

УДК 614.876:539.1.074

Ю. В. Бончук✉

Державна установа “Національний науковий центр радіаційної медицини Національної академії медичних наук України”, вул. Мельникова, 53, м. Київ, 04050, Україна

ВПЛИВ СИСТЕМИ ТКАНИННИХ ЗВАЖУЮЧИХ ФАКТОРІВ НА ОЦІНКИ ДОЗ

Мета дослідження. Визначення впливу системи тканинних зважуючих факторів w_T , встановлених Міжнародною комісією з радіологічного захисту, на оцінки доз опромінення людини.

Матеріал та методи дослідження. Ефективна доза визначається як сума добутків еквівалентних доз в окремих органах і тканинах на відповідні значення w_T . Застосування різних систем w_T до певного набору значень еквівалентних доз призводить до отримання різних оцінок ефективної дози. Порівняння значень ефективних доз дає змогу отримати уяву про вплив систем w_T на дозові оцінки.

Результати. Розглянуто вплив систем w_T , встановлених Публікаціями 26, 60 і 103 МКРЗ, на оцінки доз зовнішнього і внутрішнього опромінення людини. Продемонстровано, що перехід системи w_T від Публікації 26 до Публікації 60 МКРЗ призвів до значно більших змін в оцінці ефективних доз зовнішнього опромінення (до 30 разів), ніж відповідний перехід від Публікації 60 МКРЗ до Публікації 103 МКРЗ.

Висновки. Застосування системи w_T із Публікації 103 МКРЗ у порівнянні з Публікацією 60 МКРЗ не призводить до змін оцінки ефективних доз більше ніж на 20 % для всіх радіонуклідів при оцінках доз зовнішнього опромінення і для значної більшості радіонуклідів (97 %) при оцінках доз внутрішнього опромінення за рахунок перорального надходження.

Для більшості радіонуклідів йоду оцінка доз внутрішнього опромінення зменшиться (до 20 %).

Оцінки ефективних доз внутрішнього опромінення за рахунок інгаляційного надходження для 67 % радіонуклідів зменшаться. Основними причинами зменшення є скасування “правила розщеплення” (введеного Публікацією 60 МКРЗ) і зменшення значення w_T для щитоподібної залози з 0,05 до 0,04.

Ключові слова: тканинні зважуючі фактори, дози опромінення.

Проблеми радіаційної медицини та радіобіології. 2013. Вип. 18. С. 38–49.

Yu. V. Bonchuk✉

State Institution “National Research Center for Radiation Medicine of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine”, Melnykov str., 53, Kyiv, 04050, Ukraine

Role of the weighting tissue factors in dose assessments

Objective. To determine the influence of system of tissue weighting factors w_T , established by the International Commission on Radiological Protection, on the dose assessment in human.

Material and methods. The effective dose is defined as a sum of equivalent doses in specified organs and tissues, each multiplied by the appropriate w_T value. Application of different w_T systems to a specific set of equivalent doses produces different assessments of effective doses. Comparison of the effective doses values provides an opinion about the w_T system influence on dose assessment.

Results. The role of w_T systems, established in ICRP Publications 26, 60 and 103, on the assessment of external and internal exposure to humans is reviewed. It has been demonstrated that the transition of w_T system from ICRP Publications 26 to ICRP Publication 60 has resulted in a significantly greater changes in the assessment of effective doses of external exposure (up to 30 times) than the corresponding transition from ICRP Publication 60 to ICRP Publication 103.

✉ Бончук Юрій Васильович, bonchuk@rpi.kiev.ua

© Бончук Ю. В., 2013

Conclusion. Application of w_T system from ICRP Publication 103 compared with ICRP Publication 60 does not change the assessment of effective doses for more than 20% for all radionuclides in the assessment of external doses and for the large majority of radionuclides (97%) in the assessment of internal doses due to ingestion.

For most iodine of the internal dose assessment will decrease (up to 20%).

Assessments of effective internal doses due to inhalation will decrease for 67% of radionuclides. Cancellation of the “splitting rule” (introduced by ICRP Publication 60) and decrease w_T value for the thyroid from 0.05 to 0.04 are the primary reasons of the decrease.

Key words: tissue weighting factors, exposure doses.

Problems of radiation medicine and radiobiology. 2013;18:38–49.

Ефективна доза визначається як сума добутоків еквівалентних доз в окремих органах і тканинах на відповідні тканинні зважуючі фактори. Числові значення цих факторів визначаються основоположними публікаціями Міжнародної комісії з радіологічного захисту (МКРЗ). Зміна системи тканинних зважуючих факторів призводить до корекції оцінок ефективних доз безвідносно до того, чи змінюються інші фактори, що мають вплив на формування оцінок доз опромінення.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Визначення впливу системи тканинних зважуючих факторів на оцінки доз зовнішнього і внутрішнього опромінення.

МАТЕРІАЛ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Ефективна доза опромінення визначається багатьма чинниками. Деякі елементи у виконанні оцінок є специфічними для зовнішнього (геометрія опромінення) або внутрішнього (хімічна форма радіонуклідного забруднення, моделі біокінетики в організмі людини) опромінення, багато інших застосовні для обох з них (спектральні характеристики забруднення, референтні анатомічні характеристики людини, радіаційні і тканинні зважуючі фактори та ін.).

Для визначення доз опромінення використовуються коефіцієнти, які інкорпорує в собі такі чинники і певні розрахункові процедури – дози на одиницю концентрації у середовищі (повітря, ґрунт, вода тощо), дози на одиницю надходження. Далі для цих термінів буде використовуватись словосполучення “дозовий коефіцієнт” (хоча “Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97)” не використовують такий термін, проте він є зручним для скорочення, коли однозначно зрозуміло, які саме коефіцієнти маються на увазі). Звичайно, застосування загальних дозових коефіцієнтів не може охопити всі варіанти умов опромінення – наприклад, при складній геометрії опромінення, коли для коректного визначення доз доцільне використання кількох дозиметрів (взагалі,

The effective dose is defined as a sum of the products of the organ or tissue equivalent doses and the appropriate tissue weighting factors. The numerical values of these factors are determined by the fundamental publications of the International Commission on Radiological Protection (ICRP). Change of the system of the tissue weighing factors leads to correction of effective dose assessments regardless any change of other factors that have influence on the dose assessment.

OBJECTIVE

To determine the effect of tissue weighting factors system on the external and internal dose assessments.

MATERIAL AND METHODS

The effective dose is determined by many factors. Some elements in the performance of assessments are specific to external (geometry of the exposure) or internal (chemical form of radionuclide contamination, biokinetic model in the human body) exposure, many others are applicable to both of them (spectral characteristics of the contamination, the reference anatomical human characteristics, radiation and tissue weighing factors, etc.).

To determine the doses some coefficients are used that cover such factors and certain calculation procedures i.e. doses per unit concentration in the environment (air, soil, water, etc.), doses per unit intake. The “dose coefficient” syntagm will be used hereafter for those terms (although that term is not used in the “Radiation Safety Standards of Ukraine (RSSU-97)”, it is convenient however to make shortening when it is definitely clear which coefficient is implied). Of course, the use of generic dose coefficients cannot cover all kinds of the exposure conditions – for example for the complicated geometry of the exposure when use of multiple dosimeters is appropriate for the correct dose determining (gen-

дози зовнішнього опромінення персоналу для їх індивідуалізації, як правило, визначаються за допомогою індивідуальних дозиметрів). Однак для багатьох ситуацій, а особливо для оцінок доз населення, використання загальних дозових коефіцієнтів більш ніж достатньо.

На цей час для оцінок доз внутрішнього опромінення використовуються дозові коефіцієнти з різних публікацій МКРЗ, вони зібрані в міжнародних основних нормах безпеки [1]. З дозовими коефіцієнтами зовнішнього опромінення ситуація менш однозначна. Найчастіше джерелом для них є так звана американська федеральна настанова № 12 [2]. Обидва класи дозових коефіцієнтів були розраховані ще до середини 90-х років минулого століття. Поштовхом для їх розрахунку була поява Публікації 60 МКРЗ [3] (1991 р.), яка ініціювала зміни у всій системі радіологічного захисту.

Вказані дозові коефіцієнти базуються на таких даних:

- > характеристики радіонуклідів – Публікація 38 МКРЗ [4] 1983 р. (у 2008 вийшла Публікація 107 МКРЗ [5]);
- > референтні анатомічні і фізіологічні характеристики людини – Публікація 23 МКРЗ [6] 1975 р. (у 2002 вийшла Публікація 89 МКРЗ [7], у 2009 р. – Публікація 110 МКРЗ [8]);
- > моделі біокінези в організмі людини – Публікація 66 МКРЗ [9] 1994 р. з моделлю дихальної системи людини, інші є ще більш ранніми (у 2006 вийшла Публікація 100 МКРЗ [10] з моделлю травного тракту);
- > радіаційні і тканинні зважуючі фактори – Публікація 60 МКРЗ [3] 1991 р. (у 2007 вийшла Публікація 103 МКРЗ [11]).

Як видно, майже для всіх публікацій МКРЗ, які були використані для розрахунків діючих дозових коефіцієнтів, вийшли їх нові аналоги, які інкорпорували в собі знання, накопичені за десять – двадцять років після виходу їх попередників.

Поява Публікації 103 МКРЗ [11] (як і Публікації 60 МКРЗ [3] за 16 років до неї) також повинна призвести до значних змін. Однак її імплементація у системі радіологічного захисту не є швидким процесом, в тому числі у такому, здавалось би, утилітарному прояві, як оновлення дозових коефіцієнтів (навіть через 6 років після появи публікації). Це відобразилось навіть у тому, що в оновлених міжнародних основних нормах безпеки (проміжне видання) [12] були продубльовані дозові коефіцієнти, розраховані ще за Публікацією 60 МКРЗ [3].

ерally the external doses to the workers are usually determined by personal dosimeters for their individualization). For many situations however (especially for the dose assessment to members of the public) the use of the generic dose coefficients is more than enough.

At this time the dose coefficients from various ICRP publications being they collected in the International Basic Safety Standards [1] are used for the internal dose assessments. The situation with external dose coefficients is less clear. Mostly the source for them is the US Federal Guidance Report No 12 [2]. Both classes of dose coefficients were calculated before the mid-nineties of the last century. The appearance of ICRP Publication 60 [3] (1991) which initiated the change in the whole system of radiological protection gave the rise for calculation of those dose coefficients.

The mentioned above dose coefficients are based on the following data:

- > characteristics of radionuclides – the ICRP Publication 38 (1983) [4]; in 2008 the ICRP Publication 107 was published [5];
- > reference anatomical and physiological characteristics of the human – the ICRP Publication 23 (1975) [6]; in 2002 the ICRP Publication 89 [7] was published, in 2009 – the ICRP Publication 110 [8];
- > biokinetic model in the human body – the ICRP Publication 66 (1994) [9] with the human respiratory tract model, others are even earlier ones; in 2006 the ICRP Publication 100 [10] with Human Alimentary Tract Model was published;
- > radiation and tissue weighting factors – the ICRP Publication 60 (1991) [3]; in 2007 the ICRP Publication 103 [11] was published.

As can be seen, the updated analogues were published almost for all ICRP publications that were used to calculate current dose coefficients. Knowledge accumulated for ten or even twenty years after their predecessors was incorporated.

The appearance of ICRP Publication 103 [11] (as also the ICRP Publication 60 [3] 16 years before) should also lead to significant changes. However its implementation within radiological protection system is not a quick process, including such seemingly utilitarian issue as a renewal of dose coefficients (even 6 years after publication). This is reflected even in the fact that the updated International Basic Safety Standards (Interim Edition) [12] duplicated dose coefficients calculated in accordance with ICRP Publication 60 [3].

Деякі оновлені чинники (характеристики радіонуклідів, радіаційні і тканинні зважуючі фактори) можна застосувати для розрахунку оновлених дозових коефіцієнтів більш швидко, однак така реалізація буде неповною без застосування оновлених біокінетичних моделей людини. Тим не менше, з'ясування ступеня впливу навіть лише системи тканинних зважуючих факторів на оцінку доз опромінення є можливим і доцільним.

Публікація 60 МКРЗ [3] визначає ефективну дозу як суму добутків еквівалентних доз НТ в окремих органах і тканинах на відповідні тканинні зважуючі фактори w_T :

$$E = \sum_T w_T H_T .$$

Аналогічні підходи використовували як попередня (в концептуальному сенсі) Публікація 26 МКРЗ [13] (1977 р.), так і наступна Публікація 103 МКРЗ [11]. Публікація 103 МКРЗ [11] дещо ускладнює цей розрахунок, враховуючи статеві особливості формування доз, а саме, визначаючи ефективну дозу як

$$E = \sum_T w_T \left[\frac{H_T^M + H_T^F}{2} \right],$$

де верхніми індексами М і F позначено еквівалентні дози опромінення референтного чоловіка і референтної жінки, відповідно.

Ключовими параметрами у розрахунку є значення w_T . Значення w_T , що були введені різними публікаціями МКРЗ, наведені у таблиці 1 (значення, що змінювались більш ніж удвічі, виділено жирним шрифтом).

Значення w_T з Публікації 26 МКРЗ [13] були побудовані на даних про ризик розвитку смертельного раку і виникнення серйозних спадкових захворювань у двох перших поколіннях. У Публікації 60 МКРЗ [3] ці значення базувались на оцінці радіаційної шкоди, до якої включались ризик радіаційно-індукованого смертельного раку, спадкової захворюваності у всіх наступних поколіннях, тяжкість захворювання і кількість років життя, втрачених в результаті захворювання. За Публікацією 103 МКРЗ [11] система w_T у більшій мірі побудована на рівні захворюваності радіаційно-індукованим раком, ніж на смертності від нього, а також на ризику розвитку спадкових захворювань у двох перших поколіннях.

Одним із важливих елементів розрахунку є надання w_T для "решти органів". Незважаючи на її наявність у всіх зазначених публікаціях МКРЗ, її роль

Some updated factors (characteristics of radionuclides, radiation and tissue weighing factors) can be used to calculate updated dose coefficients more promptly but such kind of implementation will be incomplete without application of the updated human biokinetic models. However clarification of the impact of even the tissue weighing factors system on dose assessment is possible and reasonable.

ICRP Publication 60 [3] defines the effective dose as a sum of the products of the equivalent doses HT to specified organs or tissues and the tissue weighting factors w_T :

Similar approaches were used in the preceding (in the conceptual sense) ICRP Publication 26 (1977) [13] and in the succeeding ICRP Publication 103 [11]. ICRP Publication 103 [11] makes this calculation a bit complicated taking into account the gender peculiarities of dose formation, i.e. determining the effective dose as

where the superscripts M and F indicate the equivalent doses to the reference male and female respectively.

The key parameters in the calculation are the w_T values. The w_T values introduced by different ICRP publications are given in Table 1 (values that were changed more than twice are indicated by the bold font).

The w_T values in ICRP Publication 26 [13] were based on data about the risk of a fatal cancer and of a serious heritable disease in the first two generations. These values in ICRP Publication 60 [3] were based on the radiation detriment assessment which includes the risk of radiation-induced fatal cancer, and heritable disease in all future generations, the severity of the disease and the years of life lost due to the disease. In accordance with ICRP Publication 103 [11] the w_T system is based largely on the incidence of radiation-induced cancer rather than on mortality as well as on the risk of heritable disease over the first two generations.

The assignment of w_T to the remainder tissues is an important element in the calculation. Despite their presence in all specified ICRP publications

Таблиця 1
Тканинні зважуючі фактори w_T у публікаціях МКРЗ

Table 1
Tissue weighting factors w_T in ICRP Publications

Тканина/орган Tissue or organ	Публікація 26 МКРЗ [13] ICRP Publication 26 [13]	Публікація 60 МКРЗ [3] ICRP Publication 60 [3]	Публікація 103 МКРЗ [11] ICRP Publication 103 [11]
Гонади Gonads	0,25	0,20	0,08
Кістковий мозок (червоний) Bone marrow (red)	0,12	0,12	0,12
Легені Lung	0,12	0,12	0,12
Товста кишка Colon	–	0,12	0,12
Шлунок Stomach	–	0,12	0,12
Сечовий міхур Bladder	–	0,05	0,04
Молочна залоза Breast	0,15	0,05	0,12
Печінка Liver	–	0,05	0,04
Стравохід Oesophagus	–	0,05	0,04
Щитоподібна залоза Thyroid	0,03	0,05	0,04
Шкіра Skin	–	0,01	0,01
Поверхня кістки Bone surface	0,03	0,01	0,01
Головний мозок Brain	–	–	0,01
Слинні залози Salivary glands	–	–	0,01
“Решта органів” Remainder tissues	0,30	0,05	0,12

значно відрізняється. За Публікацією 26 МКРЗ [13] сумарне значення w_T для неї (0,30) розподілялось рівномірно (по 0,06) між п'ятьма органами/тканинами із “решти органів”, які виявлялись найбільш опроміненими у певній ситуації опромінення. За Публікацією 60 МКРЗ [3] сумарне значення w_T для “решти органів” було зменшене у 6 разів (0,05) і розподілялось порівну вже між 10 органами/тканинами. Однак якщо максимальна еквівалентна доза за органами/тканинами із “решти органів” перевищувала максимальну еквівалентну дозою за органами/тканинами, які мають власний w_T , то орган/тканина із “решти органів” з максимальною еквівалентною дозою отримував половину загального значення w_T (тобто, 0,025), а решта (0,025) розподілялась порівну між вже 9 органами/тканинами (“правило розщеп-

their roles are very different. According to ICRP Publication 26 [13] the total w_T value for them (0.30) is uniformly distributed (by 0.06) among five organs/tissues from the remainder tissues which were exposed to the most extent in a certain exposure situations. According to ICRP Publication 60 [3] the total w_T value for the remainder tissues was sixfold (0.05) reduced being distributed equally between 10 organs/tissues. However if the maximum equivalent dose to organs/tissues among the remainder tissues had exceeded the maximum equivalent dose for organs/tissues for which there is a specific w_T , then the organ/tissue from the remainder tissues exposed to the maximum equivalent dose should have received a half of the total w_T value (i.e. 0.025) with the rest part (0.025) been dis-

лення”). Публікація 103 МКРЗ [11] збільшила сумарне значення w_T для “решти органів” (до 0,12), розподілила його вже між 13 органами/тканинами і відмовилась від використання “правила розщеплення”.

Застосування різних систем w_T до певного набору значень еквівалентних доз призводить до отримання різних оцінок ефективної дози. Звичайно, застосування змін лише до одного чинника є не зовсім коректним, проте такого застосування може бути достатньо для отримання уяви про вплив чинника на оцінку ефективної дози.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Вихідними даними для отримання оцінок ефективних доз зовнішнього опромінення є еквівалентні дози, які наведено у [2]. У цьому документі крім еквівалентних доз були також опубліковані не ефективні дози (E або e), а еквіваленти ефективної дози (H_E або h_E), розраховані за Публікацією 26 МКРЗ [13]. Значення h_E до цього часу часто застосовуються як аналог дозових коефіцієнтів для розрахунків ефективної дози (e), однак ефективні дози, розраховані за Публікацією 60 МКРЗ [3], значно відрізняються від них. Порівняння h_E з e (надалі – $e_{ICRP-60}$) для всіх 825 радіонуклідів з [2] представлено на рис. 1 на прикладі трьох наборів дозових коефіцієнтів – для опромінення від напівнескінченної хмари, поверхні ґрунту та ґрунту із товщиною 5 см. По горизонтальній осі відображено відношення “ $h_E / e_{ICRP-60}$ ”, по вертикальній – його відносна кількість у відсотках.

tributed equally between 9 organs/tissues (“splitting rule”). The total w_T value for the remainder tissues (to 0.12) was increased in ICRP Publication 103 [11] with value distribution among 13 organs/tissues and cancellation of the “splitting rule” use.

The application of different w_T systems to a certain set of the equivalent dose values results in a different assessments of the effective dose. Of course the changes applied to only one element are not quite correct, but such an application may be sufficient for understanding of the impact the element to assessment of the effective dose.

RESULTS AND DISCUSSION

The equivalent doses that are given in [2] are the initial data for the effective dose assessment. That document also contains not the effective doses (E or e) but the effective dose equivalents (H_E or h_E) calculated according to ICRP Publication 26 [13]. The h_E values up to this time are often used as an analogue of the dose coefficients for the effective dose (e) calculations, but the effective doses calculated according to ICRP Publication 60 [3] are much different. Comparison of h_E and e (hereinafter – $e_{ICRP-60}$) for all 825 radionuclides from [2] is shown in Figure 1 by the example of three sets of the dose coefficients i.e. for the exposure from a semi-infinite cloud, a ground surface, and a soil with a depth of 5 cm. The “ $h_E / e_{ICRP-60}$ ” ratio is reflected on the horizontal axis and its relative quantity in % on the vertical one.

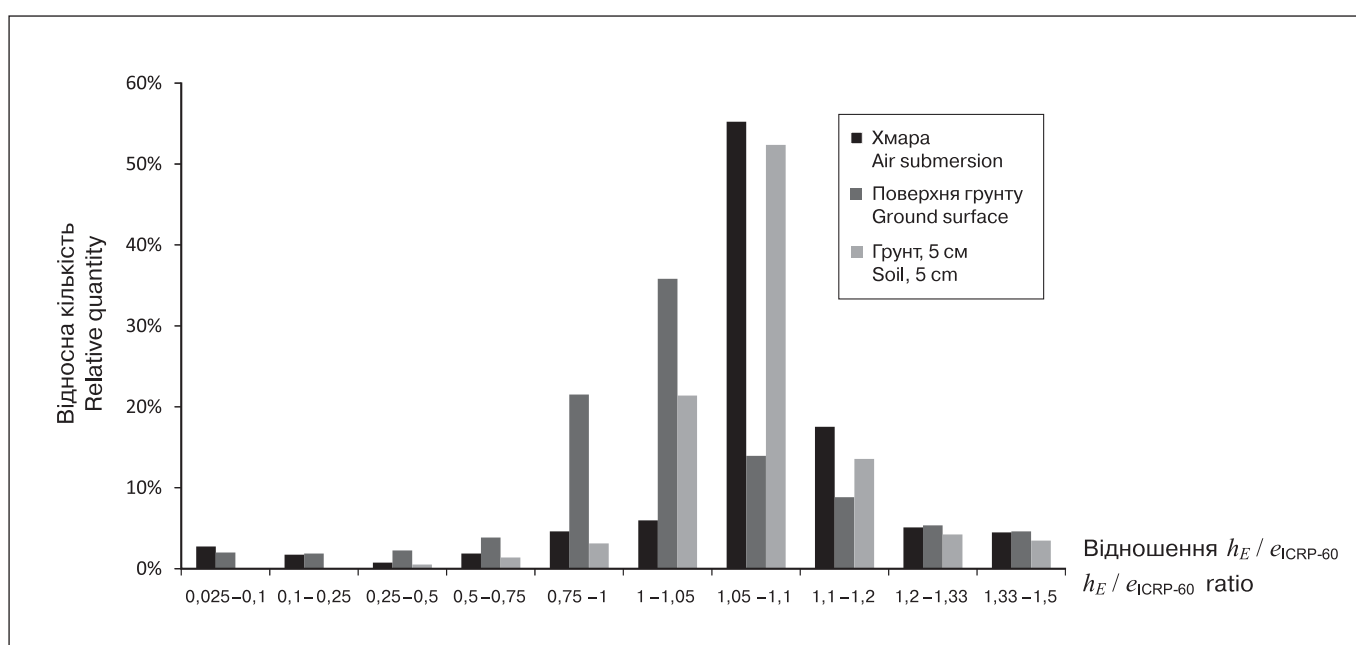


Рисунок 1. Розподіл значень “ $h_E / e_{ICRP-60}$ ” для зовнішнього опромінення

Figure 1. Distribution of the “ $h_E / e_{ICRP-60}$ ” values for external exposure

Для опромінення від напівнескінченної хмари більше 61 % значень h_E перевищують $e_{ICRP-60}$ не більше ніж на 10 %, від поверхні ґрунту – їх майже 50 %, від ґрунту із товщиною 5 см – майже 74 %. Значень h_E , що перевищують $e_{ICRP-60}$ від 33 до 50 %, для опромінення від напівнескінченної хмари і поверхні ґрунту – не більше 5 %, від ґрунту із товщиною 5 см – менше 4 %. Серед радіонуклідів із найбільшими значеннями “ $h_E / e_{ICRP-60}$ ” – Co-58m, Mo-93, Tc-97, Nb-95m, Rh-103m, Pd-103, Sb-119, Sb-124n, Sn-119m, I-125, Sm-151, а також деякі радіонукліди Cm, Cf, Pu, Fm.

Найбільш цікавим є наявність дуже малих значень “ $h_E / e_{ICRP-60}$ ”. Для опромінення від ґрунту із товщиною 5 см є лише 4 радіонукліди, для яких “ $h_E / e_{ICRP-60}$ ” трохи менше 0,5 (двократна недооцінка), а саме – P-32, Sr-89, Y-90, Fr-222. Однак для опромінення від напівнескінченної хмари майже для 3 % радіонуклідів недооцінка буде складати від 10 до 18 разів, серед них – Ar-39, Ca-45, Ni-66, Rb-87, Sr-90 (при цьому Y-90 дає чотирикратну недооцінку), Tc-99, Cs-135, Cs-137 (без урахування Ba-137m), Pm-147, Pb-209. Для опромінення від поверхні ґрунту недооцінка перевищує 10 разів для 2 % радіонуклідів, проте найбільша недооцінка досягає 33 разів (P-32, Zn-69, Sr-89, Pr-143, Tl-206, Bi-210), для Y-90 це значення складає 20 разів, для Sr-90 – 6 разів.

Для інертних радіоактивних газів (ІРГ) найменші значення “ $h_E / e_{ICRP-60}$ ” для опромінення від напівнескінченної хмари складають: Ar-39 – 0,08; Kr-85 – 0,5; найбільші значення – для Kr-83m (1,25) і Xe-133 (1,16). Для інших ІРГ значення “ $h_E / e_{ICRP-60}$ ” знаходяться в діапазоні від 1,04 до 1,15.

Альтернативним варіантом є використання дозових коефіцієнтів із [2] з деякими модифікаціями. У [14] використано дозові коефіцієнти із [2] шляхом додавання до h_E еквівалентної дози у шкірі, зваженої з тканинним зважуючим фактором для шкіри із Публікації 60 МКРЗ [3]. Тобто в якості “дозових коефіцієнтів” у [14] було використано такі значення:

$$\tilde{e} = h_E + w_{\text{skin (ICRP-60)}} h_{\text{skin}}$$

Такий підхід не дає коректної оцінки дозових коефіцієнтів за Публікацією 60 МКРЗ [3], хоча він і ліквідує проблему суттєвої недооцінки доз при прямому використанні h_E із Публікації 26 МКРЗ [13]. Власне кажучи, такий підхід взагалі ліквідує недооцінку доз (що може бути не дуже поганим для отримання консервативних оцінок доз) і призводить

For the exposure from a semi-infinite cloud more than 61% of h_E values exceed $e_{ICRP-60}$ values for no more than 10%, from a ground surface it is ~50%, from a depth of 5 cm ~74%. The relative quantity of the h_E values that exceed $e_{ICRP-60}$ from 33 to 50% for the exposure from a semi-infinite cloud and from a ground surface is less than 5%, from a soil with a depth of 5 cm – less than 4%. The Co-58m, Nb-93m, Mo-93, Tc-97, Rh-103m, Pd-103, Sn-119m, Sb-119, Sb-124n, I-125, Sm-151, and some radionuclides of Pu, Cm, Cf, Fm are among the radionuclides with the greatest “ $h_E / e_{ICRP-60}$ ” values.

Presence of very low “ $h_E / e_{ICRP-60}$ ” values is quite interesting. For the exposure from a soil with a depth of 5 cm there are only 4 radionuclides for which “ $h_E / e_{ICRP-60}$ ” value is slightly less than 0.5 (double underestimation), namely – P-32, Sr-89, Y-90, Fr-222. However, for the exposure from a semi-infinite cloud the underestimation for almost 3% of radionuclides is from 10 to 18 times, including Ar-39, Ca-45, Ni-66, Rb-87, Sr-90 (there is four times underestimation for Y-90), Tc-99, Cs-135, Cs-137 (excluding Ba-137m), Pm-147, Pb-209. For the exposure from a ground surface the underestimation is more than 10 times for 2% of radionuclides, but the biggest underestimation is 33 times (P-32, Zn-69, Sr-89, Pr-143, Tl-206, Bi-210), for Y-90 this value is 20 times, for Sr-90 it is 6 times.

For noble gasses the lowest “ $h_E / e_{ICRP-60}$ ” values for the exposure from a semi-infinite cloud are 0.08 for Ar-39, 0.5 for Kr-85; the highest values are for Kr-83m (1.25) and for Xe-133 (1.16). For other noble gasses the “ $h_E / e_{ICRP-60}$ ” values are in a range from 1.04 to 1.15.

Using the dose coefficients from [2] with some modifications is an alternative variant. The dose coefficients based on [2] were applied in [14] with addition to h_E of the equivalent doses to the skin weighted with the tissue weighting factor for the skin from ICRP Publication 60 [3]. That is the following values were used as the “dose coefficients” in [14]:

Such an approach gives no correct assessment of the dose coefficients from ICRP Publication 60 [3], although it eliminates the problem of the significant underestimation for doses with the direct use of h_E values from ICRP Publication 26 [13]. Indeed this approach eliminates any underestimation of doses (which can be not very bad for a conservative dose

тільки до завищення оцінок у порівнянні з коректними значеннями $e_{ICRP-60}$ (рис. 2). Більше ніж для 5 % радіонуклідів таке перевищення буде складати більше 40 % (для опромінення від напівнескінченної хмари і поверхні ґрунту).

assessment) leading only to overestimation in comparison with the correct $e_{ICRP-60}$ values (see Fig. 2). More than for 5% of radionuclides such an overestimation would be over 40% (for exposure from a semi-infinite cloud and a ground surface).

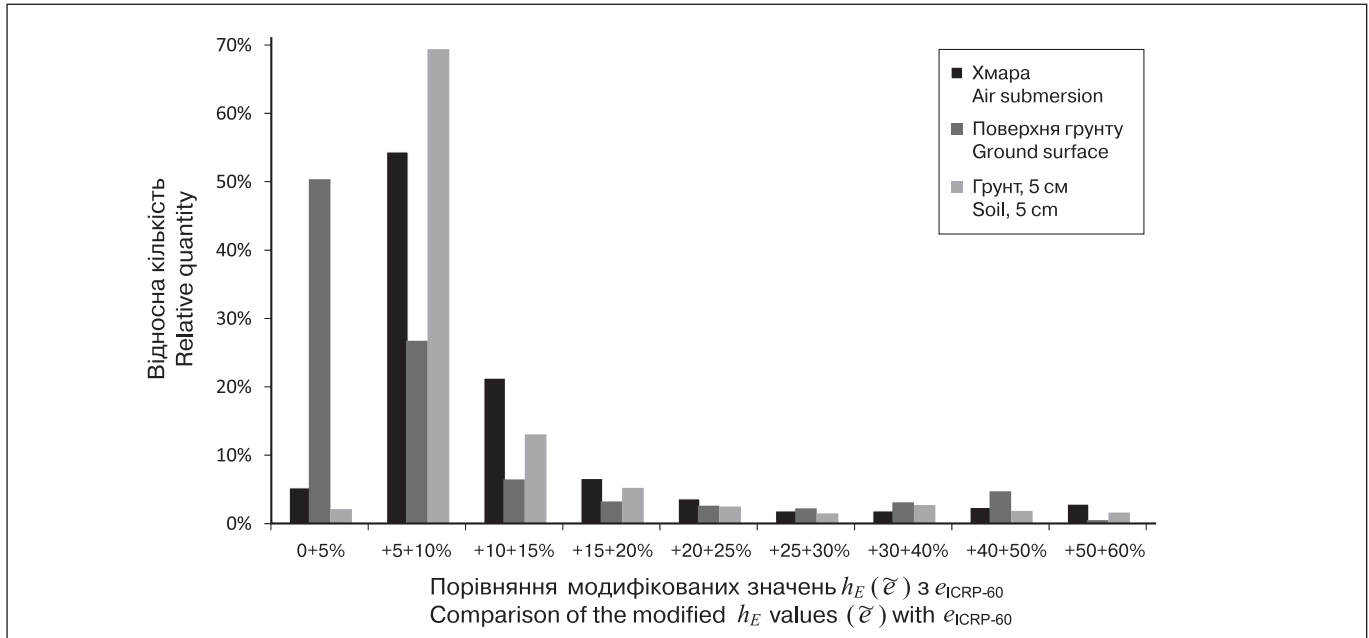


Рисунок 2. Розподіл відмінностей між модифікованими значеннями h_E і $e_{ICRP-60}$ для зовнішнього опромінення

Figure 2. Distribution of the differences between modified h_E and $e_{ICRP-60}$ values for the external exposure

Застосування системи w_T із Публікації 103 МКРЗ [11] до еквівалентних доз формує значення ефективних доз (надалі — $e_{ICRP-103}$), що відрізняються від значень $e_{ICRP-60}$. Як вказано вище, $e_{ICRP-103}$ в цій роботі не є значеннями, що повністю відповідають Публікації 103 МКРЗ [11], вони інкорпоруєть в собі вплив лише системи w_T із Публікації 103 МКРЗ [11].

Рис. 3 подає розподіл порівняння значень $e_{ICRP-103}$ і $e_{ICRP-60}$ для зовнішнього опромінення. З поданого розподілу випливає, що перехід від $e_{ICRP-60}$ до $e_{ICRP-103}$ призводить до менших змін в оцінці доз опромінення у порівнянні зі змінами при переході від h_E до $e_{ICRP-60}$.

Значна частка дозових коефіцієнтів зменшиться не більше ніж на 5 %. Для опромінення від напівнескінченної хмари це стосується майже 94 %, від поверхні ґрунту — майже 86 %, від ґрунту із товщиною 5 см — майже 91 %.

Для опромінення від напівнескінченної хмари найбільші перевищення (більше 15 %) будуть для 4 радіонуклідів — Ge-68, Ge-71, Os-189m, Ir-190m; найбільші недооцінки (9 % і більше) — для Co-58m, Sn-119m, Sb-119, Sb-124n, Te-123, I-125, Cs-131.

Application of the w_T system from ICRP Publication 103 [11] to the equivalent doses generates values of effective doses (hereinafter — $e_{ICRP-103}$) which differ from the $e_{ICRP-60}$ values. As noted above the $e_{ICRP-103}$ in this paper are not the values that fully comply with ICRP Publication 103 [11] rather they incorporate only the impact of the w_T system from ICRP Publication 103 [11].

Figure 3 demonstrates the distribution of the differences between the $e_{ICRP-103}$ and $e_{ICRP-60}$ values for the external exposure. As it follows from the distribution the transition from $e_{ICRP-60}$ to $e_{ICRP-103}$ leads to less changes in dose assessments compared to the changes for the transition from h_E to $e_{ICRP-60}$.

A considerable part of the dose coefficients will decrease by no more than 5%. For the exposure from a semi-infinite cloud it is the case for almost 94%, from a ground surface — for nearly 86%, and from soil with a depth of 5 cm — almost 91%.

In exposure from a semi-infinite cloud the highest overestimation (over 15%) is for the 4 radionuclides — Ge-68, Ge-71, Os-189m, Ir-190m. The largest underestimation (9% and more) is for Co-58m, Sn-119m, Sb-119, Sb-124n, Te-123, I-125, and Cs-131.

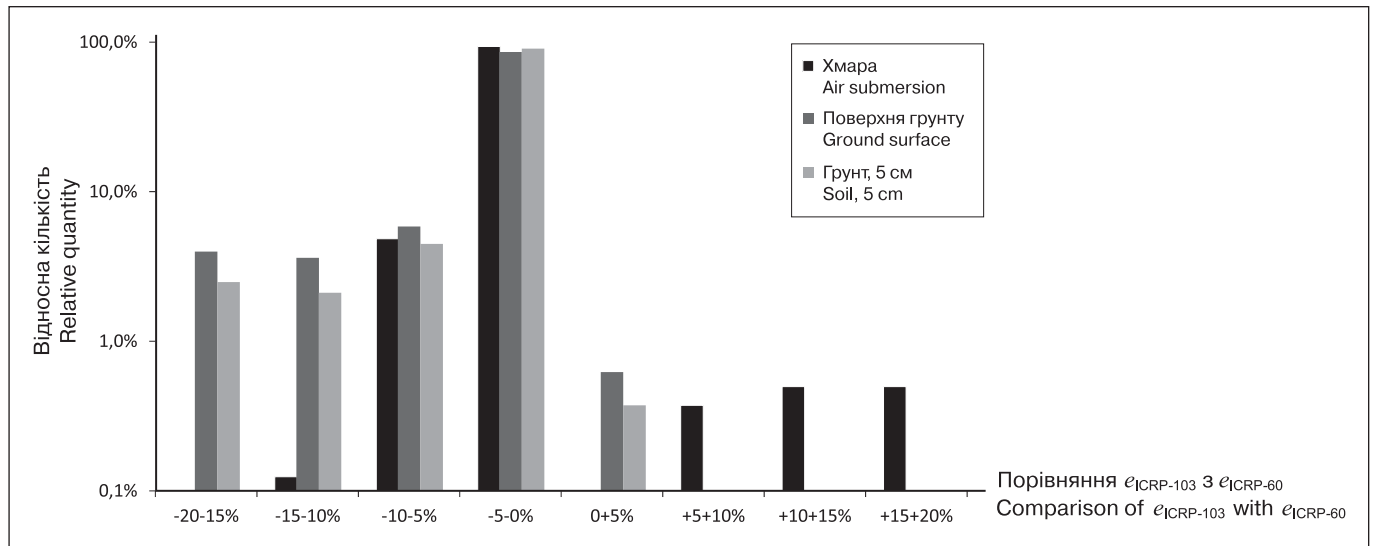


Рисунок 3. Розподіл відмінностей між $e_{ICRP-103}$ і $e_{ICRP-60}$ для зовнішнього опромінення

Figure 3. Distribution of the differences between the $e_{ICRP-103}$ and $e_{ICRP-60}$ values for external exposure

Визначення впливу зміни системи w_T (при переході від Публікації 60 МКРЗ [3] до Публікації 103 МКРЗ [11]) на оцінки доз внутрішнього опромінення виконано на прикладі дозових коефіцієнтів для персоналу [15]. Для інгаляційного надходження було виконано перерахунок дозових коефіцієнтів для аерозолів всіх типів матеріалів (F, M, S) і газоподібних сполук. Для аерозолів порівняння виконувалось для дозових коефіцієнтів для часточок з AMAD 1 мкм і 5 мкм.

Розподіли порівняння значень $e_{ICRP-103}$ над $e_{ICRP-60}$ для перорального та інгаляційного надходження наведені на рис. 4 і 5, відповідно. На зазначених рисунках виділено окремі групи "0", що відображають відносну кількість $e_{ICRP-103}$ і $e_{ICRP-60}$, які будуть рівними після заокруглення до двох значущих цифр (як зазвичай публікуються дозові коефіцієнти).

Отримані розподіли для оцінок доз за рахунок перорального та інгаляційного надходжень мають принципово різну форму. Для перорального надходження 44 % дозових коефіцієнтів зменшуються, 38 % – збільшуються; майже 80 % дозових коефіцієнтів змінюються не більше ніж на 10 %. Приблизно 3 % дозових коефіцієнтів зменшуються від 20 до 40 %. Для інгаляційного надходження майже 68 % дозових коефіцієнтів зменшуються, 21 % – збільшуються; майже 53 % дозових коефіцієнтів будуть зменшені більше ніж на 10 %.

Зменшення дозових коефіцієнтів для внутрішнього опромінення є, в основному, наслідком впливу таких двох змін у Публікації 103 МКРЗ [11]: відміни "правила розщеплення" і зменшення значення w_T для щитоподібної залози.

Застосування "правила розщеплення" Публікацією 60 МКРЗ [3] призводило до збільшення оцінок

Determining the impact of the w_T system changes (transition from ICRP Publication 60 [3] to ICRP Publication 103 [11]) for the internal dose assessment was held using the dose coefficients to the workers [15]. The recalculation of dose coefficients for aerosols of all material types (F, M, S) and for gaseous compounds was performed for the inhalation intake. For aerosols the comparison was performed of dose coefficients for particles of 1 μm and 5 μm AMAD.

Distributions of the differences between the $e_{ICRP-103}$ and $e_{ICRP-60}$ for ingestion and inhalation are shown in Figures 4 and 5, respectively. The separate groups "0" in these figures corresponds to relative numbers of $e_{ICRP-103}$ and $e_{ICRP-60}$ that would be equal upon rounding to two significant digits (as the dose coefficients are usually published).

The received distributions for dose assessments for ingestion and inhalation have principally different shapes. For the ingestion 44% of the dose coefficients decrease, 38% increase, with almost 80% of the dose coefficients change by no more than 10%. Approximately 3% of the dose coefficients decrease from 20 to 40%. For the inhalation almost 68% of the dose coefficients decrease, 21% increase, almost 53% of the dose coefficients decrease by more than 10%.

Decrease the dose coefficients for internal exposure is mainly a consequence of the impact of two changes in ICRP Publication 103 [11]: the "splitting rule" cancellation and the w_T value reduce for thyroid.

The application of "splitting rule" in ICRP Publication 60 [3] led to increased assessments for some

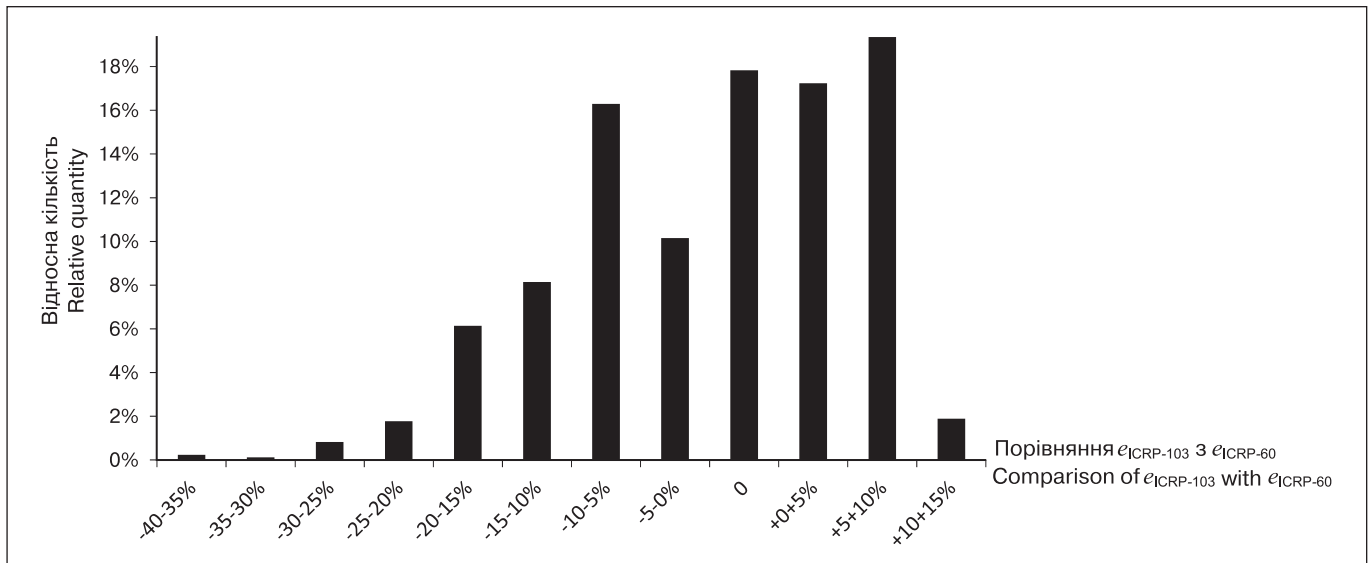


Рисунок 4. Розподіл відмінностей між $e_{ICRP-103}$ і $e_{ICRP-60}$ для перорального надходження

Figure 4. Distribution of the differences between the $e_{ICRP-103}$ and $e_{ICRP-60}$ values for ingestion

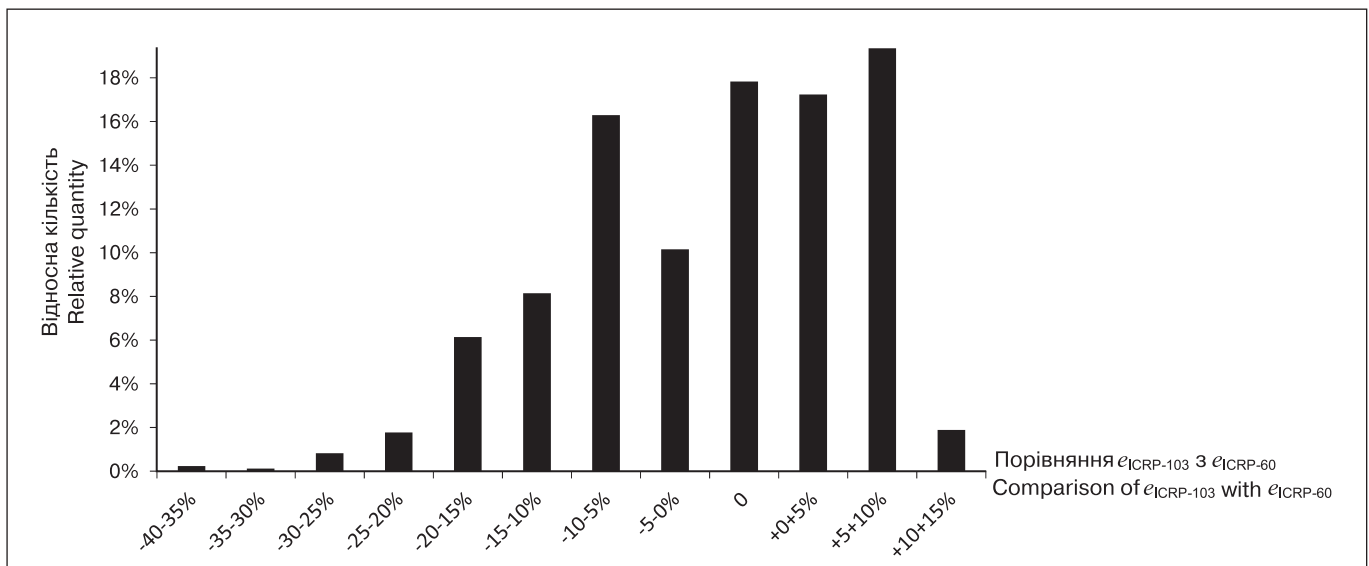


Рисунок 5. Розподіл відмінностей між $e_{ICRP-103}$ і $e_{ICRP-60}$ для інгаляційного надходження

Figure 5. Distribution of the differences between the $e_{ICRP-103}$ and $e_{ICRP-60}$ values for inhalation

деяких ефективних доз внутрішнього опромінення, однак це у більшій мірі стосувалось інгаляційного надходження. Для перорального надходження це правило було застосовано лише для 5 % дозових коефіцієнтів (з них 60 % – за рахунок значних еквівалентних доз у нирках; 28 % – у стінках тонкого кишечника), а для інгаляційного надходження – для 63 % (з них майже 96 % – за рахунок дихальних шляхів позагрудної області; 3,5 % – нирок).

Зменшення значення w_T для щитоподібної залози на 20 % (з 0,05 до 0,04) має вплив на обидва види надходження і втілилось у найбільш передбачуваному результаті – зменшенні дозових коефіцієнтів для більшості радіонуклідів йоду. Для ефективних доз за

effective internal doses, but to a greater extent it concerned the inhalation intake. Regarding the ingestion this rule was applied only for 5% of the dose coefficients (for 60% of them at the expense of substantial equivalent doses to kidneys, 28% – to the small intestine wall), and for inhalation – for 63% (almost 96% of which due to the extrathoracic region of the respiratory tract; and 3.5% – to the kidneys).

Decrease of w_T value for the thyroid by 20% (from 0.05 to 0.04) has an influence on both types of intake and takes shape in the most predictable results i.e. in dose coefficients for most radionuclides of iodine. There is a decrease by 13% or more

рахунок перорального надходження зменшення на 13 % і більше буде для I-121, I-123, I-124, I-125, I-126, I-129, I-130, I-131, I-132, I-132m, I-133, I-135. Для інгаляційного надходження до цього переліку будуть також залучені I-120, I-120m, I-128, I-134.

Ще однією відмінністю наведених розподілів є випадки значного збільшення (на 40 % і більше) для інгаляційного надходження деяких радіонуклідів. Серед останніх – Mo-93, Zr-93, Pd-107, Pa-231, Pa-232, Th-229, Th-230, Th-232, U-232, U-233, U-234, U-235, U-236, U-238, Pu-239, Pu-240, Pu-241, Pu-244 (для Th-232 збільшення буде вдвічі і більше). Збільшення дозових коефіцієнтів є більш характерним для інгаляційного надходження радіонуклідів з типом матеріалу S (за рахунок включення лімфовузлів до “решти органів”), зменшення – для типу матеріалу F (і, частково, M).

ВИСНОВКИ

Застосування різних систем тканинних зважуючих факторів має певний вплив на оцінку ефективних доз опромінення людини. Відмінності в оцінці доз зовнішнього опромінення при застосуванні системи тканинних зважуючих факторів за Публікацією 26 МКРЗ [13] у порівнянні з Публікацією 60 МКРЗ [3] можуть бути значними – від переоцінки в 1,5 раза до недооцінки у 30 разів.

Застосування системи тканинних зважуючих факторів із Публікації 103 МКРЗ [11] у порівнянні з Публікацією 60 МКРЗ [3] не призводить до змін оцінки ефективних доз більше ніж на 20 % для всіх радіонуклідів при оцінках доз зовнішнього опромінення і для значної більшості радіонуклідів (97 %) при оцінках доз внутрішнього опромінення за рахунок перорального надходження.

Дозові коефіцієнти для інгаляційного надходження зменшаться для 67 % радіонуклідів (для більше ніж 52 % зменшення буде в діапазоні від 10 до 40 %). Для деяких радіонуклідів для інгаляційного надходження типу матеріалу S дозові коефіцієнти значно збільшаться (від 40 % до 2,3 раза), що є наслідком включення лімфовузлів до “решти органів”.

Для більшості радіонуклідів йоду оцінка доз внутрішнього опромінення зменшиться (до 20 %).

Вказані зміни дозових оцінок є результатом впливу зміни лише системи тканинних зважуючих факторів. Більший вплив на дозові оцінки можуть дати сукупне застосування оновлених біокінетичних моделей людини (стосується лише внутрішнього опромінення), референтних анатомічних характеристик людини і характеристик радіонуклідів.

for the effective doses from the ingestion of I-121, I-123, I-124, I-125, I-126, I-129, I-130, I-131, I-132, I-132m, I-133, I-135. For the inhalation circumstances this list also includes I-120, I-120m, I-128, and I-134.

A significant increase (by 40% or more) for the inhalation of certain radionuclides is another difference within given distributions. The following radionuclides – Mo-93, Zr-93, Pd-107, Pa-231, Pa-232, Th-229, Th-230, Th-232, U-232, U-233, U-234, U-235, U-236, U-238, Pu-239, Pu-240, Pu-241, Pu-244 are among them. For Th-232 the increase is twofold or more. Dose coefficients increase is much typical for the inhalation of radionuclides of the type S material (due to the inclusion of lymph nodes to the remainder tissues), decreasing – for the material type F (and partially for type M).

CONCLUSION

Application of the different systems of tissue weighing factors has an influence on the assessment of effective doses to human. Differences in the assessment of external exposure due to the application of the tissue weighing factors from ICRP Publication 26 [13] compared with ICRP Publication 60 [3] can be significant i.e. from the 1.5 times overestimation to the 30 times underestimation.

Application of the tissue weighing factors from ICRP Publication 103 [11] in comparison with ICRP Publication 60 [3] does not lead to changes in the effective dose assessments for more than 20% for all radionuclides under dose assessments of external exposure and for the large majority of radionuclides (97%) under the internal dose estimates from the ingestion.

The dose coefficients for inhalation would reduce for 67% radionuclides (the decrease is from 10 to 40% for more than 52% radionuclides). For some radionuclides within inhalation of the material type S the dose coefficients would significantly increase (from 40% to 2.3 times) being an effect of the lymph nodes inclusion to the remainder tissues.

For the most iodine radionuclides the assessments of the internal doses would decrease (for up to 20%).

The mentioned changes in dose assessments are the result of a change the system of the tissue weighing factors only. Greater impact on the dose assessments may be a result of the combined application of updated biokinetic human models (concerning internal exposure only), reference human anatomical characteristics, and characteristics of radionuclides.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. International basic safety standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources. Safety Series 115. – Vienna : International Atomic Energy Agency, 1996. – 353 p.
2. Eckerman K. F. Federal Guidance Report No. 12, External exposure to radionuclides in air, water, and soil / K. F. Eckerman, J. C. Ryman. – Washington : U.S. Environmental Protection Agency, DC, EPA-402-R-93-081. – 1993. – 237 p.
3. ICRP Publication 60. 1990 Recommendations the International Radiological of Commission Protection // Ann. ICRP. – 1991. – Vol. 21, N 1–3. – 201 p.
4. ICRP Publication 38. Radionuclide transformations // Ann. ICRP. – 1983. – Vol. 11–13. – 1250 p.
5. ICRP Publication 107. Nuclear decay data for dosimetric calculations // Ann. ICRP. – 2008. – Vol. 38, N 3. – 121 p.
6. ICRP Publication 23. Report of the Task Group on reference man. – Oxford : Pergamon Press, 1975. – 480 p.
7. ICRP Publication 89. Basic anatomical and physiological data for use in radiological protection: Reference values // Ann. ICRP. – 2002. – Vol. 32, N 3–4. – 265 p.
8. ICRP Publication 110. Adult reference computational phantoms // Ann. ICRP. – 2009. – Vol. 39, N 2. – 165 p.
9. ICRP Publication 66. The Human respiratory tract model // Ann. ICRP. – 1994. – Vol. 24, N 1 – 3. – 482 p.
10. ICRP Publication 100. Human alimentary tract model for radiological protection // Ann. ICRP. – 2006. – Vol. 36, N 1-2. – 336 p.
11. ICRP Publication 103. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection // Ann. ICRP. – 2007. – Vol. 37, N 2–4. – 332 p.
12. Radiation protection and safety of radiation sources: International basic safety standards. Interim Edition. General Safety Requirement. IAEA Safety Standards No. GSR Part 3 (Interim). – Vienna : International Atomic Energy Agency. – 2011. – 282 p.
13. ICRP Publication 26. Recommendations the International Radiological of Commission Protection // Ann. ICRP. – 1977. – Vol. 1, N 3. – 53 p.
14. Generic Models for Use in assessing the impact of discharges of radioactive substances to the environment. Safety Reports Series No. 19. – Vienna : International Atomic Energy Agency. – 2001. – 216 p.
15. ICRP Publication 68. Dose coefficients for intakes of radionuclides by workers // Ann. ICRP. – 1994. – Vol. 24, N 4. – 120 p.

REFERENCES

1. International basic safety standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources. Safety Series 115. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1996; 353 p.
2. Eckerman KF, Ryman JC. Federal Guidance Report No. 12, External exposure to radionuclides in air, water, and soil. Washington: U.S. Environmental Protection Agency, DC, EPA-402-R-93-081; 1993. 237 p.
3. ICRP Publication 60. 1990 Recommendations the International Radiological of Commission Protection. Ann ICRP. 1991; 21(1–3). 201 p.
4. ICRP Publication 38. Radionuclide transformations. Ann ICRP. 1983;11–13. 1250 p.
5. ICRP Publication 107. Nuclear decay data for dosimetric calculations. Ann ICRP. 2008; 38(3). 121 p.
6. ICRP Publication 23. Report of the Task Group on reference man. Oxford: Pergamon Press; 1975. 480 p.
7. ICRP Publication 89. Basic anatomical and physiological data for use in radiological protection: Reference values. Ann ICRP. 2002; 32 (3–4). 265 p.
8. ICRP Publication 110. Adult reference computational phantoms. Ann ICRP. 2009; 39 (2). 165 p.
9. ICRP Publication 66. The Human respiratory tract model. Ann ICRP. 1994; 24 (1–3). 482 p.
10. ICRP Publication 100. Human alimentary tract model for radiological protection. Ann ICRP. 2006; 36 (1–2). 336 p.
11. ICRP Publication 103. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Ann ICRP. 2007; 37 (2–4). 332 p.
12. Radiation protection and safety of radiation sources: International basic safety standards. Interim Edition. General Safety Requirement. IAEA Safety Standards No. GSR Part 3 (Interim). Vienna: International Atomic Energy Agency; 2011. 282 p.
13. ICRP Publication 26. Recommendations the International Radiological of Commission Protection. Ann ICRP. 1977;1(3). 53 p.
14. Generic Models for Use in assessing the impact of discharges of radioactive substances to the environment. Safety Reports Series No. 19. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2001. 216 p.
15. ICRP Publication 68. Dose coefficients for intakes of radionuclides by workers. Ann ICRP. 1994; 24(4). 120 p.

Стаття надійшла до редакції 06.08.2013

Received: 06.08.2013