступлении (рис. 1) занимает промежуточное положение между тремя рассмотренными графиками. Приведенные на рис. 2 (а, б) зависимости k_{cor} от времени для младенцев в возрасте трех месяцев носят иллюстративный характер, потому что, как правило, младенцы находятся на грудном вскармливании, а кроме того, употребление в таком возрасте неразбавленного коровьего молока противопоказано. С учетом того что наиболее интенсивный период проведения измерений в южных районах Гомельской области приходится на вторую половину мая, а в Могилевской области на конец мая, значения коэффициента k_{cor} составят (0,85–0,98) в первом случае и (0,6–0,8) во втором случае.

Обсуждение. Согласно полученным оценкам вклад радиоактивных изотопов цезия в результат измерения мощности дозы над щитовидной железой в течение первых 20 дней не превышает 20% для жителей южных районов Гомельской области и 30% для жителей Могилевской области. Спустя 60 дней после аварии этот вклад составит (50-80) % для жителей южных районов Гомельской области и (80-95) % для жителей Могилевской области.

Заключение. Выведены теоретические зависимости для оценки вклада инкорпорированных изотопов цезия в измеряемое значение мощности дозы над ЩЖ для жителей, проживавших в регионах с различными условиями формирования выпадений, и для разных путей поступления радиоактивных изотопов цезия в организм: а) ингаляционного и б) перорального с молоком. Согласно полученным данным этот вклад нелинейно растет по мере увеличения времени, прошедшего после аварии. При этом наименьший вклад инкорпорированного цезия отмечается для жителей южных районов Гомельской области и наибольший для жителей Могилевской области. Следовательно, для периода массовых измерений в южных районах Гомельской области (вторая половина мая) учет вклада инкорпорированных изотопов цезия относительно незначим, а для Могилевской области (конец мая) он существен. В июньских измерениях учет вклада инкорпорированных изотопов цезия актуален для жителей на всей территории Белоруссии.

Конфликт интересов не заявляется.

References (Литература)

1. 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. United Nations, New York, 2000.

2. United Nations. Sources and effects of ionizing radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Annex A. Levels and effects of radiation exposure due to the nuclear accident after the 2011 Great East-Japan earthquake and tsunami, United Nations, New York, 2013.

3. Zvonova IA, Balonov MI, Bratilova AA, et al. Estimation of the absorbed thyroid dose for the residents of Bryansk, Tula, Orel Oblasts based on the results of radiometric measurements in 1986. Radiation and risk 1997; (10): 95–116. Russian (Звонова И.А., Балонов М.И., Братилова А.А. и др. Оценка поглощенной дозы в щитовидной железе жителей Брянской, Тульской, Орловской областей по результатам радиометрии в 1986 году. Радиация и риск 1997; (10): 95–116).

4. Ulanovskij AV, Drozdovitch VV. Influence of the radionuclides distributed in the human body on the estimation of the thyroid doses based on the results of direct measurements. Preprint IPJ-27. Institute of the problems of energetics. National academy of science of Belarus. Minsk, 1997. Russian (Улановский А.В., Дроздович В.В. Влияние радионуклидов, распределенных в теле человека, на оценку доз облучения щитовидной железы по результатам прямых измерений / препринт ИПЭ-27; Институт проблем энергетики НАНБ. Минск, 1997).

5. Gavrilin YuI, Khrouch VT, Shinkarev SM, et al. Chernobyl Accident: Reconstruction of thyroid dose for inhabitants of the Republic of Belarus. Health Phys 1999; 76: 105–119.

6. Kim E, Kurihara O, Suzuki T, et al. Screening survey on thyroid exposure for children after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident. In: Proceedings of the 1st NIRS Symposium on reconstruction of early internal dose in the TEPCO Fukushima Daiichi Power Station accident (O. Kurihara, et al.). NIRS-M-252 Chiba, 2012; p. 59–66.

7. Shinkarev S, Uyba V, Kotenko K, et al. Thyroid measurements of the Russian citizens living in Japan following the Fukushima accident. In: Book of abstracts of the 2nd NIRS Symposium on reconstruction of early internal dose in the TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident, January 27, 2013, National Institute of Radiological Sciences, Tokyo, Japan, 2013; p.17–18.

8. Kirchner G. Transport of iodine and cesium via the grass-cow-milk pathway after the Chernobyl accident. Health Phys 1994; 66: 653–665.

9. Gordeev KI. The main regularities of the formation of external and internal doses on the radioactive traces of underground nuclear explosions (experimental data): DSc diss. Moscow, 1970; 298 p. Russian (Гордеев К.И. Основные закономерности формирования доз внешнего и внутреннего облучения на следах подземных ядерных взрывов (экспериментальные исследования): дис.… д-ра техн. наук. М., 1970; 298 с).

10. Muller H, Prohl G. ECOSYS-87: A dynamic model for assessing radiological consequences of nuclear accidents. Health Phys 1993; 64: 232–252.

11. 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 20 (2); 1990: 122 p.

12. Gavrilin Yu, Khrouch V, Shinkarev S, et al. Case-control study of Chernobyl-related thyroid cancer among children of Belarus. Part I: Estimation of individual thyroid doses resulting from intakes of 131I, short-lived radioiodines (132I, 133I, 135I), and short-lived radiotelluriums (131mTe and 132Te). Health Phys 2004; 86: 565–585.

13. Ulanovsky A, Drozdovitch V, Bouville A. Influence of radionuclides distributed in the whole body on the thyroid dose estimates obtained from direct thyroid measurements made in Belarus after the Chernobyl accident. Radiat Prot Dosim 2004; 112 (3): 405–418.

14. Kaidanovsky GN, Dolgirev EI. Calibration of radiometers for mass control of incorporated 131I, 134Cs and 137Cs nuclides with the help of volunteers. Radiat Prot Dosim 1997; 71 (3): 187–194.