

УДК 504.064:614.876

О. М. Іванова¹✉, Л. М. Ковган², С. В. Масюк¹¹Державна установа «Національний науковий центр радіаційної медицини Національної академії медичних наук України», 53, вул. Мельникова, м. Київ, 04050, Україна²Науково-дослідний інститут радіаційного захисту Академії технологічних наук України, вул. Мельникова, 53, а/с 52, м. Київ, 04050, Україна

МЕТОДИКА РЕКОНСТРУКЦІЇ ІНДИВІДУАЛІЗОВАНИХ ДОЗ ОПРОМІНЕННЯ ОСІБ, ЩО МЕШКАЮТЬ НА РАДІОАКТИВНО ЗАБРУДНЕНИХ ТЕРИТОРІЯХ УКРАЇНИ

Мета дослідження. Розробка методики реконструкції індивідуалізованих доз опромінення населення, яке мешкає на радіоактивно забруднених внаслідок Чорнобильської катастрофи територіях.

Матеріали та методи дослідження. Методика базується на даних радіоекологічного (ґрунт, продукти харчування) та дозиметричного (ЛВЛ-вимірювання) моніторингів, що проводились в Україні у 1986–2013 рр., результати яких зберігаються у базах даних Центрального еколого-дозиметричного реєстру лабораторії радіологічного захисту ННЦРМ. Представлено чотири рівні індивідуалізації доз опромінення. Кожен наступний рівень базується на попередньому і враховує додаткові параметри, завдяки чому модель наступного рівня охоплює більшу кількість ситуацій опромінення та надає точніші оцінки. При використанні методики слід вибирати модель того рівня, який найкращим чином дозволяє розв'язати поставлені перед дослідником завдання. Для населення радіоактивно забруднених територій розглядаються два основних шляхи опромінення: (а) зовнішнє гамма-опромінення від радіонуклідів у ґрунті та (б) внутрішнє опромінення від споживання радіоактивно забруднених продуктів харчування. Доза обчислюється від усіх основних радіонуклідів радіоактивного аварійного викиду, а у випадку внутрішнього опромінення після 1986 року - лише від радіоізотопів цезію (^{134}Cs та ^{137}Cs).

Результати. Індивідуалізовані дози розраховано для різних вікових груп населення, яке мешкає у 10 районах найбільш постраждалих внаслідок чорнобильської аварії областей України: Житомирської, Київської, Рівненської та Чернігівської. Наводяться оцінки доз, зважених на чисельність населення у населених пунктах (НП) окремих районів. Серед них: доза за 1986 р.; дози, накопичені за перші 15 післяаварійних років (1986–2000 рр.) та за 32-річний період (1986–2017 рр.) після аварії.

Висновки. Середньорайонна доза, реконструйована для дорослих жителів найбільш радіоактивно забрудненого Народицького району Житомирської області у 1986 р. склала 18 мЗв, а накопичена за весь післяаварійний період – 51 мЗв. Найменші дози серед зазначених 10 районів отримали особи, що мешкають на території Козелецького та Ріпкинського районів Чернігівської області. Середня доза для них у 1986 р. становила 1,3 та 1,7 мЗв, а накопичена за 32 роки – 6,1 та 6,2 мЗв відповідно.

Ключові слова: еколого-дозиметрична модель, індивідуалізовані дози опромінення, реконструкція доз опромінення, доза зовнішнього опромінення, доза внутрішнього опромінення, Чорнобильська катастрофа.

Проблеми радіаційної медицини та радіобіології. 2018. Вип. 23. С. 164–187. doi: 10.33145/2304-8336-2018-23-164-187.

✉ Іванова Ольга Миколаївна, e-mail: iolgagm@gmail.com

O. M. Ivanova¹✉, L. M. Kovgan², S. V. Masiuk¹

¹State Institution «National Research Center for Radiation Medicine of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine», Melnykova str., 53, Kyiv, 04050, Ukraine

²Ukrainian Radiation Protection Institute of the Academy of Technological Sciences of Ukraine, Melnykov str., 53, PO Box 52, Kyiv, 04050, Ukraine

METHODOLOGY OF RECONSTRUCTION OF INDIVIDUALIZED EXPOSURE DOSES FOR PERSONS RESIDING AT RADIOACTIVELY CONTAMINATED TERRITORIES OF UKRAINE

Objective. Development of methodology for reconstruction of individualized exposure doses for persons residing at radioactively contaminated after Chernobyl accident territories.

Materials and methods of research. The methodology is based on the data of radio-ecological (ground, meal) and dosimetric (WBC measurements) monitoring held in Ukraine in 1986–2013, the results of which are saved in data bases of Central Ecological and Dosimetric Register of Radiological Protection Laboratory of NRCRM. It is presented four levels of individualization of exposure doses. Each subsequent level of the model is based on the previous one and takes into account additional parameters, and as a result a model of the next level comprises more number of exposure situations and provides more accurate estimates. Using the methodology it is necessary to select a model of such level that enables to solve in the best way the assignments posed before a researcher. For the population of radioactively contaminated territories, two main ways of exposure are considered: (a) external gamma-exposure from radionuclides in the ground, and (b) internal exposure from consumption of radioactively contaminated meal. The dose is evaluated from all the main radionuclides of radioactive accident deposition, and in case of internal exposure after 1986 – only from radio-isotopes of cesium (¹³⁴Cs and ¹³⁷Cs).

Results. Individualized doses are evaluated for different age groups of population residing in 10 raions of the most contaminated after Chernobyl accident Oblasts of Ukraine: Zhytomyr, Kyiv, Rivne and Chernihiv Oblasts. Dose estimates are presented weighted by the number of residents in settlements of specific raions. Among them are: the dose for 1986, doses accumulated during the first 15 years after the accident (1986–2000), and during the period of 32 years after the accident (1986–2017).

Conclusions. Average raion dose reconstructed for adult residents of the most radioactively contaminated Narodychy Raion of Zhytomyr Oblast in 1986 was 18 mSv, and accumulated during the whole period after the accident was 51 mSv. The lowest doses among abovementioned 10 raions were obtained by persons residing at the territory of Kozelets and Ripky Raions of Chernihiv Oblast. Average dose for them in 1986 constituted 1.3 and 1.7 mSv, and the one accumulated during 32 years was 6.1 and 6.2, respectively.

Key words: ecological and dosimetric model, individualized exposure doses, reconstruction of exposure doses, dose of external exposure, dose of internal exposure, Chernobyl accident.

Problems of radiation medicine and radiobiology. 2018;23:164–187. doi: 10.33145/2304-8336-2018-23-164-187.

ВСТУП

Методика реконструкції доз опромінення включає декілька пов'язаних між собою рівнів індивідуалізації. Для кожного з них створена еколого-дозиметрична модель оцінки дози у певній ситуації опромінення з певним набором параметрів, що визначають властивості джерела чи суб'єкта опромінення. Кожен наступний рівень моделі базується на попередньому і враховує додаткові параметри, завдяки чому модель наступного рівня охоплює більшу кількість ситуацій опромінення та надає більш точні оцінки. При використанні методики необхідно вибрати модель того рівня, який найкращим чином

INTRODUCTION

Methodology for reconstruction of exposure doses includes several level of individualization related to each other. For each of them, it is created an ecological and dosimetric model of dose estimate in certain exposure situation, with certain collection of parameters that determine properties of a source or a subject of exposure. Each subsequent level of the model is based on the previous one and takes account of additional parameters, and as a result a model of the next level comprises more number of exposure situations and provides more accurate estimates. In using the methodology, it is necessary to select a model of such

дозволяє розв'язати поставлені перед дослідником завдання, а також враховувати кількість та якість наявних первинних даних.

Окреслимо чотири рівні індивідуалізації доз (рис. 1) мешканців населених пунктів (НП), розташованих на радіоактивно забрудненій території (РЗТ). На кожному такому рівні оцінюються дози як зовнішнього, так і внутрішнього опромінення, а також сумарна доза.

level that enables in the best way to resolve tasks posed before a researcher and also to take account of the number and quality of available initial data.

Indicate four levels of individualized doses (Fig. 1) of settlements residents that are situated at the radioactively contaminated territory (RCT). At each such level, it is estimated the doses of both external and internal exposure, as well as the total dose.

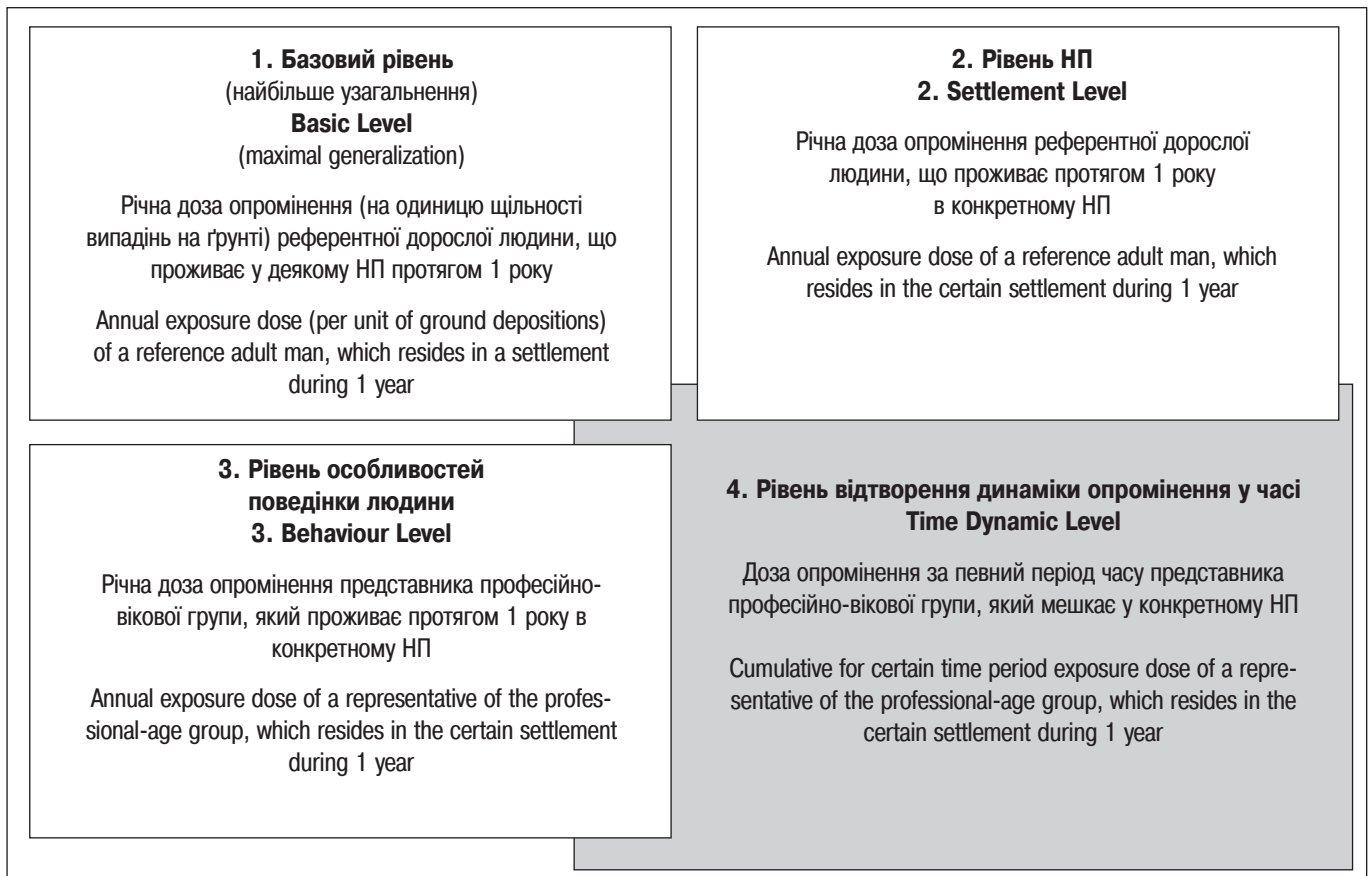


Рисунок 1. Рівні індивідуалізації доз опромінення мешканців РЗТ

Figure 1. Levels of individualization for exposure doses of residents of RCT

Основою методики реконструкції індивідуалізованих доз є її базовий рівень, який представляють дози зовнішнього (d^{ext}) та внутрішнього (d^{int}) опромінення референтної дорослої людини (≥ 18 років) на одиницю радіоактивних випадіння на ґрунті. Вважається, що така людина проживає в одному й тому ж НП на РЗТ протягом 1 року. d^{ext} та d^{int} є тією спільною неіндивідуалізованою основою, яка допомагає визначити лише вплив джерела опромінення і не враховує особливостей радіоактивного забруднення у місці проживання людини та її особистої поведінки.

Дози опромінення на рівні НП, D_s^{ext} та D_s^{int} — це оцінки річних доз опромінення референтного жителя певного s -го НП. Крім базових параметрів та функцій вони включають специфічні радіологічні

The base of methodology for reconstruction of individualized doses is its basic level, that is constituted by doses of external (d^{ext}) and internal (d^{int}) exposure of a reference adult (aged ≥ 18 years) per unit of radioactive deposition on the ground. It is assumed that such person is residing at the same settlement at RCT for 1 year. d^{ext} and d^{int} is that joint non-individualized base, which helps to determine only an impact of a source of exposure and does not take account of peculiarities of radioactive contamination at a place of residence of a person and his/her behavioural peculiarities.

Exposure doses at settlement levels D_s^{ext} and D_s^{int} are estimates of annual exposure doses of a reference resident of certain s^{th} settlement. Besides basic parame-

характеристики, що відносяться саме до цього НП. D_s^{ext} та D_s^{int} дають можливість порівняти радіаційний вплив на людину в різних НП на РЗТ України. Прикладом таких доз є так звані «паспортні» дози, що розраховувались в рамках «Загальнодозиметричної паспортизації населених пунктів України, які зазнали радіоактивного забруднення після Чорнобильської катастрофи» у період 1991–2013 рр. [1–4]. Ці дози використовувались для прийняття рішень уповноваженими органами влади щодо необхідності впровадження контрзаходів на постраждалих територіях. Річна «паспортна» доза НП оцінювалась з використанням результатів радіологічного та дозиметричного моніторингу, що проводились у даному НП протягом року. При цьому не враховувались індивідуальні характеристики мешканців НП.

Дози зовнішнього ($D_{s,a}^{ext}$) та внутрішнього ($D_{s,a}^{int}$) опромінення представників професійно-вікової групи a окрім радіологічних характеристик НП, де проживає людина, враховують її індивідуальні та біологічні аспекти, пов'язані з віком, раціоном харчування та особливостями поведінки. Такі дози вже можна назвати індивідуалізованими, оскільки вони відображають саме ту ситуацію, яка найбільш наближена до реальних умов проживання людини на РЗТ. Індивідуалізовані дози третього рівня можна застосовувати у демографічних та епідеміологічних дослідженнях а також для поповнення дозиметричних реєстрів, одним з яких є Державний реєстр України осіб, які постраждали внаслідок Чорнобильської катастрофи [5–9].

Рівень відтворення динаміки опромінення у часі $D_{s,a}^{ext}(t)$ та $D_{s,a}^{int}(t)$ є універсальним. Величини, що оцінюються як функції часу t , можуть використовуватись не тільки для отримання найбільш детальних оцінок індивідуалізованих доз, пов'язаних з періодом часу після аварійного радіоактивного викиду, але й у моделях перших трьох рівнів для визначення часової динаміки опромінення. Взагалі, структура моделі індивідуалізації доз може відрізнятись у різні роки. Так, наприклад, модель внутрішнього опромінення у 1986 р. передбачає листовий тип надходження радіоактивності з використанням відповідних параметрів, а модель внутрішнього опромінення після 1986 р. – кореневий тип надходження.

Зауважимо, що деякі параметри та функції дозиметричних моделей в одних випадках можуть виступати як НП-специфічні, а в інших – залишатись константами у розрізі району чи, навіть, області. Наприклад, параметр K_r , який позначає співвідношення радіонуклідів у випадіннях на ґрунті у квітні

ters and functions, they include specific radiological characteristics that deal with namely that settlement. D_s^{ext} and D_s^{int} enable to compare a radiation effect on a person in different settlements at RCT of Ukraine. Examples of such doses are the so-called *passport* doses that were evaluated in the frame of «Integrated Dosimetric Passportization of the Settlements of Ukraine that Affected from Radioactive Contamination due to Chornobyl accident» in the period of 1991–2013 [1–4]. Those doses were used for decision making by competent authorities concerning necessity to implement mitigation measures at contaminated territories. Annual *passport* settlement dose was estimated using the results of radiological and dosimetric monitoring held in a given settlement in that year. At that individualized characteristics of residents of settlement were not taken into account.

Doses of external ($D_{s,a}^{ext}$) and internal ($D_{s,a}^{int}$) exposure of representatives of a professional-age group a besides radiological characteristics of settlement where a person resides, take account of his/her individual and biological aspects related to the age, diet, and behaviour peculiarities. Such doses already can be called individualized, because they reflect namely the situation that is the closest to real conditions of residing of a person at RCT. Individualized doses of the third level can be used in demographic and epidemiological research, and also for completion of dosimetric registers, one of which is Ukrainian State Register of persons, affected due to Chornobyl accident [5–9].

A level of reconstruction of exposure dynamics in time $D_{s,a}^{ext}(t)$ and $D_{s,a}^{int}(t)$ is universal. Quantities that are estimated as functions of time t can be used not only for obtaining the most detailed estimates of individualized doses related to a period of time after accidental radioactive deposition, but also in models of the first three levels for determining of time exposure dynamics. In general a structure of a model for individualization of doses can vary in different years. E.g., the model of internal exposure in 1986 suppose a leaf type of radioactivity intake with usage of corresponding parameters, and the model of internal exposure after 1986 uses a root type of intake.

Notice that some parameters and functions of dosimetric models in some cases can act as settlement-specific, and in other cases they can stay constant in cutset of a raion or even Oblast. E.g., the parameter K_r that denotes relation of radionuclides in depositions on the ground in April 1986,

1986 р., в одних випадках вважається незмінним для всієї території України [4, 10], а в інших — окреслюється як функція відстані від ЧАЕС [11]. У першому випадку K_r відноситься до базового, найвищого рівня узагальнення, а в другому — залежить від характеристик НП.

Далі у тексті представлено основні положення методики реконструкції індивідуалізованих доз опромінення осіб, що мешкають на радіоактивно забруднених територіях України, яка використовує всі описані вище рівні індивідуалізації доз. Методика базується на результатах радіоекологічного (грунт, продукти харчування) та дозиметричного моніторингу (ЛВЛ-вимірювання), які мали місце у 1986–2013 рр. на території північних областей України в рамках програми Загальнодозиметричної паспортизації [1, 12] і зараз зберігаються у базі даних Центрального еколого-дозиметричного реєстру лабораторії радіологічного захисту ННЦРМ.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Розробка методики реконструкції індивідуалізованих доз опромінення населення, яке мешкає на радіоактивно забруднених внаслідок Чорнобильської катастрофи територіях, та розрахунок доз опромінення для жителів окремих районів північної території України.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Основними шляхами опромінення людини, яка мешкає на радіоактивно забрудненій внаслідок Чорнобильської аварії території є: (а) зовнішнє гамма-опромінення від радіонуклідів у випадіннях на ґрунті та (б) внутрішнє опромінення від споживання радіоактивно забруднених продуктів харчування, у першу чергу, молока та овочів.

Реконструкція дози зовнішнього опромінення

Модель розрахунку середньорічної ефективної індивідуалізованої дози $D_{s,a}^{ext}(t)$ ($\text{Зв} \cdot \text{рік}^{-1}$) від зовнішнього гамма-опромінення у році t для представника професійно-вікової групи a , який мешкає в s -му НП, враховує такі величини:

- > $d^{ext}(t)$, $\text{Зв} \cdot \text{рік}^{-1} / \text{Бк} \cdot \text{м}^{-2}$ — ефективна доза зовнішнього опромінення референтної дорослої людини у t -му році від радіоактивних випадінь на ґрунті на одиницю щільності випадінь ^{137}Cs ;
- > σ_s , $\text{Бк} \cdot \text{м}^{-2}$ — щільність випадінь ^{137}Cs на ґрунті в НП, приведена на 26.04.86;
- > I_a^{ext} — поправочний коефіцієнт для реконструкції дози у випадку опромінення особи, яка належить до

in some cases is regarded constant all over the territory of Ukraine [4, 10], and in other is described as a function of distance from Chornobyl NPP [11]. In the first case K_r is attributed to the basic, higher level of generalization, and in the second case it depends on characteristics of settlement.

Below it is presented main statements of the methodology for reconstruction of individualized exposure doses for persons that reside at radioactively contaminated territories of Ukraine, that involves all levels of individualization of doses described above. The methodology is based on results of radio-ecological (ground, meal) and dosimetric monitoring (WBC measurements) held in 1986–2013 at the territory of northern Oblasts of Ukraine in frame of the program of Integrated Dosimetric Passportization [1, 12] and that are saved now in data base of Central Ecological and Dosimetric Register of the Laboratory of Radiological Protection of NRCRM.

OBJECTIVE

Development of methodology for reconstruction of individualized exposure doses of population that resides at radioactively contaminated after Chornobyl accident territories, and evaluation of exposure doses for residents of certain raions of northern territory of Ukraine.

MATERIALS AND METHODS

Mains means of exposure of a person residing at the territory radioactively contaminated after Chornobyl accident are as follows: (a) external gamma-exposure from radionuclides in depositions on the ground, and (b) internal exposure from consumption of radioactively contaminated meals, first of all, milk and vegetables.

Reconstruction of external exposure dose

A model for evaluation of average annual effective individualized dose $D_{s,a}^{ext}(t)$ ($\text{Sv} \cdot \text{year}^{-1}$) from external gamma-exposure in year t for representative of a professional-age group a that resides in s^{th} settlement takes account of the following quantities:

- > $d^{ext}(t)$, $\text{Sv} \cdot \text{year}^{-1}$ per $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2}$ is the effective dose of external exposure of a reference adult in t^{th} year from radioactive deposition on the ground per unit of deposition density of ^{137}Cs ;
- > σ_s , $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2}$ is the density of ^{137}Cs deposition on the ground in settlement given on 26.04.86;
- > I_a^{ext} is the correcting coefficient for the dose reconstruction in case of exposure of a person who

дитячої/підліткової вікової групи a порівняно з дозою дорослої людини;

➤ $F_{a,s}$ – фактор зниження дози опромінення за рахунок особливостей режиму поведінки особи професійно-вікової групи a .

У загальному формалізованому вигляді доза зовнішнього опромінення оцінюється за допомогою співвідношення:

$$D_{s,a}^{ext}(t) = d^{ext}(t) \cdot I_a^{ext} \cdot \sigma_s \cdot F_{s,a} \quad (1)$$

Ефективна доза $d^{ext}(t)$ розраховується від усіх гамма-опромінюючих радіонуклідів (r) Чорнобильського викиду для референтної дорослої людини при умові, що така особа протягом 1 року постійно перебуває на відкритій радіоактивно забрудненій місцевості (луки або газони) з щільністю випадіння ^{137}Cs 1 Бк·м⁻². Вираз для $d^{ext}(t)$ має вигляд:

$$d^{ext}(t) = \sum_r d_r^{ext}(t) = \sum_r E_r^{ext}(t) \cdot \int_{t_1}^{t_2} K_r \cdot e^{-\lambda_r^{ef} \cdot t} dt \quad (2)$$

де $E_r^{ext}(t)$ – дозовий коефіцієнт зовнішнього опромінення дорослої людини від радіонукліду r , який розподілений у ґрунті за експоненціальним законом з ефективною глибиною 0,5 г·см⁻² [13, 14], Зв·с⁻¹ на 1 Бк·м⁻²; K_r – приведенне на 26 квітня 1986 р. референтне відношення радіоактивності r -го радіонукліду до радіоактивності ^{137}Cs у випадіннях [4, 10, 11], б/р; λ_r^{ef} – стала ефективного напівочищення верхнього шару ґрунту від r -го радіонукліду, с⁻¹.

У табл. 1 наведено перелік радіонуклідів, гамма-випромінювачів Чорнобильського викиду, які впливають на величину дози зовнішнього опромінення, та їх радіологічні характеристики.

Деякі радіонукліди у табл. 1 при радіоактивному розпаді утворюють дочірні радіонукліди, які також мають вплив на величину накопиченої дози зовнішнього гамма-опромінення. Тому в моделі окремо розглядаються такі пари радіонуклідів як: $^{95}\text{Zr} + ^{95}\text{Nb}$, $^{132}\text{Te} + ^{132}\text{I}$, $^{140}\text{Ba} + ^{140}\text{La}$, $^{144}\text{Ce} + ^{144}\text{Pr}$. У ланцюжку $^{137}\text{Cs} + ^{137m}\text{Ba}$ враховується лише вклад ^{137m}Ba , оскільки ^{137}Cs не є гамма-випромінювачем. При розрахунку дози зовнішнього опромінення для радіонуклідів ^{95}Nb , ^{132}I , ^{140}La та ^{144}Pr , які є дочірніми у зазначених вище ланцюжках, враховується їх власна початкова активність у випадіннях, а також активність за рахунок розпаду їх материнських радіонуклідів – ^{95}Zr , ^{132}Te , ^{140}Ba , ^{144}Ce , відповідно. Зважаючи на це, для ^{95}Nb , ^{132}I , ^{140}La та ^{144}Pr доданки $d_r^{ext}(t)$ під знаком суми у виразі (2) набувають такого вигляду:

$$d_r^{ext}(t) = E_r^{ext}(t) \cdot \int_{t_1}^{t_2} \left(K_m \cdot \frac{\lambda_r^{ef}}{\lambda_r^{ef} - \lambda_m^{ef}} (e^{-\lambda_m^{ef} \cdot t} - e^{-\lambda_r^{ef} \cdot t}) + K_r \cdot e^{-\lambda_r^{ef} \cdot t} \right) dt \quad (3)$$

де індекс m позначає параметри відповідного материнського радіонукліду.

belongs to children/adolescent age group a compared with a dose of adult;

➤ $F_{a,s}$ is the factor of decreasing of exposure dose due to peculiarities of behavioural regime of a person from professional-age group a .

In general formalized form external exposure dose is estimated as

Effective dose $d^{ext}(t)$ is evaluated from all gamma radiating radionuclides (r) of Chernobyl deposition for a reference adult, provided such person during 1 year was permanently staying at an open radioactively contaminated area (meadows or lawns) with density of ^{137}Cs deposition 1 Bq·m⁻². Expression for $d^{ext}(t)$ has a form

where $E_r^{ext}(t)$ is coefficient of external exposure of adult from radionuclide r that is distributed in the ground by exponential law with effective depth 0.5 g·cm⁻² [13, 14], Sv·с⁻¹ per 1 Bq·m⁻²; K_r is given on 26 April 1986 reference ratio of radioactivity of r^{th} radionuclide to the one of ^{137}Cs in deposition [4, 10, 11], dimensionless; λ_r^{ef} is the constant of effective half-time of removal of radionuclide r^{th} from upper lay of ground, с⁻¹.

Table 1 contains a list of radionuclides, gamma-sources of Chernobyl deposition that effect on the value of external exposure dose, and their radiological characteristics.

Some radionuclides in Table 1 during the radioactive decay form daughter radionuclides that modify an accumulated dose of external γ -exposure. Hence in the model the following pairs of radionuclides are considered separately: $^{95}\text{Zr} + ^{95}\text{Nb}$, $^{132}\text{Te} + ^{132}\text{I}$, $^{140}\text{Ba} + ^{140}\text{La}$, $^{144}\text{Ce} + ^{144}\text{Pr}$. In the chain $^{137}\text{Cs} + ^{137m}\text{Ba}$ the effect of ^{137m}Ba is taken into account only, because ^{137}Cs is not a γ -source. In evaluation of external dose from ^{95}Nb , ^{132}I , ^{140}La and ^{144}Pr radionuclides, that are daughter ones in abovementioned chains, their own initial activity in depositions, and also the activity due to decay of their mother radionuclides ^{95}Zr , ^{132}Te , ^{140}Ba , ^{144}Ce taken into account, respectively. Due to that, for ^{95}Nb , ^{132}I , ^{140}La and ^{144}Pr summands $d_r^{ext}(t)$ under the summation sign in expression (2) take a form

where index m denotes parameters of corresponding mother radionuclide.

Таблиця 1

Основні гамма-випромінювачі чорнобильських випадів та їх характеристики

Table 1

Main gamma-sources of Chernobyl depositions and their characteristics

| Радіонуклід r | Період напіврозпаду $T_r^{1/2}$ (доба) | Стала радіоактивного розпаду λ_r (доба ⁻¹) | Дозовий коефіцієнт $E_r^{ext}(t)$ (пЗв·с ⁻¹ на кБк·м ⁻²) | «Референтне» відношення активності r -го радіонукліда до активності ¹³⁷ Cs у випадіннях K_r | |
|------------------|--|---|---|--|------|
| Radionuclide r | Radioactive half-life $T_r^{1/2}$ (year) | Constant of radioactive decay λ_r (year ⁻¹) | Dose coefficient $E_r^{ext}(t)$ (pSv·s ⁻¹ per kBq·m ⁻²) | «Reference» ratio of the r^{th} radionuclide to activity of ¹³⁷ Cs in the ground depositions, K_r | |
| 1 | ⁹⁵ Zr | 64 | 0,011 | 0,50 | 2 |
| 2 | ⁹⁵ Nb | 35,2 | 0,020 | 0,52 | 1 |
| 3 | ⁹⁹ Mo | 2,75 | 0,252 | 0,10 | 10 |
| 4 | ¹⁰³ Ru | 39,3 | 0,018 | 0,34 | 8 |
| 5 | ¹⁰⁶ Ru | 368 | 0,002 | 0,14 | 2 |
| 6 | ¹²⁵ Sb | 1011 | 0,001 | 0,29 | 0,07 |
| 7 | ¹³¹ I | 8,04 | 0,086 | 0,26 | 13 |
| 8 | ¹³² Te | 3,26 | 0,213 | 0,14 | 20 |
| 9 | ¹³² I | 0,10 | 7,220 | 1,52 | 20 |
| 10 | ¹³⁴ Cs | 752 | 0,001 | 1,05 | 0,5 |
| 11 | ¹³⁶ Cs | 13,1 | 0,053 | 1,42 | 0,4 |
| 12 | ¹³⁷ Cs | 11023 | 0,0001 | 0,41 | 1 |
| 13 | ¹⁴⁰ Ba | 12,7 | 0,055 | 0,22 | 2 |
| 14 | ¹⁴⁰ La | 1,68 | 0,413 | 1,5 | 2 |
| 15 | ¹⁴¹ Ce | 32,5 | 0,021 | 0,046 | 3 |
| 16 | ¹⁴⁴ Ce | 284 | 0,002 | 0,011 | 1,5 |
| 17 | ¹⁴⁴ Pr | 0,012 | 57,75 | 0,018 | 1,5 |
| 18 | ²³⁹ Np | 2,36 | 0,294 | 0,17 | 20 |

Оскільки процес самоочищення верхнього шару ґрунтів відбувається в основному за рахунок природного розпаду та вертикальної міграції радіонуклідів вглиб ґрунтового профілю, стала ефективного напівочищення верхнього шару ґрунту λ_r^{ef} може бути виражена як:

$$\lambda_r^{ef} = \lambda_r + \lambda_r^{ecol} \quad (4)$$

де λ_r – стала радіоактивного напіврозпаду r -го радіонукліда; λ_r^{ecol} – стала екологічного напівочищення верхнього (5–10 см) шару ґрунту за рахунок вертикальної міграції r -го радіонукліда. У моделі, яка розглядається, величина λ_r^{ecol} враховується лише для довгоіснуючих радіоізотопів ¹³⁷Cs. Для інших радіонуклідів, наведених у табл. 1, вважається, що внаслідок короткого періоду радіоактивного напіврозпаду, або незначної кількості у випадіннях як, наприклад, у випадку ¹²⁵Sb, процеси екологічного очищення ґрунту несуттєво впливають на величину дози, і тому для них можна вважати, що $\lambda_r^{ef} \approx \lambda_r$.

Оцінки свідчать про невисоку інтенсивність та практичну незмінність з часом швидкості міграції ¹³⁷Cs у профілях ґрунту. При цьому більш інтенсивно міграція відбувається у перші роки після аварії і

Since the process of weathering cleaning of upper lay of grounds goes mainly due to radioactive decay and vertical migration of radionuclides deep into the ground profile, the constant of effective half-time of removal of upper lay of ground λ_r^{ef} can be expressed as

where λ_r is the constant of radioactive decay of r^{th} radionuclide; λ_r^{ecol} is the of weathering half-time of removal of r^{th} radionuclide from upper (5–10 cm) lay of ground due to vertical migration. In the considered model, the value λ_r^{ecol} is taken into account only for long-existing radioisotopes ¹³⁷Cs. For other radionuclides presented in Table 1, it is assumed that due to short period of radioactive decay or negligible amount in depositions as, e.g., in case of ¹²⁵Sb, processes of ecological cleaning of the ground insignificantly effect the dose value, and therefore, for them one can assume that $\lambda_r^{ef} \approx \lambda_r$.

Estimates witness about quite low intensity and practical immutability in time of velocity of ¹³⁷Cs migration in ground profiles. At that more intensively the migration takes place in first years

в умовах підвищеного зволоження. Зважаючи на це, ефективний період напівочищення верхнього (5–10 см) шару ґрунту для ^{137}Cs приймається рівним 25,42 року, а відповідна йому величина $\lambda_{\text{Cs7}}^{\text{ef}} = 7,5 \cdot 10^{-5} \text{ рік}^{-1}$ [15–17].

У табл. 2 наведені числові значення ефективної дози $d^{\text{ext}}(t)$ для референтної дорослої людини на одиницю активності ^{137}Cs від радіоактивних випадінь на ґрунті.

after the accident and under increased damping. Due to that, effective half-time of removal of cesium from upper (5–10 cm) lay of ground is 25.42 years, and its corresponding value is $\lambda_{\text{Cs7}}^{\text{ef}} = 7.5 \cdot 10^{-5} \text{ year}^{-1}$ [15–17].

Table 2 presents numerical values of effective dose $d^{\text{ext}}(t)$ for reference adult per unit of ^{137}Cs activity from radioactive depositions on the ground.

Таблиця 2

Часова динаміка ефективної дози опромінення референтної дорослої людини від ^{137}Cs на одиницю активності випадінь на ґрунті

Table 2

Time dynamics of annual effective doses of a reference adult from ^{137}Cs per unit of activity from depositions on the ground

| Рік Year | $d^{\text{ext}}(t)$, мкЗв·рік ⁻¹ на кБк·м ⁻² $d^{\text{ext}}(t)$ (μSv·year ⁻¹ per kBq·m ⁻²) | Рік Year | $d^{\text{ext}}(t)$, мкЗв·рік ⁻¹ на кБк·м ⁻² $d^{\text{ext}}(t)$ (μSv·year ⁻¹ per kBq·m ⁻²) |
|-------------------|--|-------------|--|
| 1986 ¹ | 81,0 | 2002 | 8,4 |
| 1987 | 30,2 | 2003 | 8,2 |
| 1988 | 22,7 | 2004 | 7,9 |
| 1989 | 18,9 | 2005 | 7,7 |
| 1990 | 16,4 | 2006 | 7,5 |
| 1991 | 14,6 | 2007 | 7,3 |
| 1992 | 13,3 | 2008 | 7,1 |
| 1993 | 12,3 | 2009 | 6,9 |
| 1994 | 11,5 | 2010 | 6,7 |
| 1995 | 10,9 | 2011 | 6,5 |
| 1996 | 10,4 | 2012 | 6,3 |
| 1997 | 10,0 | 2013 | 6,2 |
| 1998 | 9,6 | 2014 | 6,0 |
| 1999 | 9,2 | 2015 | 5,8 |
| 2000 | 8,9 | 2016 | 5,7 |
| 2001 | 8,7 | 2017 | 5,5 |

Примітка. ¹Враховується інтервал часу з 26.04.86 до 31.12.86.
Note. ¹During time period from 26.04.86 to 31.12.86.

Поправочний коефіцієнт I_a^{ext} є відношенням дозових коефіцієнтів зовнішнього опромінення від радіонукліду r представника дитячої/підліткової вікової групи a та дорослої людини. Він оцінюється для п'яти вікових груп [10, 18–20]: ≤ 2 , 3–7, 8–12, 13–17 та ≥ 18 років (табл. 3).

Correcting coefficient I_a^{ext} is a ratio of dose coefficients of external exposure from radionuclide of r^{th} representative of children/adolescent age group a and of adult. It is estimated for five age groups [10, 18–20]: ≤ 2 , 3–7, 8–12, 13–17 and ≥ 18 years (Table 3).

Таблиця 3

Значення залежних від віку поправочних коефіцієнтів для оцінки дози представника дитячої/підліткової вікової групи порівняно з дорослою людиною

Table 3

Values of age-dependent correcting coefficients for the dose estimation of a representative of children/adolescent age group compared with adult

| Вікова група (роки) / age group (years) | ≤ 2 | 3–7 | 8–12 | 13–17 | ≥ 18 |
|---|----------|------|------|-------|-----------|
| I_a^{ext} | 1,30 | 1,06 | 1,06 | 1 | 1 |

Фактор зниження дози опромінення за рахунок особливостей режиму поведінки особи професійно-вікової групи $F_{a,s}$ («коефіцієнт режиму поведінки») визначається періодом часу, який особа у середньому протягом року проводить на відкритій місцевості та всередині будівлі (закрите приміщення), а також залежить від захисних властивостей самої будівлі, у якій знаходиться особа на території s -го НП [10, 18–20]. Величина $F_{a,s}$ розраховується за формулою:

$$F_{a,s} = \sum_i l_{a,s}^i \cdot b_{a,s}^i \quad (5)$$

де $l_{a,s}^i$ – фактор «локації», тобто відношення величини дози зовнішнього опромінення, яку отримує особа вікової групи a у приміщенні i -го типу порівняно з такою ж дозою на відкритій місцевості;

$b_{a,s}^i$ – фактор «зайнятості», тобто доля часу, який проводить особа вікової групи a у локації i -го типу.

Основними локаціями для мешканців радіоактивно забруднених територій України вважаються: дерев'яні та цегляні будівлі (одноповерхові та багатоповерхові), відкрита місцевість в межах та за межами НП. Величини $l_{a,s}^i$ та $b_{a,s}^i$ відрізняються для сільських та міських НП, а також залежать від періоду часу, що пройшов після аварії, оскільки в перші післяаварійні роки мало місце самообмежування населенням перебування на відкритій місцевості. Тип НП в моделі вважається міським, якщо особа проживає у місті. Якщо вона мешкає у селищі міського типу, або в селі, тип НП вважається сільським. Припускається, що у НП сільського типу жителі мешкають у дерев'яних будинках, а робітники, які працюють всередині приміщен-

Factor of decreasing of exposure dose due to peculiarities of behavioural regime of a person from professional-age group $F_{a,s}$ («behavioral regime coefficient») is determined by period of time that a person in mean during a year is staying at open air and inside a building (closed room), also it depends on protecting properties of a building itself where a person is situated at the territory of s^{th} settlement [10, 18–20]. The value $F_{a,s}$ is evaluated as

where $l_{a,s}^i$ is location factor, i.e., the ratio of value of external exposure dose, that is obtained by a person of age group a in the building of type i compared with the same dose in the open air; $b_{a,s}^i$ is factor of «business», i.e., portion of time that a person of age group a is spending at location of i^{th} type.

Main locations for residents of radioactively contaminated territories of Ukraine are: wooden and brick buildings (one-storeyed and two-storeyed), open air inside and outside settlement. Quantities $l_{a,s}^i$ and $b_{a,s}^i$ differ for rural and urban settlement, and also they depend on the period of time after the accident, because during the first years after the accident it took place self-restriction of population from staying in the open air. A type of settlement is regarded urban if a person resides in a city or town. Otherwise a type of settlement is regarded rural. It is assumed that in settlement of rural type, inhabitants reside in wooden houses, and workers that work inside a building

Таблиця 4

Коефіцієнти режиму поведінки $F_{a,s}$ для різних професійно-вікових груп населення радіоактивно забруднених територій України [20, 21]

Table 4

Coefficients of behavioural regime $F_{a,s}$ professional-age groups of population from radioactively contaminated territories of Ukraine [20, 21]

| Професійна група / professional group | Коефіцієнт поведінки / behaviour coefficient $F_{a,s}$ | |
|--|--|---------------|
| | село / rural | місто / urban |
| Службовець або робітник / employee or worker | 0,26 | 0,14 |
| Сільгоспробітник / agricultural worker | 0,40 | 0,23 |
| Пенсіонер або домогосподарка / retired or housewife | 0,26 | 0,14 |
| Дитина або підліток у віці ¹ / child or adolescent at the age of ¹ | < 1 року / year | 0,14 (0,16) |
| | 1–2 роки / years | 0,15 (0,18) |
| | 3–7 років / years | 0,17 (0,21) |
| | 8–17 років / years | 0,21 (0,23) |

Примітка. ¹Для осіб < 18 років розглядаються два часові періоди: 1986–1987 рр. та 1988–2018 рр. Величина $F_{a,s}$ для другого періоду наведена у дужках.
Note. ¹For persons < 18 years two time period: 1986–1987 and 1988–2018 are considered. Values $F_{a,s}$ for the second time period are in the brackets.

ня працюють у цегляних будинках. У міських населених пунктах мешканці проживають і працюють у цегляних будинках. Основною професійною групою для сільських НП вважається – сільгоспоробітник, що працює на відкритій місцевості, для міських – службовець або робітник, який працює у приміщенні.

У табл. 4 наведено прийнятий у моделі перелік професійно-вікових груп та відповідних їм референтних значень коефіцієнтів режиму поведінки $F_{a,s}$.

Реконструкція дози внутрішнього опромінення

Величина середньорічної ефективної дози внутрішнього опромінення $D_{s,a}^{int}(t)$ ($\text{Зв} \cdot \text{рік}^{-1}$) обумовлена споживанням радіоактивно забруднених продуктів харчування представником професійно-вікової групи a , який мешкає в s -му НП у році t . Основними параметрами моделі розрахунку дози $D_{s,a}^{int}(t)$ є величини:

- > d_r^{int} , $\text{Зв} \cdot \text{Бк}^{-1}$ – ефективна доза внутрішнього опромінення референтної дорослої людини на одиницю перорального надходження радіонукліду r ;
- > $Q_r(t)$, $\text{Бк} \cdot \text{доба}^{-1}$ – функція референтного надходження радіонукліду r у організм дорослої людини з раціоном;
- > σ_s , $\text{Бк} \cdot \text{м}^{-2}$ – щільність випадень ^{137}Cs на ґрунті в НП, приведена на 26.04.86;
- > $I_{a,r}^{int}$ – поправочний коефіцієнт для реконструкції дози у випадку внутрішнього опромінення особи, яка належить до дитячої/підліткової вікової групи a порівняно з дозою дорослої людини для радіонукліду r .

У загальному вигляді вираз для розрахунку індивідуалізованої дози внутрішнього опромінення $D_{s,a}^{int}(t)$, може бути представлений сумою доз від радіонуклідів (r):

$$D_{s,a}^{int}(t) = \sigma_s \sum_r I_{a,r}^{int} \cdot I_a^{86} \cdot D_r^{int}(t) = \sum_r I_{a,r}^{int} \cdot d_r^{int} \cdot I_a^{86} \cdot Q_r(t) \quad (6)$$

де I_a^{86} – поправочний коефіцієнт, що враховує особливості споживання молока та листової зелені у 1986 р. дитиною або підлітком віку a порівняно із дорослими, $D_r^{int}(t)$ представлено у табл. 5.

Спосіб реконструкції величин d_r^{int} та $Q_r(t)$ залежить від періоду часу, який пройшов після аварії, композиції дозоутворюючих радіонуклідів та способу надходження їх в організм людини: листовий чи кореневий. Залежно від цього необхідно окремо розглянути випадки внутрішнього опромінення у 1986 р. та опромінення у період 1987–2017 рр.

У 1986 році функція $d_r^{int}(t)$ розраховується за формулою:

$$d_r^{int,86} = E_r^{int} \cdot K_r \quad (7)$$

actually work in brick houses. In urban settlements, residents live and work in brick houses. A main group in rural settlement comprises agricultural workers that work in the open air, for urban ones it comprises employees and workers that work in berth.

Table 4 contains the accepted in the model list of professional-age groups and corresponding reference values of behavioural regime coefficients $F_{a,s}$.

Reconstruction of internal exposure dose

Value of average annual effective dose of internal exposure $D_{s,a}^{int}(t)$ ($\text{Sv} \cdot \text{year}^{-1}$) is subjected by consumption of radioactively contaminated meal by a representative of professional-age group a which resides in s^{th} settlement in year t . Main model parameters for evaluation of the dose $D_{s,a}^{int}(t)$ are the following quantities:

- > d_r^{int} , $\text{Sv} \cdot \text{Bq}^{-1}$, is the effective internal exposure dose of a reference adult per unit of peroral intake of radionuclide r ;
- > $Q_r(t)$, $\text{Bq} \cdot \text{day}^{-1}$ is the function of reference intake of radionuclide r in organism of adult;
- > σ_s , $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2}$ is the density of ^{137}Cs ground deposition on in settlement given on 26.04.86;
- > $I_{a,r}^{int}$ is the correction coefficient for reconstruction of the dose in case of internal exposure of a person belonging to children/adolescent age group a compared with the dose of adult for radionuclide r .

In general form the expression for evaluation of individualized dose of internal exposure $D_{s,a}^{int}(t)$ can be represented as a sum of doses from radionuclides (r):

where I_a^{86} is the correcting coefficient that takes into account of peculiarities of consumption of milk and leaf greens in 1986 by a child or adolescent of age a compared to an adult, $D_r^{int}(t)$ is presented in Table 5.

A way of reconstruction of quantities d_r^{int} and $Q_r(t)$ depends of the period of time after the accident, of composition of dose creating radionuclides and of the way of their intake to human organism: leaf or root. Depending of that, it is necessary to consider separately the cases of internal exposure in 1986 and exposure in the period 1987–2017.

For year 1986, the function $d_r^{int}(t)$ is evaluated as

де E_r^{int} – дозовий коефіцієнт внутрішнього опромінення від радіонукліду r для дорослих на одиницю перорального надходження, Зв·Бк⁻¹ надходження; K_r – приведене на 26 квітня 1986 р. відношення радіоактивності r -го радіонукліду до радіоактивності ¹³⁷Cs у випадіннях, б/р.

Функція $Q_r^{86}(t)$ оцінюється так [21]:

$$Q_r^{86}(t) = \sigma_s \int_0^t (c_{r,86}^{mil}(t) \cdot w^{mil} + c_{r,86}^{veg}(t) \cdot w^{veg}) dt \quad (8)$$

де $c_{r,86}^{mil}(t)$ та $c_{r,86}^{veg}(t)$ – референтні функції часової динаміки концентрації r -го радіонукліду, відповідно у коров'ячому молоці та у листових овочах на одиницю випадінь ¹³⁷Cs на ґрунті, Бк·л⁻¹(кг⁻¹) / кБк·м⁻²; w^{mil} та w^{veg} – добове споживання коров'ячого молока та листових овочів місцевого виробництва, відповідно, референтною дорослою людиною, л(кг) · доба⁻¹.

Дози внутрішнього опромінення у 1986 р. оцінювались для 14 основних радіонуклідів аварійного походження. У табл. 5 представлено перелік радіонуклідів Чорнобильського викиду, які були включені до розрахунку дози внутрішнього опромінення у 1986 р. та їх характеристики.

where E_r^{int} is the dose coefficient of internal exposure from radionuclide r for adults per unit of peroral intake, Sv·Bq⁻¹ of intake;

K_r is given on 26 April 1986 the ratio of radioactivity of r^{th} radionuclide to ¹³⁷Cs radioactivity in depositions, dimensionless.

The function $Q_r^{86}(t)$ is evaluated as follows [21]:

where $c_{r,86}^{mil}(t)$ and $c_{r,86}^{veg}(t)$ are reference functions for time dynamics of concentration of r^{th} radionuclide, respectively, in cow milk and leaf vegetables per unit of ¹³⁷Cs deposition on the ground, Bq·l⁻¹(kg⁻¹) / kBq·m⁻²; w^{mil} and w^{veg} are daily consumptions of cow milk and leaf vegetables of local production, respectively, by a reference adult, l(kg) · day⁻¹.

In 1986 internal exposure doses were estimated for 14 main radionuclides of accidental origination. Table 5 presents a list of radionuclides of Chernobyl deposition that were included in evaluation of internal exposure dose in 1986, and their characteristics.

Таблиця 5

Характеристики радіонуклідів Чорнобильських випадінь та їх вклад у дозу внутрішнього опромінення у 1986 р.

Table 5

Characteristics of radionuclides of Chernobyl depositions and their effect on internal exposure dose in 1986

| Радіонуклід <i>r</i> | Період радіоактивного напіврозпаду [22], доба | Дозовий коефіцієнт на одиницю перорального надходження для дорослих E_r^{int} [22], Зв/Бк | Референтна ефективна доза внутрішнього опромінення для дорослих у 1986 р. [19, 21] Reference effective dose of internal exposure for adult in 1986 [19, 21] | |
|--------------------------------|--|---|--|---|
| | | | $D_r^{int}(t)$ мкЗв на 1 кБк·м ⁻² ¹³⁷ Cs на ґрунті μSv per 1 kBq·m ⁻² ¹³⁷ Cs in the ground deposition | вклад у загальну дозу, % contribution in the total dose, % |
| Radionuclide <i>r</i> | Radioactive half-life [22], year | Dose coefficient for adult per unit of peroral intake E_r^{int} [22], Sv/Bq | | |
| ⁸⁹ Sr | 51 | 2,6E-09 | 0,16 | 0,25 |
| ⁹⁰ Sr | 10636 | 2,8E-08 | 0,48 | 0,76 |
| ⁹⁵ Nb | 35,2 | 5,8E-10 | 0,021 | 0,03 |
| ⁹⁵ Zr | 64 | 9,5E-10 | 0,042 | 0,07 |
| ¹⁰³ Ru | 39,3 | 7,3E-10 | 0,11 | 0,17 |
| ¹⁰⁶ Ru | 368 | 7,0E-09 | 0,39 | 0,62 |
| ¹²⁵ Sb | 1011 | 1,1E-09 | 0,41 | 0,65 |
| ¹³⁴ Cs | 752 | 1,9E-08 | 7,1 | 11,3 |
| ¹³⁷ Cs | 11023 | 1,3E-08 | 10 | 15,9 |
| ¹³⁶ Cs | 13,1 | 3,0E-09 | 0,1 | 0,16 |
| ¹³¹ I | 8,04 | 2,2E-08 | 43,3 | 68,7 |
| ¹⁴¹ Ce | 32,5 | 7,1E-10 | 0,038 | 0,06 |
| ¹⁴⁴ Ce ¹ | 284 | 5,3E-09 | 0,21 | 0,33 |
| ¹⁴⁰ Ba ¹ | 12,7 | 4,5E-09 | 0,1 | 0,16 |
| Усі / all | | | 63 | 100 |

Примітка. ¹Разом з дочірніми ¹⁴⁰Ba+¹⁴⁰La, ¹⁴⁴Ce+¹⁴⁴Pr, ¹³⁷Cs+^{137m}Ba.
Note. ¹Together with daughter radioisotope: ¹⁴⁰Ba+¹⁴⁰La, ¹⁴⁴Ce+¹⁴⁴Pr, ¹³⁷Cs+^{137m}Ba.

Сумарна річна ефективна доза внутрішнього опромінення усього тіла для дорослих на одиницю випадень ^{137}Cs в НП від усіх зазначених радіонуклідів (без урахування внеску ^{131}I) складає 19,7 мкЗв на 1 кБк·м⁻² ^{137}Cs на ґрунті і приблизно на 90 % обумовлювалась радіонуклідами ^{137}Cs та ^{134}Cs [19, 21]. З урахуванням даних табл. 5, рівняння (6) можна переписати як:

$$D_{s,a}^{int,86}(t) = \sigma_s \cdot I_a^{86} \cdot (D_{Cs4}^{int}(t) \cdot I_{a,Cs4}^{int} + D_{Cs7}^{int}(t) \cdot I_{a,Cs7}^{int} + D_{other}^{int}(t)) \quad (9)$$

$$D_{s,a}^{int,86}(t) = \sigma_s \cdot I_a^{86} \cdot (7,1 \cdot I_{a,Cs4}^{int} + 10 \cdot I_{a,Cs7}^{int} + 2,6) \quad (10)$$

Величини поправочних коефіцієнтів $I_{a,Cs4}^{int}$ та $I_{a,Cs7}^{int}$ для реконструкції дози у випадку внутрішнього опромінення представника дитячої/підліткової вікової групи а порівняно з дозою дорослої людини для радіонуклідів ^{134}Cs та ^{137}Cs відповідно, а також величину представлено у табл. 6 [21, 22].

Total annual effective internal exposure dose of the whole body for adults per unit of ^{137}Cs deposition in settlement from all abovementioned radionuclides (without consideration of effect of ^{131}I) constitutes 19,7 μSv per kBq·m⁻² of ^{137}Cs on the ground and it was approximately at 90% due to radionuclides ^{137}Cs and ^{134}Cs [19, 21]. Using data from Table 5 equality (6) can be rewritten as

Values of correcting coefficients $I_{a,Cs4}^{int}$ and $I_{a,Cs7}^{int}$ for reconstruction of dose in case of internal exposure of a representative of children/adolescent age group a compared with the dose of adult for radionuclides ^{134}Cs and ^{137}Cs , respectively, and also the value of are presented in Table 6 [21, 22].

Таблиця 6

Поправочні коефіцієнти дози внутрішнього опромінення від ^{134}Cs та ^{137}Cs залежно від віку особи, яка опромінюється

Table 6

Correcting coefficients of internal exposure dose from ^{134}Cs and ^{137}Cs in dependence on the age of exposed person

| Коефіцієнт Coefficient | Вік особи, роки / age, years | | | | | |
|---------------------------|------------------------------|------|------|------|-------|------|
| | < 1 | 1–2 | 3–7 | 8–12 | 13–17 | ≥ 18 |
| $I_{a,Cs4}^{int}$ | 1,37 | 0,84 | 0,68 | 0,74 | 1,0 | 1,0 |
| $I_{a,Cs7}^{int}$ | 0,85 | 0,92 | 0,74 | 0,77 | 1,00 | 1,0 |
| I_a^{86} | 0,77 | 0,77 | 0,87 | 0,98 | 0,98 | 1,0 |

У період 1987–2017 рр. суттєвий вклад у дозу внутрішнього опромінення населення радіоактивно забруднених територій вносили лише радіоізотопи ^{137}Cs та ^{134}Cs , останній з яких впливав на формування дози лише у перші 5–7 післяаварійних років. На момент аварії співвідношення $^{134}\text{Cs} : ^{137}\text{Cs}$ складало 0,5, а у наступні роки воно зменшувалось завдяки більш швидкому розпаду ^{134}Cs . Тому вираз для оцінки ефективної дози внутрішнього опромінення $D_{s,a}^{int}(t)$ після 1986 р. можна записати у вигляді:

$$D_{s,a}^{int}(t) = I_a^{int} \cdot d_{Cs}^{int}(t) \cdot Q_{s,Cs7}(t) \quad (11)$$

Ефективна доза d_{Cs}^{int} внутрішнього опромінення референтної дорослої людини на одиницю перорального надходження радіонукліду r у рівнянні 11 розраховується наступним чином:

$$d_{Cs}^{int}(t) = E_{Cs7}^{int} \cdot (1 + 0,5 \cdot K_{Cs4}(t) \cdot K_a) \quad (12)$$

During the period of 1987–2017 essential contribution was made to internal exposure dose of population of radioactively contaminated territories only by radioisotopes ^{137}Cs and ^{134}Cs , the latter effected the formation of dose only during the first 5–7 years after the accident. At the moment of accident, the ratio ^{134}Cs to ^{137}Cs was 0.5, and in the next years it decreased due to quick radioactive decay of ^{134}Cs . Hence the expression for estimate of effective dose of internal exposure $D_{s,a}^{int}(t)$ after 1986 can be written as

Effective dose d_{Cs}^{int} of internal exposure of a reference adult per unit of peroral intake of radionuclide r in equation (11) is evaluated as

де $K_{Cs4}(t)$ – корегувальний фактор, що враховує радіоактивний розпад ^{134}Cs , а K_a – відношення дозових коефіцієнтів ^{134}Cs та ^{137}Cs залежно від віку особи з населення.

Функція референтного надходження радіонукліду r в організм дорослої людини у період після 1987–2017 рр. $Q_{s,Cs7}(t)$ реконструюється як НП-специфічна. НП-специфічний підхід спрямований на використання результатів еколого-дозиметричного моніторингу, що проводився у s -му НП. Абсолютний пріоритет при цьому надається результатам ЛВЛ-вимірювань. Для реконструкції $Q_{s,Cs7}(t)$ використано наступну послідовність розрахункових процедур.

Процедура 1. Якщо у t -й рік в s -му НП проводився ЛВЛ-моніторинг і кількість ЛВЛ-вимірювань у дорослих осіб перевищувала 10, то для цього НП за даними ЛВЛ-вимірювань розраховується середнє надходження ^{137}Cs для дорослих $\bar{q}_s(t)$ і, відповідно, референтне надходження радіоцезію в організм людини $Q_{s,Cs7}(t)$ визначається як:

$$Q_{s,Cs7}(t) = \bar{q}_s(t) \cdot \Delta t \quad (13)$$

$$\bar{q}_s(t) = \frac{1}{N_s} \cdot \sum_i U_{i,s}(t) \cdot \lambda_{Cs}^{int} \quad (14)$$

де $U_{i,s}(t)$ – вміст ^{137}Cs у організмі i -го дорослого мешканця s -го НП, виміряний у t -й рік, Бк;

λ_{Cs}^{int} – стала напіввиведення радіоцезію з організму дорослих, доба $^{-1}$;

N_s – кількість ЛВЛ-вимірювань, виконаних у s -му НП серед дорослих у t -й рік;

$\Delta t = 365$ діб.

Процедура 2. Якщо у даному s -му НП у t -й рік ЛВЛ-моніторинг не проводився, але в цьому НП принаймні у 7 окремих роках впродовж періоду 1986–2017 рр. виконувалися ЛВЛ-вимірювання дорослих жителів (не менше 3 вимірювань в один рік), то для цього НП за результатами наявних ЛВЛ-вимірювань встановлюється НП-специфічна функція надходження ^{137}Cs з раціоном для дорослих $\tilde{q}_s(t)$, а рівняння (13)–(14) набувають вигляду:

$$Q_{s,Cs7}(t) = \tilde{q}_s(t) \cdot \Delta t \quad (15)$$

$$\tilde{q}_s(t) = a_s^q \cdot \exp(-I_s^q \cdot t) \quad (16)$$

де a_s^q (Бк/доба) та I_s^q (рік $^{-1}$) – параметри, що оцінюються шляхом апроксимації річних надходжень ^{137}Cs з раціоном у дорослих мешканців s -го НП.

where $K_{Cs4}(t)$ is correcting factor that takes account of radioactive decay of ^{134}Cs , and K_a is ratio of dose coefficients ^{134}Cs and ^{137}Cs in dependence on the age of a person.

The function $Q_{s,Cs7}(t)$ of reference intake of radionuclide r to organism of adult during the period after 1987–2017 is reconstructed as settlement-specific. The settlement-specific approach is aimed for usage of the results of ecological and dosimetric monitoring held in sth settlement. At that absolute priority is given to results of WBC measurements. For reconstruction of $Q_{s,Cs7}(t)$ sequence of evaluation procedures is used.

Procedure 1. If in t^{th} year in s^{th} settlement the WBC monitoring was held and the number of WBC measurements of adults exceeded 10, then for this settlement by data of WBC measurements it is evaluated mean intake $\bar{q}_s(t)$ of ^{137}Cs for adults and, respectively, the reference intake of radio-cesium to human organism $Q_{s,Cs7}(t)$ is found as

where $U_{i,s}(t)$ is contents of ^{137}Cs in organism of i^{th} adult resident of s^{th} settlement measured in t^{th} year, Bq;

λ_{Cs}^{int} is constant of effective half-time of cesium excretion from the body of adults, day $^{-1}$;

N_s is number of WBC measurements made in s^{th} settlement among adults in t^{th} year;

$\Delta t = 365$ days.

Procedure 2. If in a given s^{th} settlement in t^{th} WBC monitoring was not held, but in this settlement at least during 7 separate years in the period of 1986–2017 WBC measurements of adult residents were made (not less than 3 measurements per year), then for this settlement by the results of available WBC measurements it is established the settlement-specific function $\tilde{q}_s(t)$ of ^{137}Cs intake with diet for adults, and equations (13)–(14) take a form

where a_s^q (Bq·day $^{-1}$) and I_s^q (year $^{-1}$) are parameters that are estimated by approximation of annual ^{137}Cs intakes with diet for adult residents of s^{th} settlement.

На рисунку 2 візуалізовані середньорічні значення $\bar{q}_s(t)$ та функція $\tilde{q}_s(t)$ для двох НП північного регіону України.

Figure 2 visualizes mean annual values $\bar{q}_s(t)$ and the function $\tilde{q}_s(t)$ for two settlements of northern raion of Ukraine.

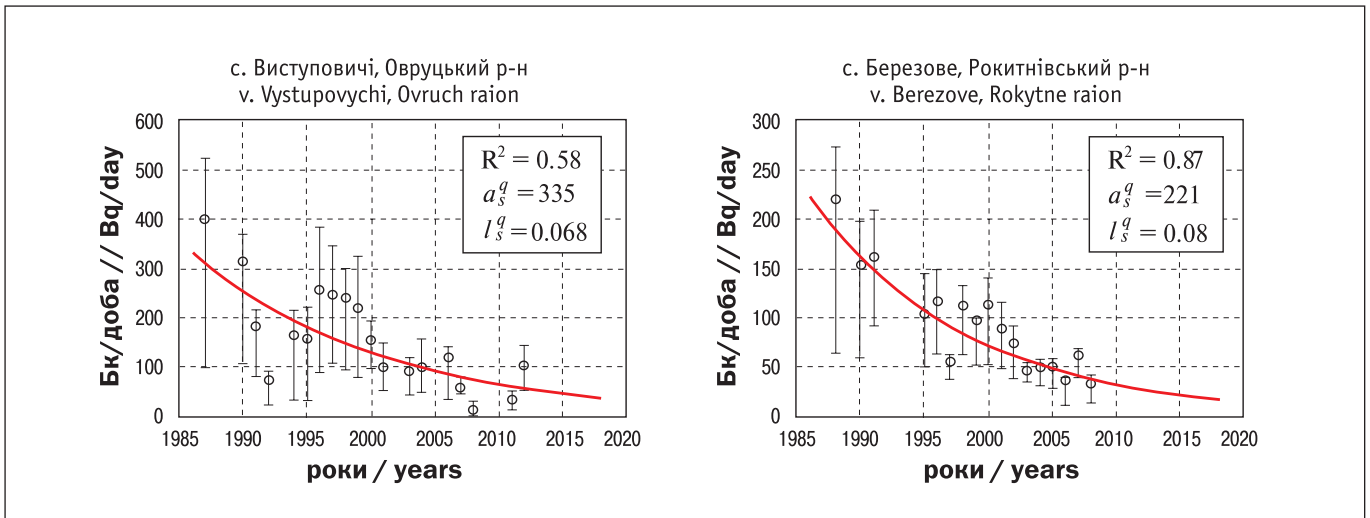


Рисунок 2. Приклади емпіричних середньорічних значень $\bar{q}_s(t)$ надходження ^{137}Cs з раціоном (o) та встановлених модельних (суцільна крива) НП специфічних функцій надходження $\tilde{q}_s(t)$ для дорослих
Figure 2. Examples of empirical mean annual values $\bar{q}_s(t)$ of ^{137}Cs intake with diet (o) and of established modelling (solid line) settlement-specific functions $\tilde{q}_s(t)$ of intake for adults

Додатковою умовою при встановленні НП-специфічної функції $\tilde{q}_s(t)$ є вимога наявності ЛВЛ-вимірювань у s -му НП хоча б у один рік до 1992 р. Функція $\tilde{q}_s(t)$ використовується лише для НП, де процедура оцінки параметрів цієї функції характеризується значенням коефіцієнту детермінації¹⁾ $R^2 > 0,2$.

While establishing of settlement-specific function $\tilde{q}_s(t)$, additional condition is condition of availability of WBC measurements in s^{th} settlement at least in a single year before 1992. The function $\tilde{q}_s(t)$ is used only for settlements, where the procedure of estimation the parameters of this function is characterized by the value of determination coefficient¹⁾ $R^2 > 0.2$.

Процедура 3. Якщо у s -му НП ЛВЛ-моніторинг проводився менше, ніж 7 разів впродовж післяаварійного періоду, або встановлена функція $\tilde{q}_s(t)$ погано апроксимує дані ЛВЛ-моніторингу ($R^2 < 0,2$), то для цього НП використовуються результати «молочного» моніторингу і встановлюється НП-специфічна «молочна» функція часової динаміки концентрації ^{137}Cs у коров'ячому молоці $\tilde{c}_s^{\text{mil}}(t)$. У цьому випадку референтне надходження радіоцезію у організм людини розраховується за співвідношенням:

Procedure 3. If in s^{th} settlement WBC monitoring was held less than 7 times along the period after the accident or the established function $\tilde{q}_s(t)$ poorly approximates the data of WBC monitoring ($R^2 < 0.2$), then for this settlement the results of *milk* monitoring are used and it is established the settlement-specific *milk* function $\tilde{c}_s^{\text{mil}}(t)$ of time dynamics of ^{137}Cs concentration in cow milk. In this case, reference intake of radio-cesium to human organism is evaluated as

$$Q_{s, \text{Cs}7}(t) = \tilde{c}_s^{\text{mil}}(t) \cdot ARME(t) \cdot \Delta t \quad (17)$$

де $ARME(t)$ – абсолютний район-специфічний молочний еквівалент раціону для дорослих, л/доба.

where $ARME(t)$ is absolute raion-specific milk equivalent of diet for adults, l/day. In approxima-

¹⁾ **Коефіцієнт детермінації (R^2)** – статистичний показник, який використовується в статистичних моделях як міра залежності варіації залежної змінної від варіації незалежних змінних. Показує, наскільки наявні спостереження підтверджують модель.

¹⁾ **Determination coefficient (R^2)** is statistical indicator which is used in statistical models as a measure of dependence between the variation of response variable and the variation of covariates. It shows to what extent the available observations fit the model.

При апроксимації функції $\tilde{c}_s^{mil}(t)$ використовується наступна математична форма:

$$\tilde{c}_s^{mil}(t) = a_s^m \cdot (b_s^m \cdot \exp(-l_{s1}^m \cdot t) + (1 - b_s^m) \cdot \exp(-l_{s2}^m \cdot t)) \quad (18)$$

де $a_s^m, b_s^m, l_{s1}^m, l_{s2}^m$ – параметри, що оцінюються.

Оскільки, масовий моніторинг концентрації ^{137}Cs у молоці почався лише з 1991 р., для періоду 1987–1990 рр. у якості емпіричних значень нормованих концентрацій ^{137}Cs у молоці використовуються значення, розраховані за загальноукраїнською двічі нормованою «молочною» функцією [4, 19], що представлена у табл. 7.

Таблиця 7

Параметри загальноукраїнської референтної «молочної» функції, яка використовується для оцінки вмісту ^{137}Cs у молоці у 1986–1990 рр.

Table 7

Parameters of All-Ukrainian reference *milk* function which is used for estimation of ^{137}Cs contents in milk in 1986–1990

| Параметр Parameter | $\tilde{c}_s^{mil}(t) = a \cdot (b \cdot \exp(-l_1 \cdot t) + (1 - b) \cdot \exp(-l_2 \cdot t))$ | | | |
|-----------------------|--|------------------------------------|--------------------------------------|--|
| | a | b б/р nondimensional value | l_1 б/р nondimensional value | l_2 рік ⁻¹ year ⁻¹ |
| Середнє STD | | 3,46 0,17 | 0,9 0,04 | 0,236 0,021 |

tion of the function $\tilde{c}_s^{mil}(t)$ the following mathematical form is used

where $a_s^m, b_s^m, l_{s1}^m, l_{s2}^m$ are parameters to be estimated.

Since massive monitoring of ^{137}Cs concentration in milk started only from 1991, for the period 1987–1990 in the capacity of empirical values of normed concentration of ^{137}Cs in milk the values are used evaluated by All-Ukrainian twice normalized *milk* function [4, 9], which is presented in Table 7.

На рисунку 3 візуалізовані абсолютні значення середньорічних концентрацій ^{137}Cs у молоці та відповідні апроксимаційні функції $\tilde{c}_s^{mil}(t)$ для двох НП різних районів півночі України.

Figure 3 visualizes absolute values of average annual concentrations of ^{137}Cs in milk and corresponding approximative functions $\tilde{c}_s^{mil}(t)$ for two settlements of different raions of northern Ukraine.

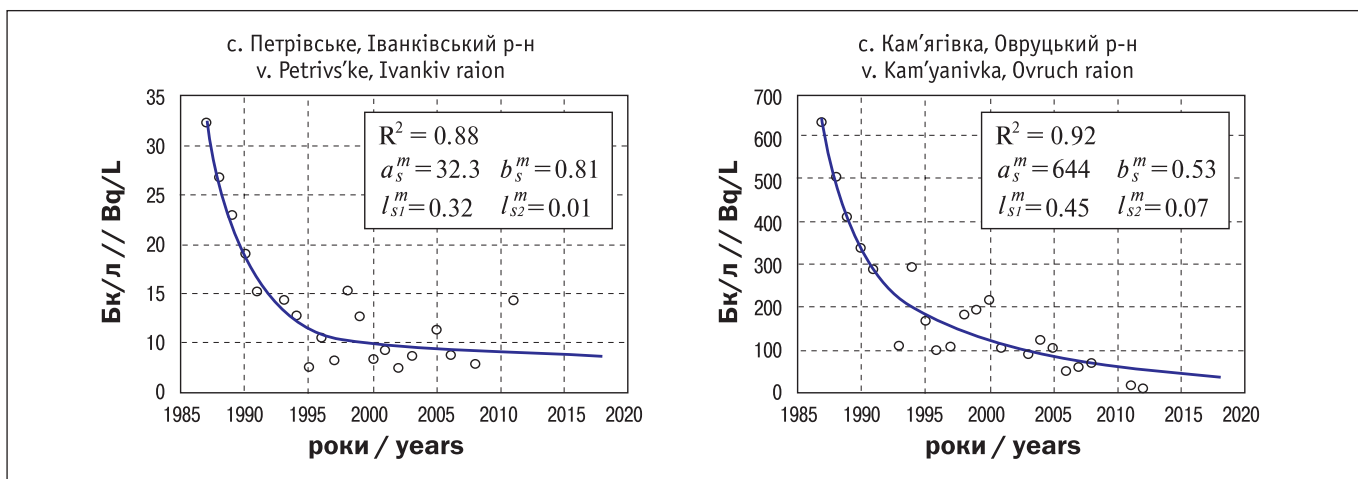


Рисунок 2. Приклади часової динаміки середньорічної концентрації ^{137}Cs у молоці за результатами прямих вимірів (o) та встановлені модельні «молочні» функції $\tilde{c}_s^{mil}(t)$ (суцільна крива) для дорослих; $a_s^m, b_s^m, l_{s1}^m, l_{s2}^m$ – параметри «молочної» функції $\tilde{c}_s^{mil}(t)$

Figure 2. Examples of time dynamics of average annual ^{137}Cs concentration in milk by the results of direct measurements (o) and established model «milk» functions $\tilde{c}_s^{mil}(t)$ (solid line) for adults; $a_s^m, b_s^m, l_{s1}^m, l_{s2}^m$ are parameters of «milk» function $\tilde{c}_s^{mil}(t)$

Величина абсолютного районного «молочного» еквіваленту раціону для дорослих жителів $ARME(t)$ у поточному році t визначається як середнє (зважене за кількістю ЛВЛ-вимірювань) значення молочних еквівалентів раціону для дорослих $\bar{w}_s^m(t)$, розрахованих на основі ЛВЛ-вимірювань в усіх НП адміністративного району R , який розглядається, за співвідношенням:

$$ARME(t) = \frac{1}{N_R} \cdot \sum_s \bar{w}_s^m(t) \quad (19)$$

де N_R – кількість ЛВЛ-вимірювань в районі R серед дорослих за поточний рік t . У свою чергу значення $\bar{w}_s^m(t)$ оцінюється як:

$$\bar{w}_s^m(t) = \frac{U_{i,s}(t) \cdot \lambda_{Cs}^{mi}}{\bar{c}_s^{mil}(t)} \quad (20)$$

де $U_{i,s}$ – середній вміст ^{137}Cs в організмі i -го дорослого жителя s -го НП у поточному році t ; $\bar{c}_s^{mil}(t)$ – середня активність ^{137}Cs в молоці s -го НП у поточному році t .

Для розрахунку $ARME(t)$ відбираються лише дані, що задовольняють наступним умовам:

- вік особи, у якої проводились ЛВЛ-вимірювання ≥ 18 ;
- кількість ЛВЛ-вимірювань в населеному пункті у поточному році ≥ 20 ;
- середня концентрація ^{137}Cs в молоці за поточний рік більше $10 \text{ Бк} \cdot \text{л}^{-1}$.

При недостатній кількості ЛВЛ-вимірювань у поточному році (менше 20 вимірювань) використовувались експертні оцінки $ARME(t)$.

На рисунку 4 представлено результати оцінки часової динаміки районного «молочного» еквіваленту

The value of absolute raion «milk» equivalent of diet for adult residents $ARME(t)$ in current year t is determined as average value (weighted by the number of WBC measurements) of milk equivalents of diet for adults $\bar{w}_s^m(t)$, evaluated based on WBC measurements in all settlements of the considered administrative raion R by relation

where N_R is the number of WBC measurements in raion R among adults during current year t . In turn the values $\bar{w}_s^m(t)$ are estimated as

where $U_{i,s}$ is mean contents of ^{137}Cs in organism of i^{th} adult resident of s^{th} in current year t ; $\bar{c}_s^{mil}(t)$ is mean activity of ^{137}Cs in milk of s^{th} settlement in current year t .

For evaluation of $ARME(t)$ only the data are selected that satisfy the following conditions:

- the age of a person, for which WBC measurements were made, ≥ 18 ;
- number of WBC measurements in the settlement in current year ≥ 20 ;
- mean concentration of ^{137}Cs in milk during the current year is larger than $10 \text{ Bq} \cdot \text{l}^{-1}$.

Under poor number of WBC measurements in current year (less than 20 measurements) expert estimates $ARME(t)$ were used.

Figure 4 presents estimation results of time dynamics of raion «milk» equivalent of diet

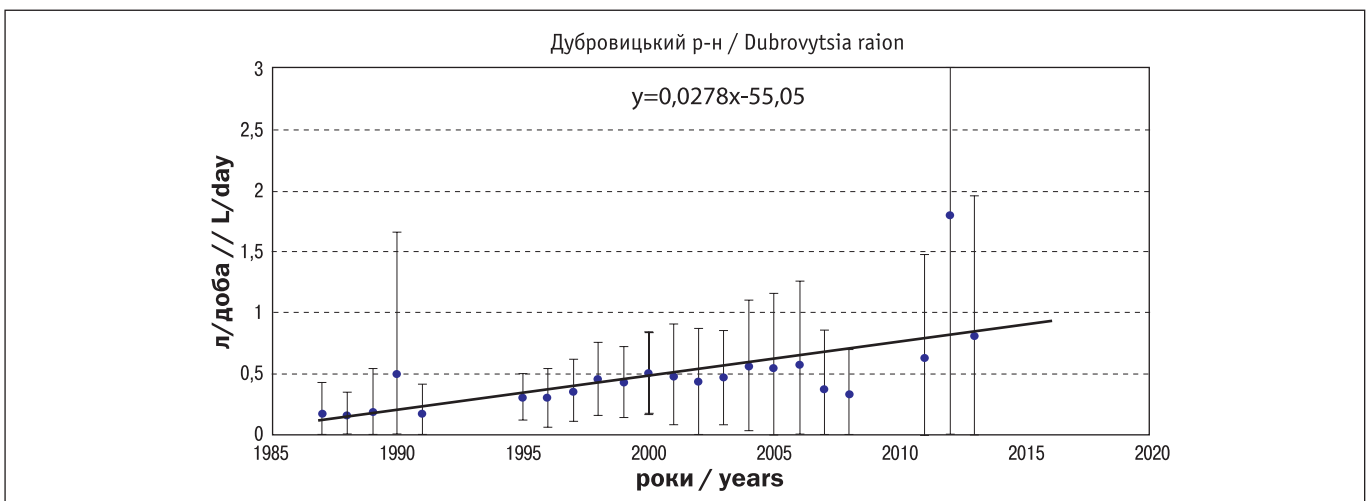


Рисунок 4. Числові значення $ARME(t)$ (о) та апроксимаційна пряма, яка їх моделює на прикладі Дубровицького району Рівненської області

Figure 4. Numerical values $ARME(t)$ (o) and approximative straight that models them at the example of Dubrovytsia raion of Rivne Oblast

раціону $ARME(t)$ та лінійну функцію, що їх апроксимує. Для тих років, коли результати ЛВЛ- або «молочних» вимірювань були відсутні, або не задовольняли умовам, викладеним вище, використовувались значення, що лежать на апроксимаційній функції.

Процедура 4. Якщо у s -му НП у t -й рік після аварійного періоду молочний моніторинг проводився менше 7 разів, або функція $\tilde{c}_s^{mil}(t)$ погано апроксимує дані моніторингу молока (коефіцієнт $R^2 < 0,2$), замість функції у рівнянні (17) реконструюється одна з трьох величин у представленій послідовності, яка залежить від наявності та об'єму «молочних» даних в s -му НП та у інших НП адміністративного району, до якого належить s -й НП:

- а) середня концентрація ^{137}Cs у молоці s -го НП (при наявності 4 або більше результатів вимірювань радіоцезію в молоці цього НП у t -й рік);
- б) «молочна» функція часової динаміки у концентрації ^{137}Cs у коров'ячому молоці, яка враховує результати молочного моніторингу в НП, що знаходяться у безпосередній близькості до s -го НП та мають схожі радіологічні характеристики;
- в) усереднена за t -й рік концентрація ^{137}Cs у молоці всіх НП району R , де проводився «молочний» моніторинг, нормована на одиницю щільності випадень ^{137}Cs на ґрунті кожного такого НП. Використовуються середні величини $\bar{c}_R^{mil}(t)$.

На рисунку 5 представлено приклад «молочної» функції [6]: $\bar{c}_R^{mil}(t)$ – для Козелецького району Чернігівської області.

$ARME(t)$ and a linear function that approximates them. For that years when results of WBC or «milk» measurements were absent or the above-mentioned conditions were violated, the values of approximative function were used.

Procedure 4. If in s^{th} settlement in t^{th} year after the accident the milk monitoring was held less than 7 times or the function $\tilde{c}_s^{mil}(t)$ poorly approximates the data of milk monitoring ($R^2 < 0.2$), then instead of the function in equation (17) it is reconstructed one of three quantities in the following order, which depends on availability and sample size of «milk» data in s^{th} settlement and in other settlements of the administrative raion to which s^{th} settlement belongs:

- a) mean ^{137}Cs concentration in milk of s^{th} settlement (in the presence of 4 and more results of measurements of radio-cesium contents in milk in this settlement in t^{th} year);
- b) «milk» function of time dynamics of ^{137}Cs concentration in cow milk, that takes account of results of milk monitoring in the settlement, which is situated in immediate vicinity of s^{th} vicinity, and that have similar radiological characteristics;
- c) averaged for t^{th} concentration of ^{137}Cs in milk of all settlements of raion R where «milk» monitoring was held, the concentration is normed per unit of density of ^{137}Cs deposition on the ground of each such vicinity. Mean values $\bar{c}_R^{mil}(t)$ are used.

Figure 5 presents an example of «milk» function [6]: $\bar{c}_R^{mil}(t)$ for Kozelets raion of Chernihiv Oblast.

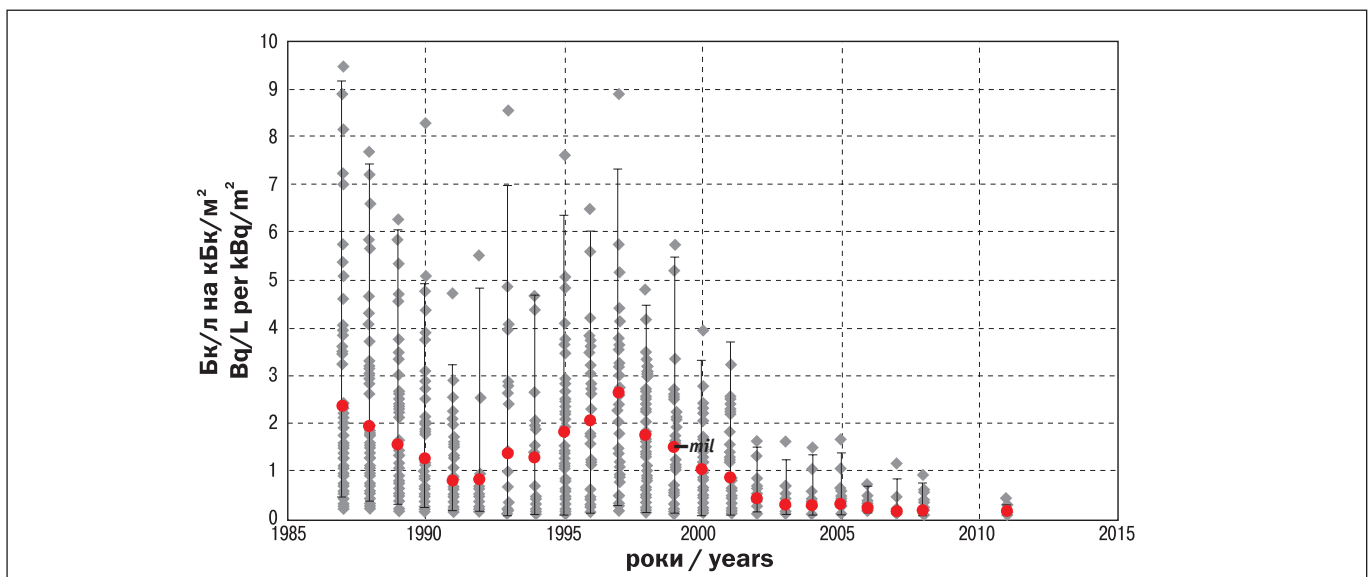


Рисунок 5. Концентрація ^{137}Cs у молоці, нормована на щільність випадень ^{137}Cs на ґрунті у НП Козелецького району (◆) та середньорайонні середньорічні значення $\bar{c}_R^{mil}(t)$ (●), $\text{Bq}\cdot\text{l}^{-1}$ на $\text{kBq}\cdot\text{m}^{-2}$

Figure 5. Concentration of ^{137}Cs in milk, normed by a density of ^{137}Cs deposition on the ground in the settlements of Kozelets raion (◆) and average raion annual values $\bar{c}_R^{mil}(t)$ (●), $\text{Bq}\cdot\text{l}^{-1}$ per $\text{kBq}\cdot\text{m}^{-2}$

Поправочний коефіцієнт для врахування віку особи I_a^{int} у період 1987–2017 рр. для дитячих та підліткової вікових груп розраховується за співвідношенням:

$$I_a^{int} = RRI_{R,a} \cdot \frac{E_{r,a}^{int}}{E_r^{int}} \quad (21)$$

де $RRI_{R,a}$ – районне відносне надходження ^{137}Cs у організм дитини або підлітка вікової групи a .

Введення параметру $RRI_{R,a}$ базується на припущенні, що відносне надходження радіоцезію з раціоном між різними віковими групами дітей/підлітків і дорослих є приблизно сталим для мешканців усіх НП одного району. Величина $RRI_{R,a}$ розраховується як усереднене по всіх роках післяаварійного періоду значення параметру відносного (міжвікового) надходження ^{137}Cs в організм $RRI_{R,a}(t)$ за співвідношеннями:

$$RRI_{R,a}(t) = \frac{1}{N_s^{WBC}} \cdot \sum_s \frac{\bar{q}_{s,a}^{int}(t)}{\bar{q}_s^{int}(t)} = \frac{1}{N_s^{WBC}} \cdot \sum_s \frac{\bar{U}_{s,a}(t) \cdot \lambda_{Cs,a}^{int}}{\bar{U}_s(t) \cdot \lambda_{Cs}^{int}} \quad (22)$$

$$RRI_{R,a} = \sum_T \frac{RRI_{R,a}(t)}{N_T} \quad (23)$$

де N_s^{WBC} – кількість НП, для яких було розраховано НП-специфічне відносне надходження; $\lambda_{Cs,a}^{int}$ та λ_{Cs}^{int} – константи напіввиведення цезію з організму, відповідно, дітей/підлітків віку a та дорослих, 1/доба; $\bar{U}_{s,a}(t)$ та $\bar{U}_s(t)$ – середні значення вмісту ^{137}Cs в організмі, зареєстровані при ЛВЛ-вимірюваннях у t -й рік у s -му НП як у дітей/підлітків віку a , так і у дорослих, Бк; N_T – кількість років, за які усереднюються дані (з 1986 по 2017 р.).

Значення $RRI_{R,a}$ розраховувались для чотирьох вікових груп: ≤ 2 , 3–7, 8–12, 13–17 років. Розглядалися лише ті ЛВЛ-вимірювання активності ^{137}Cs , які перевищували мінімально детектовану активність приладу. У табл. 8 наведені статистичні характеристики параметру $RRI_{R,a}$, встановлені для різних вікових груп дітей та підлітків окремих районів України. Статистична достовірність параметрів розподілу $RRI_{R,a}$ для зазначених вікових груп підтверджена статистичними тестами: Вілкоксона (непараметричний) та Стьюдента (параметричний).

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Методику реконструкції індивідуалізованих доз було застосовано для 10 районів північних областей України, а саме: Коростенський, Народицький, Овруцький та Олевський райони Житомирської області, Іванківський район Київської області, Дубровицький, Рокитнівський та Сарненський райони Рівненської об-

Correcting coefficient I_a^{int} for consideration of the age of a person in the period of 1987–2017 for children and adolescent age groups is evaluated by relation

where $RRI_{R,a}$ is raion relative intake of ^{137}Cs in organism of a child or adolescent of the age group a .

The parameter $RRI_{R,a}$ is introduced based on the assumption that relative intake of radio-cesium with diet among different age groups of children/adolescents and adults is approximately constant for residents of all settlements of a single raion. The value $RRI_{R,a}$ is evaluated as averaged by all the years of post-accidental period for the value of parameter of relative (inter-age) intake of ^{137}Cs in organism $RRI_{R,a}(t)$ as follows:

where N_s^{WBC} is a number of settlements with calculated settlement-specific relative intake; $\lambda_{Cs,a}^{int}$ and λ_{Cs}^{int} are constants of Cs elimination half-life, respectively in children/adolescents of age a and adults, 1/day; $\bar{U}_{s,a}(t)$ and $\bar{U}_s(t)$ are average values of ^{137}Cs contents registered in WBC measurements in t^{th} year in s^{th} settlement for children/adolescents of age a and adults, respectively, Bq; N_T is the number of years by which the data are averaged (from 1986 to 2017).

Values of $RRI_{R,a}$ were evaluated for four age groups: ≤ 2 , 3–7, 8–12, 13–17 years. There were considered only such WBC measurements of ^{137}Cs activity that exceeded the minimal detectable activity of devise. Table 8 presents statistical characteristics of the parameter $RRI_{R,a}$ established for various age groups of children and adolescents of different raions of Ukraine. Statistical significance of distribution parameters of $RRI_{R,a}$ for abovementioned age groups is accepted by statistical tests: Wilkinson (nonparametric) and Student (parametric).

RESULTS AND DISCUSSION

The methodology for reconstruction of individualized doses was used for 10 raions of northern Oblasts of Ukraine, namely: Korosten, Narodychy, Ovruch and Olevsk raions of Zhytomyr Oblast, Ivankiv raion of Kyiv Oblast, Dubrovytsia, Rokytne and Sarny raions of Rivne Oblast, Kozelets and

Таблиця 8

Числові значення відносного міжвікового надходження радіоцезію з раціоном ($RRI_{R,a}$) для дітей та підлітків різних вікових груп окремих районів

Table 8

Numerical values of relative inter-age intake of radio-cesium with diet ($RRI_{R,a}$) for children and adolescents of various age groups of different raions

| Район Raion | $RRI_{R,a}$ для вікової групи, років / $RRI_{R,a}$ for age group, years | | | | | | | |
|------------------------------|---|------|------|------|------|------|-------|------|
| | ≤ 2 | | 3–7 | | 8–12 | | 13–17 | |
| | ArM | STD | ArM | STD | ArM | STD | ArM | STD |
| м. Коростень / Korosten city | 1,28 | 0,31 | 1,28 | 0,31 | 1,03 | 0,23 | 0,9 | 0,18 |
| Коростенський / Korosten | 1,24 | 0,66 | 1,24 | 0,66 | 0,98 | 0,42 | 0,87 | 0,23 |
| Народицький / Narodychy | 0,98 | 0,48 | 0,98 | 0,48 | 0,93 | 0,67 | 0,88 | 0,40 |
| Овруцький / Ovruch | 1,2 | 0,69 | 0,92 | 0,60 | 0,99 | 0,64 | 0,94 | 0,52 |
| Олевський / Olevsk | 1,2 | 0,59 | 1,2 | 0,59 | 0,96 | 0,38 | 0,87 | 0,23 |
| Іванківський / Ivankiv | 2,1 | 1,35 | 1,6 | 1,15 | 1,05 | 0,65 | 0,91 | 0,54 |
| Дубровицький / Dubrovytsia | 1,0 | 0,45 | 1,0 | 0,45 | 0,91 | 0,38 | 0,89 | 0,33 |
| Рокитнівський / Rokytne | 1,0 | 0,8 | 1,0 | 0,8 | 0,8 | 0,3 | 0,8 | 0,2 |
| Сарненський / Sarny | 1,3 | 0,93 | 1,3 | 0,93 | 0,99 | 0,51 | 0,88 | 0,31 |
| Козелецький / Kozelets | 1,4 | 0,4 | 1,4 | 0,5 | 1,1 | 0,3 | 0,9 | 0,2 |
| Ріпкинський / Ripky | 1,4 | 0,4 | 1,4 | 0,5 | 1,1 | 0,3 | 0,9 | 0,2 |

ласті, Козелецький та Ріпкинський райони Чернігівської області. Було оцінено індивідуалізовані ефективні дози зовнішнього та внутрішнього опромінення, які отримали мешканці кожного НП із зазначених районів за кожен післяаварійний рік із інтервалу 1986–2017 рр. Дози розраховувались для представників п'яти вікових груп: 0–2, 3–7, 8–12, 13–17 та ≥ 18 років.

У табл. 9 наведено усереднені по району значення ефективних індивідуалізованих доз сумарного (зовнішнього та внутрішнього) опромінення для різних вікових груп, накопичених за різні періоди після аварії на ЧАЕС: 1986 р., 1986–2000 рр. (15 років після аварії) та 1986–2017 рр. (32 роки після аварії). Дози зважені на кількість населення у НП зазначених вище районів. Інформація про чисельність населення бралась із таких джерел: дані райдержадміністрацій та МОЗ України, які надходили до лабораторії радіологічного захисту ННЦРМ у перші роки після аварії; результати всеукраїнських переписів населення у 1989 та 2001 рр.; дані офіційних статистичних збірок державної служби статистики України. Для корекції чисельності населення за статтю та віком було виконано математичну процедуру [23].

Як впливає з табл. 9, найбільшого опромінення внаслідок Чорнобильської аварії зазнали мешканці Народицького району. У 1986 р. їхня середня доза опромінення приблизно у 2–3 рази перевищувала дози, які отримали особи відповідної вікової групи, що проживають в інших (представлених у таблиці) районах Житомирської області, та у 4–7 разів пере-

Ripky raions of Chernihiv Oblast. It was estimated individualized effective doses of external and internal exposure which obtained residents of each settlement of abovementioned raions for each post-accidental year from the interval 1986–2017. The doses were evaluated for representatives of five age groups: 0–2, 3–7, 8–12, 13–17 and ≥ 18 years.

Table 9 contains averaged within a raion values of effective individualized doses of total (external and internal) exposure for various age groups accumulated during different periods after Chernobyl accident: year 1986, years 1986–2000 (in 15 years' time) and years 1986–2017 (in 32 years' time). The doses are weighted by the number of population in settlements of mentioned raions. Information about the number of population was taken from the following sources: data from raion state administrations and the Ministry of Health of Ukraine that came to the laboratory of radiological protection of NRCRM in the first years after the accident; results of All-Ukrainian censuses in 1989 and 2001; data of official statistical collection of State Statistics Service of Ukraine. For correction of number of population in sex and age, it was used a mathematical procedure [23].

As follows from Table 9, maximal exposure after Chernobyl accident was obtained by residents of Narodychy raion. In 1986 their mean exposure dose was approximately 2–3 times higher than the doses of corresponding age group residing in other (presented in the table) raions of Zhytomyr Oblast and 4–7 times higher than the

Таблиця 9

Усереднені за чисельністю населення окремих районів індивідуалізовані ефективні дози сумарного (зовнішнього та внутрішнього) опромінення накопичені за різні періоди (без урахування вкладу ¹³¹I)

Table 9

Averaged by number of population in some raion individualized effective doses of total (external and internal) exposure, accumulated during different periods of time (without taking account of effect of ¹³¹I)

| Район / Raion ¹ | Доза представника вікової групи, мЗв / dose of age group representative, mSv | | | | |
|--|--|-----------------|------------------|-------------------|------------------|
| | 0–2 роки/years | 3–7 років/years | 8–12 років/years | 13–17 років/years | ≥ 18 років/years |
| 1986 | | | | | |
| Коростенський / Korosten | 5,6 | 5,3 | 6,3 | 6,9 | 7,9 |
| Народицький / Narodychy | 10 | 9,5 | 11 | 12 | 18 |
| Овруцький / Ovruch | 3,8 | 3,6 | 4,2 | 4,6 | 6,4 |
| Олевський / Olevsk | 3,2 | 3,0 | 3,5 | 3,8 | 5,5 |
| Іванківський / Ivankiv | 1,8 | 1,7 | 2,0 | 2,1 | 3,1 |
| Дубровицький / Dubrovysia | 3,0 | 2,8 | 3,3 | 3,6 | 4,9 |
| Рокитнівський / Rokytne | 2,5 | 2,3 | 2,7 | 3,0 | 4,3 |
| Сарненський / Sarny | 1,5 | 1,4 | 1,7 | 1,8 | 2,5 |
| Козелецький / Kozelets | 0,79 | 0,74 | 0,86 | 0,94 | 1,3 |
| Ріпкинський / Ripky | 0,99 | 0,92 | 1,1 | 1,2 | 1,7 |
| 1986–2000 («15 років» / «15 years») | | | | | |
| Коростенський / Korosten | 12 | 11 | 13 | 14 | 17 |
| Народицький / Narodychy | 24 | 23 | 26 | 27 | 42 |
| Овруцький / Ovruch | 15 | 12 | 14 | 16 | 22 |
| Олевський / Olevsk | 10 | 9 | 10 | 11 | 16 |
| Іванківський / Ivankiv | 6,9 | 5,9 | 5,8 | 6,1 | 9,1 |
| Дубровицький / Dubrovysia | 11 | 10 | 11 | 13 | 18 |
| Рокитнівський / Rokytne | 12 | 11 | 12 | 14 | 20 |
| Сарненський / Sarny | 8,4 | 7,5 | 7,3 | 8,0 | 11 |
| Козелецький / Kozelets | 3,3 | 2,8 | 3,0 | 3,2 | 4,5 |
| Ріпкинський / Ripky | 2,9 | 2,7 | 3,0 | 3,1 | 4,5 |
| 1986–2017 р. («32 роки» / «32 years») | | | | | |
| Коростенський / Korosten | 14 | 14 | 15 | 16 | 20 |
| Народицький / Narodychy | 29 | 29 | 32 | 33 | 51 |
| Овруцький / Ovruch | 18 | 15 | 17 | 19 | 26 |
| Олевський / Olevsk | 12 | 12 | 12 | 13 | 20 |
| Іванківський / Ivankiv | 8,7 | 7,5 | 7,5 | 7,6 | 12 |
| Дубровицький / Dubrovysia | 14 | 13 | 14 | 16 | 22 |
| Рокитнівський / Rokytne | 16 | 15 | 15 | 18 | 25 |
| Сарненський / Sarny | 10 | 9,4 | 9,1 | 9,9 | 14 |
| Козелецький / Kozelets | 4,5 | 4,1 | 4,3 | 4,5 | 6,1 |
| Ріпкинський / Ripky | 4,2 | 4,0 | 4,3 | 4,4 | 6,2 |

Примітка. ¹Не включались НП, які були евакуйовані або відселені у перші роки після аварії на ЧАЕС.
Note. ¹Evacuated in the first years after Chernobyl accident settlements aren't include.

вищувала дози опромінення мешканців Київської та Рівненської областей. У мешканців Козелецького та Ріпкинського районів Чернігівської області доза опромінення була меншою у 12–14 разів, ніж у жителів Народицького району. В наступні періоди різниця між величиною дози, отриманої населенням Народицького та інших районів зменшується.

Дози, які отримали особи з населення дитячого та підліткового віку менші у середньому в 1,3–1,6 раза порівняно з дорослими. Різниця між опроміненням представників дитячих і підліткових вікових груп незначна і в середньому дорівнює 0,16 %.

ones for residents of Kyiv and Rivne Oblasts. Residents of Kozelets and Ripky raions of Chernihiv Oblast got exposure dose 12–14 times lower than the residents of Narodychi raion. In next periods the difference between the values of dose obtained by the population of Narodychy and other raions is decreasing.

Doses obtained by persons of childish and adolescent age are in mean 1.3–1.6 times lower compared with adults. The difference between exposure of representatives of children and adolescent age groups is insignificant and in mean it equals 0.16 %.

У перші 15 років після аварії реалізується приблизно 72–82 % дози, яку отримали жителі радіоактивно забруднених територій за весь 32-річний післяаварійний період. Доза у 1986 р. складає 20–35 % дози за період 1987–2017 рр. залежно від умов району проживання опромінених осіб.

ВИСНОВКИ

Розроблено методику реконструкції ефективних індивідуалізованих доз зовнішнього та внутрішнього опромінення мешканців радіоактивно забруднених внаслідок аварії на ЧАЕС територій. Методика базується на результатах радіоекологічного (грунт, продукти харчування) та дозиметричного (ЛВЛ-вимірювання) моніторингов, які мали місце у 1986–2013 рр. та зберігаються у базі даних Центрального еколого-дозиметричного реєстру лабораторії радіологічного захисту ННЦРМ.

Методика реконструкції доз опромінення включає декілька рівнів індивідуалізації, пов'язаних між собою. Для кожного рівня створено еколого-дозиметричну модель для оцінки дози у певній ситуації опромінення з набором параметрів, що враховують особливості опромінення. Кожен наступний рівень моделі базується на попередньому і враховує додаткові параметри, завдяки чому модель наступного рівня є точнішою. При використанні методики слід вибирати модель того рівня, який найкращим чином дозволяє розв'язати поставлені перед дослідником завдання. Розглядаються чотири основні рівні індивідуалізації доз. На кожному такому рівні оцінюються ефективні дози зовнішнього та внутрішнього опромінення та їх сумарна доза.

- Базовий рівень – реконструюється річна доза опромінення на одиницю щільності випадіння радіоізотопів на ґрунті референтної дорослої людини, що мешкає протягом 1 року в одному й тому ж НП;
- Рівень НП – враховує радіологічні характеристики того чи іншого НП і параметри опромінення референтного жителя цього НП за 1 рік;
- Рівень «особливостей поведінки» – пов'язаний з віком особи та умовами проживання на радіоактивно забрудненій території;
- Рівень відтворення динаміки опромінення у часі – оцінюється доза опромінення за певний період часу.

Для населення РЗТ розглядаються два основних шляхи опромінення: (а) зовнішнє опромінення від радіонуклідів у ґрунті та (б) внутрішнє опромінення від споживання радіоактивно-забруднених продуктів харчування, у першу чергу, молока та овочів.

In the first 15 years after the accident, it is realized about 72–82 % of doses obtained by residents of contaminated territories for the whole 32-years post-accidental period. The dose in 1986 constitutes 20–35 % of the dose for the period of 1987–2017 depending on the conditions of living of exposed persons.

CONCLUSIONS

It is developed the methodology for reconstruction of effective individualized doses of external and internal exposure for residents of radioactively contaminated after Chernobyl accident territories. The methodology is based on results of radio-ecological (the ground, meal) and dosimetric (WBC measurements) monitoring that were held in 1986–2013 and are saved in data base of Central Ecological and Dosimetric Register of the Laboratory of Radiological Protection of NRCRM.

The methodology includes several levels of individualization related to each other. For each level it is created an ecological and dosimetric model for estimation of dose in certain exposure situation with collection of parameters that take account of peculiarities of exposure. Each subsequent level of the model is based on the previous one and involves additional parameters, due to which the model of the next level is more accurate. In using of the methodology one should select a model of such level that enables to resolve in the best way tasks posed before a researcher. Four main levels of the dose individualization are considered. At each such level it is estimated effective doses of external and internal exposure and the total dose.

- Base level: it is reconstructed annual exposure dose per unit of density of depositions of radioisotopes on the ground for a reference adult that resides during 1 year at the same settlement;
- Settlement level: radiological characteristics of any given settlement and exposure parameters of a reference resident there for 1 year are considered;
- Level of «behavioural peculiarities»: it is related to the age of a person and living conditions at radioactively contaminated territory;
- Level of reconstruction of exposure dynamics in time: exposure dose is estimated for certain period of time.

For population of RCT it is considered two main ways of exposure: (a) external exposure from radionuclides in the ground, and (b) internal exposure from consumption of radioactively contaminated meal, first of all, milk and vegetables.

Для 1986 року доза вираховується від усіх основних радіонуклідів радіоактивного аварійного викиду, а після 1987 р. – лише від радіоізотопів цезію (^{134}Cs та ^{137}Cs). У моделях використано рекомендовані у публікаціях Міжнародної комісії з радіологічного захисту (МКРЗ) дозові коефіцієнти на одиницю надходження радіонуклідів у організм людини з раціоном та період напіввиведення цезію з організму [22].

Ефективні дози зовнішнього та внутрішнього опромінення без урахування доз від ^{131}I оцінені для населення різних вікових груп, яке проживає у 10 районах чотирьох північних областей України: Житомирської, Київської, Рівненської та Чернігівської. Наводяться оцінки річних доз, зважених на чисельність населення в НП окремих районів. Серед них: доза за 1986 р., накопичені дози за перші 15 післяаварійних років (1986–2000 рр.) та за 32-річний період (1986–2017 рр.) після аварії. Показано, що найбільшого опромінення серед представлених районів зазнали мешканці Народицького району. Середньорайонна доза, реконструйована для його дорослих жителів у 1986 р., склала 18 мЗв, а накопичена за весь післяаварійний період – 51 мЗв. Серед зазначених районів найменші дози отримали особи, що мешкають на територіях Козелецького та Ріпкинського районів: середня доза у 1986 р. становила 1,3 та 1,7 мЗв, а накопичена за 32 післяаварійні роки – 6,1 та 6,2 мЗв відповідно.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Основні принципи та досвід проведення комплексної дозиметричної паспортизації населених пунктів України / І. А. Ліхтарьов, Л. М. Ковган, С. В. Масюк та ін. *Проблеми радіаційної медицини та радіобіології*. 2015. Вип. 20. С. 75–103.
2. А. Загальнодозиметрична паспортизація населених пунктів України та реконструкція індивідуалізованих доз суб'єктів Державного реєстру України осіб, які постраждали внаслідок Чорнобильської катастрофи (досвід, результати та перспективи) / І. А. Ліхтарьов, Л. М. Ковган, О. М. Іванова та ін. *Журнал Національної академії медичних наук України*. 2016. Т. 22, № 2. С. 208–221.
3. Радіаційно-дозиметрична паспортизація населених пунктів території України, що зазнали радіоактивного забруднення внаслідок аварії ЧАЕС, включаючи тиреодозиметричну паспортизацію. Інструктивно-методичні вказівки: «Методика-96» / І. А. Ліхтарьов, Л. М. Ковган, Л. Я. Табачний та ін. ; Мінздрав України, Мінчорнобиль України, НЦРМ АМНУ, ІРЗ ТНУ. Київ, 1996. 74 с.
4. Реконструкція та прогноз доз опромінення населення, яке мешкає на територіях України, що зазнали радіоактивного забруднення внаслідок аварії на ЧАЕС (Методика-97) : інструктивно-методичні вказівки / за ред. І. А. Ліхтарьова. Київ, 1998. 76 с.

For year 1986 the dose is evaluated from all main radionuclides of radioactive accidental deposition, and after 1987 only from radio-isotopes of cesium (^{134}Cs and ^{137}Cs). In the models it is used the dose coefficients per unit of intake of radionuclides to human organism with diet, that were recommended in publications of International Commission for Radiological Protection (ICRP), and also the effective cesium half-life from the body [22].

Effective doses of external and internal exposure without taking account of doses from ^{131}I are estimated for population of various age groups residing in 10 raions of four northern Oblasts of Ukraine: Zhytomyr, Kyiv, Rivne and Chernihiv. It is presented estimates of annual doses weighted by the number of population in settlements of separate raions. Among them: the dose for year 1986, the doses accumulated during the first 15 post-accidental years (1986–2000) and during 32-years period (1986–2017) after the accident. It is shown that maximal exposure among presented raions was for residents of Narodychy raion. Average raion dose reconstructed for its adult residents in 1986 constituted 18mSv, and the one accumulated during the whole post-accidental period was 51mSv. The lowest doses were obtained by residents of Kozelets and Ripky raions. Average dose for them in 1986 constituted 1.3 and 1.7 mSv, and the one accumulated during 32 post-accidental years was 6.1 and 6.2 mSv, respectively.

REFERENCES

1. Likhtarov IA, Kovgan LM, Masiuk SV, Ivanova OM, Chepurny MI, Boyko ZN, Gerasymenko VB. Basic principles and practices of integrated dosimetric passportization of the settlements in Ukraine. *Probl Radiac Med Radiobiol*. 2015;20:75-103.
2. Likhtarov IA, Kovgan LN, Ivanova ON, Masiuk SV, Chepurny MI, Boyko ZN, Gerasymenko VB, Tereshchenko SA, Kortushin GI, Marceniyk OD, Kravchenko IG, Gubina IG. [Integrated dosimetric passportization of settlements of Ukraine and reconstruction of individualized doses of the Ukrainian State Register of Persons Affected by Chernobyl Accident (experience, results and prospects)]. *Journal of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine*. 2016;22:208-21. Ukrainian.
3. Likhtarov LA, Kovgan LM, Tabachnyi LYa, et al.; Ministry of Health of Ukraine, Ministry of Affairs of Population Protection from the Consequences of Chornobyl Catastrophe of Ukraine, RCRM AMS of Ukraine, RPI ATS of Ukraine. [Radiation and dosimetric passportization of the settlements of Ukrainian territory which suffered from radioactive contamination as a consequence of the Chernobyl accident, including thyroid dosimetric passportization. Instructions and practical policies: «Methods-96»]. Kyiv; 1996. 74 p. Ukrainian.

5. Реконструкция индивидуализированных доз внутреннего облучения субъектов Государственного регистра Украины: Сообщение 1. Локально-специфические модели и дозы облучения жителей Рокитновского района Ровенской области, Овручского района Житомирской области и Иванковского района Киевской области / И. А. Лихтарев, Л. Н. Ковган, С. В. Масюк та ін. *Проблеми радіаційної медицини та радіобіології*. 2014. Вип. 19. С. 80–101.
6. Реконструкция индивидуализированных доз внутреннего облучения субъектов Государственного регистра Украины: Сообщение 2. Локально-специфические модели и дозы облучения жителей Козелецкого и Репкинского районов Черниговской области / И. А. Лихтарев, Л. Н. Ковган, С. В. Масюк та ін. *Проблеми радіаційної медицини та радіобіології*. 2014. Вип. 19. С. 102–125.
7. Узагальнені результати реконструкції індивідуалізованих доз суб'єктів Державного Реєстру України осіб, які постраждали внаслідок Чорнобильської катастрофи / І. А. Ліхтарьов, Л. М. Ковган, О. М. Іванова та ін. *Проблеми радіаційної медицини та радіобіології*. 2015. Вип. 20. С. 104–126.
8. Реконструкція індивідуалізованих доз суб'єктів Державного реєстру України осіб, які постраждали внаслідок Чорнобильської катастрофи, що проживають в Коростенському районі Житомирської області / О. М. Іванова, С. В. Масюк, З. Н. Бойко та ін. *Проблеми радіаційної медицини та радіобіології*. 2017. Вип. 22. С. 126–146.
9. Іванова О. М., Герасименко В. Б., Бойко З. Н. Розробка системи індивідуалізації рівнів опромінення осіб з населення, які мешкають в Овруцькому районі Житомирської області та Іванківському районі Київської області і знаходяться на обліку в Державному реєстрі України осіб, які постраждали внаслідок Чорнобильської аварії. *Проблеми радіаційної медицини та радіобіології*. 2011. Вип. 16. 2011. С.30–40.
10. Chernobyl accident: Retrospective and prospective estimates of external dose of the population of Ukraine / I. A. Likharev, L. N. Kovgan, J. P. Jacob et al. *Health Phys.* 2002. Vol.82, № 3. P. 290–303.
11. A consistent radionuclide vector after the Chernobyl accident / K. Muck, G. Prohl, I. Likharev et al. *Health Physics.* 2002. Vol. 82, № 2. P. 141-156.
12. Загальнодозиметрична паспортизація та результати ЛВЛ-моніторингу в населених пунктах України, які зазнали радіоактивного забруднення після Чорнобильської аварії. Дані за 2011 р. / І. А. Ліхтарьов, Л. М. Ковган, В. В. Василенко та ін. *Дозиметрична паспортизація (Збірка 14)*. Київ, 2012. 99 с.
13. Effective dose conversion coefficients for radionuclides exponentially distributed in the ground / K. Saito, N. Ishigure, N. Petoussi-Henss, H. Schlattl. *Radiat. Environ. Biophys.* 2012. Vol. 51. P. 411–423.
14. External exposure to radionuclides in air, water, and soil. Federal guidance report no. 12 / K. F. Eckerman, J. C. Ryman. Oak Ridge, Tennessee, 1993. 237 p.
15. Подвижность радионуклидов выброса ЧАЭС в почвах отчужденных территорий / Ю. А. Иванов, С. Е. Левчук, С. И. Киреев, М. Д. Бондарьков, Ю. В. Хомутинин. *Радіобіологія та радіоекологія*. 2011. Т. 12, № 4. С. 375–384.
16. Іванов Ю., Хомутинін Ю. В. Математичне моделювання динаміки міграції ^{90}Sr і ^{137}Cs в компонентах ґрунтово-рослинного покриву агроце-
4. Likhtarov IA, editor. [Instructive-methodical Documents «Reconstruction and Prognosis of the Irradiation Doses of Population Residing on the Ukrainian Radioactively Contaminated Area as a result of the Chernobyl Accident» (Methods-97)]. Kyiv; 1998. 76 p. Ukrainian.
5. Likhtarov IA, Kovgan LN, Masiuk SV, Ivanova ON, Chepurny MI, Boyko ZN, Gerasymenko VB, Tereshchenko SA, Kravchenko IG, Kortushin GI, Marceniyk O. D. Individualized internal exposure doses reconstruction for the persons of Ukraine State Register: Report 1. Locally, specific models and doses of persons living in Rokytno raion of Rivne oblast, Ovruch raion of Zhytomyr oblast and Ivankiv raion of Kyiv oblast. *Probl Radiac Med Radiobiol.* 2014;19:80-101.
6. Likhtarov IA, Kovgan LN, Masiuk SV, Ivanova ON, Chepurny MI, Boyko ZN, Gerasymenko VB, Tereshchenko SA, Kravchenko IG, Kortushin GI, Marceniyk OD. Individualized internal exposure doses reconstruction for the persons of Ukraine State Register: Report 2. Locally, specific models and doses of persons living in Kozelets and Ripky raions of Chernihiv oblast. *Probl Radiac Med Radiobiol.* 2014;19:102-25.
7. Likhtarov IA, Kovgan LN, Masiuk SV, Ivanova ON, Chepurny MI, Boyko ZN, Gerasymenko VB, Tereshchenko SA, Kravchenko IG, Kortushin GI, Marceniyk OD, Gubina IG. Generalized results of individualized exposure doses reconstruction for the subjects of Ukrainian State Register of persons, affected due to Chornobyl accident. *Probl Radiac Med Radiobiol.* 2015;20:104-26.
8. Ivanova OM, Masiuk SV, Boiko ZN, Chepurny MI, Gerasymenko VB, Fedosenko GV, Vasylenko W, Lytvynets LO, Pikta VO, Kovgan LM, Zhadan NS, Tereshchenko SO, Kravchenko IG, Kortushin GI, Marcenjuk OD, Kukush AG. Reconstruction of individualized doses of subjects from the Ukrainian State Register of Persons that Affected due to Chornobyl accident and reside in Korosten raion of Zhytomyr oblast. *Probl Radiac Med Radiobiol.* 2017;22:126-46.
9. Ivanova O, Gerasymenko V, Boyko Z. [Development of the system of individualization of exposure level for the population living in Ovruch district of Zhytomyr region and Ivankov district of Kyiv region and registered in the Ukraine State Register of persons affected due to Chornobyl accident]. *Probl Radiac Med Radiobiol.* 2011;(16):30-40. Ukrainian.
10. Likharev IA, Kovgan LN, Jacob JP, Anspaugh LR. Chernobyl accident: Retrospective and prospective estimates of external dose of the population of Ukraine. *Health Phys.* 2002;82(3):290-303.
11. Muck K, Prohl G, Likharev I, Meckbach R, Golikov V. A consistent radionuclide vector after the Chernobyl accident. *Health Phys.* 2002;82(2):141-56.
12. [General dosimetric passportization and results of WBC monitoring in the settlements of Ukraine, which contaminated by Chornobyl accident]. Data for 2011. Collection 14; 2012. 99 p. Ukrainian.
13. Saito K, Ishigure N, Petoussi-Henss N, Schlattl H. Effective dose conversion coefficients for radionuclides exponentially dis-

- нозів на пізній фазі радіаційної аварії. 1. Побудова моделі та її параметризація. *Радіобіологія та радіоекологія*. 2015. Т. 16, № 2. С. 169-245.
17. Anisimov V. S., Sanzharova N. I., Alexakhin R. M. ^{137}Cs behavior in the system soil - plant in the stationary sampling sites located within the 30-kilometer zone of the Chernobyl NPP in the period 1987-1992: II. Vertical migration in soils and accumulation of ^{137}Cs in natural meadow grasses. *International Journal of Environmental Problems*. 2016. Vol. 3, Iss. 1. P. 26-57.
18. Effective doses due to external irradiation from the Chernobyl accident for different population groups of Ukraine / I. Likhtariov, L. Kovgan, D. Novak et al. *Health Physics*. 1996. Vol.70, no. 1. P. 87-98.
19. Ліхтарьов І. А., Ковган Л. М., Федосенко Г. В. Реконструкція індивідуалізованих доз опромінення суб'єктів Державного реєстру України осіб (ДРУ) Рокитнівського району Рівненської області та Козелецького і Ріпкинського районів Чернігівської області, які постраждали внаслідок Чорнобильської катастрофи і проживають на радіоактивно-забруднених територіях : методичні рекомендації. Київ, 2012. 66 с.
20. Exposures and effects of the Chernobyl accident. UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly. Annex J. *International Journal of radiation medicine*. 2000. Vol. 2-4 (6-8). 112 p.
21. Ковган Л. М. Еколого-дозиметричні моделі опромінювання населення у разі глобальної радіаційної аварії (за досвідом Чорнобильської катастрофи) : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 21.06.01 / Ковган Леоніла Миколаївна ; Ін-т пробл. безпеки атом. електростанцій. Київ, 2005. 39 с.
22. ICRP Publication 119. Compendium of dose coefficients based on ICRP Publication 60. *Annals of the ICRP*. 2012. Vol. 41, No. 1. 130 p.
23. Методика коригування розподілу населення за статтю та віком за 1989-2001 роки на базі даних Всеукраїнського перепису населення 2001 року. Затверджена наказом Держкомстату України від 09.03.2005 р., № 70. 13 с.
- tributed in the ground. *Radiat Environ Biophys*. 2012;51:411-423.
14. Eckerman KF, Ryman JC. External exposure to radionuclides in air, water, and soil. Federal guidance report no. Oak Ridge, Tennessee; 1993. 237 p.
15. Ivanov YuA, Levchuk SE, Kireev SI, Bondarkov MD, Khomutinin YuV. [The mobility of radionuclides of the Chernobyl accident in the soils of exclusion territories]. *Radiobiology and Radioecology*. 2011;12:375-384. Russian.
16. Ivanov YuO, Khomutinin YuV. [Mathematical modelling of the dynamics of ^{90}Sr and ^{137}Cs migration in the components of agrocenosis soil and vegetation cover at the late phase of a radiation accident. 1. Construction of the model and its parameterization]. *Radiobiology and radioecology*. 2015;16:169-245. Ukrainian.
17. Anisimov VS, Sanzharova NI, Alexakhin RM. ^{137}Cs behavior in the system soil - plant in the stationary sampling sites located within the 30-kilometer zone of the Chernobyl NPP in the period 1987-1992: II. Vertical migration in soils and accumulation of ^{137}Cs in natural meadow grasses. *International Journal of Environmental Problems*. 2016;3:26-57.
18. Likhtariov I, Kovgan L, Novak D, Vavilov S, Jacob P, Paretzke HG. Effective doses due to external irradiation from the Chernobyl accident for different population groups of Ukraine. *Health Phys*. 1996;70(1):87-98.
19. Lihtarov IA, Kovgan LM, Fedosenko GV, et al.; Ministry of Health of Ukraine, NAMS of Ukraine, State Institution «USIT HP and the Ministry of Health of Ukraine», State Institution «NRCRM, NAMS of Ukraine», Ukrainian RPI ATS. [Reconstruction of individualized doses for subjects of State Register of Ukraine (SRU) from Rokytna raion of Rivne oblast and Kozeletskyi and Ripky raions of Chernihiv oblast affected by the Chernobyl accident and living on the radioactively contaminated areas: methodical guidelines]. Kyiv; 2012. 66 p. Ukrainian.
20. Exposures and effects of the Chernobyl accident. UNSCEAR 2000. Report to the General Assembly. Annex J. *International Journal of radiation medicine*. 2000;2-4(6-8). 112 p.
21. Kovgan LM. [Ecological and dosimetric models of radiation of the population in the event of a global radiation accident (based on the experience of the Chernobyl disaster)] : the dissertation author's abstract ... of the doctor of technical sciences : 21.06.01. Kyiv: Institute of nuclear power plants safety problems; 2005. 39 p. Ukrainian.
22. ICRP Publication 119. Compendium of dose coefficients based on ICRP Publication 60. *Annals of the ICRP*. 2012;41(1). 130 p.
23. Methodology of adjusting of the population distribution by sex and age for 1989-2001 on the basis of the 2001 All-Ukrainian Population Census. Approved by the order of the State Statistics Committee of Ukraine dated March 9, 2005. No. 70. 13 p.

Стаття надійшла до редакції 27.07.2018

Received: 27.07.2018