

УДК 504.064:614.876

О. М. Іванова¹✉, С. В. Масюк¹, З. Н. Бойко¹, М. І. Чепурний¹, В. Б. Герасименко¹,
Г. В. Федосенко¹, В.В. Василенко¹, Л. О. Литвинець¹, В. О. Пікта¹, Л. М. Ковган²,
Н. С. Жадан², С. О. Терещенко³, І. Г. Кравченко³, Г. І. Кортушин³, О. Д. Марценюк³,
О. Г. Кукуш⁴

¹Державна установа «Національний науковий центр радіаційної медицини Національної академії медичних наук України», 53, вул. Мельникова, м. Київ, 04050, Україна

²Науково-дослідний інститут радіаційного захисту Академії технологічних наук України, вул. Мельникова, 53, а/с 52, м. Київ, 04050, Україна

³Державна установа «Український центр інформаційних технологій та Національного Реєстру» Міністерства охорони здоров'я України, вул. Крамського, 21а, м. Київ, 03115, Україна

⁴Київський національний університет імені Тараса Шевченка, вул. Володимирська, 60, м. Київ, 01033, Україна

РЕКОНСТРУКЦІЯ ІНДИВІДУАЛІЗОВАНИХ ДОЗ СУБ'ЄКТІВ ДЕРЖАВНОГО РЕЄСТРУ УКРАЇНИ ОСІБ, ЯКІ ПОСТРАЖДАЛИ ВНАСЛІДОК ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ КАТАСТРОФИ, ЩО ПРОЖИВАЮТЬ В КОРОСТЕНСЬКОМУ РАЙОНІ ЖИТОМИРСЬКОЇ ОБЛАСТІ

Мета дослідження. Розробка еколого-дозиметричної моделі реконструкції індивідуалізованих доз опромінення суб'єктів Державного реєстру України (ДРУ) осіб, які постраждали внаслідок Чорнобильської катастрофи і проживають на радіоактивно забрудненій території Коростенського району Житомирської області, та розрахунок доз опромінення для цих осіб.

Матеріали та методи дослідження. У роботі представлено еколого-дозиметричну модель, розроблену з метою індивідуалізації доз опромінення жителів Коростенського району Житомирської області, що зареєстровані у ДРУ. Модель базується на результатах радіоекологічного та дозиметричного моніторингу, які мали місце у 1986–2013 рр. на території північних областей України. Річна доза за кожний післяаварійний рік складається з двох компонентів: річної ефективної дози зовнішнього гамма-опромінення (за рахунок радіоактивних випадіння на ґрунті) і внутрішнього опромінення всього тіла (за рахунок споживання забруднених радіоактивними ізотопами продуктів харчування). Для 1986 року доза внутрішнього опромінення вираховується від усіх основних радіонуклідів радіоактивного аварійного викиду, а після 1987 р. – лише від радіоізотопів цезію (¹³⁴Cs та ¹³⁷Cs). При параметризації моделі враховується попередній досвід з розробки комплексу еколого-дозиметричних моделей для оцінки референтних доз опромінення населення України.

Результати та висновки. Індивідуалізовані дози зовнішнього і внутрішнього опромінення (річні та накопичені) оцінені для населення різних вікових груп, яке проживає у населених пунктах (НП) Коростенського району (всього близько 100 НП). Окремо представлено дози для сільських НП району і для м. Коростень за кожний рік післяаварійного періоду 1986–2016 рр. Наведені оцінки доз, накопичених за перші 15 післяаварійних років, за період 2000–2016 рр. та за 30-річний період після аварії. Середня доза, накопичена за 30 років після аварії на ЧАЕС жителями сільських НП Коростенського району, оцінена на рівні 19,8 мЗв, а для мешканців м. Коростень – 20,9 мЗв. При умові постійного проживання у районі жителі ~ 66 % НП Коростенського району отримали накопичені за 30 років після аварії дози у інтервалі 5–20 мЗв. Для жителів ~ 25 % НП накопичена доза лежить у інтервалі 20–50 мЗв, а для 7 % НП – перевищує 50 мЗв.

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

Проблеми радіаційної медицини та радіобіології. 2017. Вип. 22. С. 126–146.

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

O. M. Ivanova¹✉, S. V. Masiuk¹, Z. N. Boiko¹, M. I. Chepurny¹, V. B. Gerasymenko¹, G. V. Fedosenko¹, V. V. Vasylenko¹, L. O. Lytvynets¹, V. O. Pikta¹, L. M. Kovgan², N. S. Zhadan², S. O. Tereshchenko³, I. G. Kravchenko³, G. I. Kortushin³, O. D. Marcenjuk³, A. G. Kukush⁴

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

³State Institution «Ukrainian Centre of Information Technologies and National Register» of Ministry of Health of Ukraine, Kramskogo str., 21a, Kyiv, 03115, Ukraine

⁴Taras Shevchenko National University of Kyiv, Volodymyrska str., 60, Kyiv, 01033, Ukraine

Reconstruction of individualized doses of subjects from the Ukrainian State Register – of Persons that Affected due to Chernobyl accident and reside in Korosten raion of Zhytomyr oblast

Study objective. To elaborate an ecological-dosimetric model of reconstruction individualized exposure doses of subjects from the State Register of Ukraine (SRU) – of persons, affected due to Chernobyl accident and reside at the radioactive contaminated territory of Korosten raion of Zhytomyr Oblast, and to calculate exposure doses for those persons.

Materials and methods. In the paper, an ecological-dosimetric model is presented which is elaborated in order to individualize exposure doses of people who reside in Korosten raion of Zhytomyr Oblast and are registered in SRU. The model is based on the results of radio-ecological and dosimetric monitoring held in the period of 1986–2013 at the territory of northern oblasts of Ukraine. Annual dose over each post-accidental year consists of the two components: (a) annual effective dose of external gamma exposure (due to radioactive fallout on the ground), and (b) internal exposure of the whole body (due to consumption of meal contaminated by radioactive isotopes). For 1986, the dose of internal exposure is evaluated out of all main radionuclides of radioactive accidental fallout, and after 1987 only for radioisotopes of caesium (¹³⁴Cs and ¹³⁷Cs). The parameterization of the model is based on the previous experience in working out a complex of ecological-dosimetric models for estimation of referent exposure doses of Ukrainian population.

Results and conclusions. Individualized doses of external and internal exposure (annual and accumulated) are estimated for the population of various age groups that resides in the settlements of Korosten raion (totally about 100 settlements). Separately the doses are presented for rural settlements of the raion and for the city of Korosten for each year of the post-accidental period of 1986–2016. Estimates of doses are given that were accumulated: (a) during 15 years just after the accident, (b) for the period of 2000–2016, and (c) for 30 year period after the accident. Mean dose accumulated for 30 years after the Chernobyl accident by residents of rural settlements of Korosten raion is estimated as 19.8 mSv, and for inhabitants of the Korosten city as 20.9 mSv. On condition of permanent residence in the raion, residents of about 66 % settlements of Korosten raion accumulated the doses in the interval 5–20 mSv during 30 years after the accident. For the residents of about 25 % settlements the accumulated dose is in the interval 20–50 mSv, and for 7 % of settlements it exceeds 50 mSv.

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

Проблеми радіаційної медицини та радіобіології. 2017. Вип. 22. С. 126–146.

ВСТУП

Коростенський район Житомирської області належить до північного регіону України (західний слід), який найбільш постраждав внаслідок аварії на Чорнобильській АЕС. Середня щільність випадень ¹³⁷Cs чорнобильського походження у населених пунктах (НП) району в 1986 р. становила 117 кБк·м². Найбільш забрудненими були села Вороневе та Чигирі

INTRODUCTION

Korosten raion of Zhytomyr Oblast belongs to northern part of Ukraine (western footprint) that mostly suffered after the Chernobyl accident. Mean density of ¹³⁷Cs fallout of Chernobyl origin in inhabited settlements of the raion in 1986 constituted 117 kBq·m². The most contaminated were the villages Voroneve and Chygyri (~560 kBq·m²), and the less contami-

(~ 560 кБк·м²), а найменш забрудненими – села Купеч, Рудня та Олександрівка (~ 25 кБк·м²). Щільність випадінь ⁹⁰Sr в НП району у 1986 році коливалась в межах 1,5–16 кБк·м² (середнє значення 8,1 кБк·м²).

У період 1991–2013 рр. в Коростенському районі в рамках програми Загальнодозиметричної паспортизації [1] проводився щорічний моніторинг молока і картоплі приватних господарств на вміст радіоізоотопів цезію та стронцію, а також моніторинг вмісту радіоцезію в організмі жителів з використанням лічильників випромінювання людини (ЛВЛ) [2], розраховувалась паспортна доза НП [3, 4]. Вимірювання проводились практично у всіх НП району. У таблиці 1 представлено для порівняння паспортні дози НП Коростенського району і всіх НП України, включених у програму Загальнодозиметричної паспортизації.

Зазначимо, що паспортні дози, які є середньозваженими за професійно-віковою структурою мешканців НП, враховують середньостатистичний режим поведінки населення, але не враховують вік особи, її приналежність до соціально-професійної групи та інші особисті характеристики. Ці дози мають достатньо високий рівень консервативності і призначені виключно для підтримки рішень, що приймаються державними органами згідно з діючим законодавством. Враховуючи принципово неіндивідуалізований характер цих доз, використання їх у епідеміологічних дослідженнях неприпустимо.

У Державному Реєстрі України осіб, які постраждали внаслідок Чорнобильської катастрофи (ДРУ), що функціонує в Україні з 1992 р., накопичується інформація щодо стану здоров'я мешканців радіоактивно забруднених територій України. Поряд з медичними даними зберігаються дані про місце про-

nated were the villages Kupech, Rudnya, and Oleksandrivka (~25 кВq·м²). The density of ⁹⁰Sr fallout in settlements of the raion in 1986 varied in the range 1.5–16 кВq·м², with mean 8.1 кВq·м².

In the period of 1991–2013 in Korosten raion in the frame of the general dosimetric passportization Program [1], the annual monitoring of the content of cesium and strontium radioisotopes in the milk and potato from private farms, as well as the monitoring of radiocesium content in the body of inhabitants with usage of whole body counters (WBC) were held [2], and a passport dose for the settlements was calculated [3, 4]. Measurements were performed almost in all settlements of the raion. Table 1 compares all passport doses for the settlements of Korosten raion and for all Ukrainian settlements included in the general dosimetric passportization Program.

Notice that passport doses, which are weight-average according to professional-age structure of settlements' residents, take account for typical behavioral regime of the population but do not take into account an age of a person, his/her belonging to a social-professional group and other personal characteristics. The doses are rather conservative and intended solely for support of decisions taken by state authorities according to the acting legislation. Due to essentially non-individualized nature of those doses, its usage in epidemiological investigations is inadmissible.

In the State Register of Ukraine of persons affected due to Chornobyl accident (SRU), which is acting in Ukraine since 1992, the information is accumulated concerning level of health of residents in radioactively contaminated territories of Ukraine. Together with medical data, the data are preserved

Таблиця 1

Відносний (%) розподіл НП, де проводився радіоекологічний і дозиметричний моніторинг в рамках програми Загальнодозиметричної паспортизації за інтервалами паспортних доз.

Table 1

Relative (in %) distribution of settlements, where the radio-ecological and dosimetric monitoring was held in the frame of the general dosimetric passportization Program, by intervals of passport doses.

Рік	НП Коростенського району Settlements of Korosten raion				Всі паспортизовані НП України All Ukraine settlements			
	Інтервал паспортних доз, мЗв / interval of passport doses, mSv							
	≤ 0,5	0,5–1	1–5	>5	≤ 0,5	0,5–1	1–5	>5
Відносна (%) кількість НП / relative (in %) number of settlements								
1991	36,6	45,4	18,0	–	51,4	15,5	30,6	2,5
1996	88,4	7,1	4,5	–	59,5	15,4	24,8	0,3
2001	91,0	4,5	4,5	–	66,7	14,3	18,8	0,2
2006	90,2	5,3	4,5	–	82,0	14,4	3,5	0,1
2011	94,2	4,8	1,0	–	93,6	5,1	1,3	–

живання особи, її вік і соціальний статус, історію проходження диспансеризацій. Так, наприклад, у Коростенському районі Житомирської області на сьогодні зареєстровано 35,2 тис. осіб, більшість з яких (~94 %) було прийнято на облік ще у 1996 р. У період 1987–2010 рр. щорічно більше 50 % зареєстрованих осіб Коростенського району проходили медичні огляди, під час яких встановлювалась група обліку, за якою можна визначити, чи продовжує особа перебувати на обліку, чи вона знята з обліку (з причини зміни місця проживання або смерті). На теперішній час накопиченої у ДРУ інформації достатньо для розрахунку індивідуалізованих доз населення, яке мешкає у НП Коростенського району.

З іншого боку, в лабораторії радіологічного захисту ННЦРМ з 1986 р. функціонує Центральний еколого-дозиметричний реєстр (ЦЕДР), де зберігаються дані радіоекологічного і дозиметричного моніторингу, який проводився у Коростенському районі в 1986–2013 рр. За цей час було виконано приблизно 15 тис. і 3,5 тис. вимірів радіоцезію у молоці та картоплі, відповідно. Кількість вимірів вмісту радіостронцію становить приблизно 1,1 тис. ЛВЛ-вимірювання виконані у ~ 31,5 тис. осіб, які мешкають в сільських НП району та у 29 тис. осіб, які проживають у місті Коростень. Ця інформація дозволяє отримати референтні оцінки параметрів моделей розрахунку індивідуалізованих доз жителів Коростенського району.

У попередніх роботах [5,6] було представлено структуру та параметризацію еколого-дозиметричних моделей, розроблених для реконструкції індивідуалізованих доз суб'єктів ДРУ дев'яти радіоактивно-забруднених районів північних областей України. Моделі зовнішнього і внутрішнього опромінення населення Коростенського району, що розглядаються у даному повідомленні, враховують попередній досвід індивідуалізації доз та специфіку умов проживання та життєдіяльності мешканців зазначеного району.

При індивідуалізації доз суб'єктів ДРУ було використано результати, представлені у [7–13]. У роботі використовувалися дозові коефіцієнти та періоди біологічного напіввиведення радіонуклідів з організму людини, рекомендовані Публікацією МКРЗ 67 [14].

Підходи, моделі та їх параметри, що використовувалися для індивідуалізації доз опромінення осіб з ДРУ Коростенського району Житомирської області є районно-специфічними і визначаються, якістю та

about residence of a person, his/her age and social status, and history of undergoing prophylactic medical examination. E.g. in Korosten raion of Zhytomyr Oblast, for today it is registered 35.2 thousand persons, most of which (~94 %) were registered yet in 1996. Annually in the period of 1987–2010 more than 50 % of registered persons from Korosten raion had a medical examination. During the examination, a group of registration was established that indicated whether the person continued to be registered or he/she should be taken out of registration (because of changing the residence or death). Nowadays the information accumulated in SRU is enough to calculate individualized doses for the residents of the settlements of Korosten raion.

On the other side, since 1986 the Central Ecological-Dosimetric Register (CEDR) is functioning in the laboratory of radiological protection of NRCRM, where the data are stored of radio-ecological and dosimetric monitoring held in Korosten raion in 1986–2013. During that period ~15,000 and ~3500 of measurements of radiocesium were made in milk and potato, respectively. The number of measurements of radio-strontium content is about 1100. WBC measurements were made for ~31,500 persons residing in rural settlements of the raion and 29 thousand persons residing in the city of Korosten. This information makes it possible to get reference estimates of the model parameters for calculation of individualized doses for residents of Korosten raion.

In previous papers [5, 6] it was presented the structure and parameterization of ecological-dosimetric models elaborated for the reconstruction of individualized doses for subjects of SRU residing in nine radio-contaminated raions of northern oblasts of Ukraine. Models of external and internal exposure for the population of Korosten raion, which are considered in present communication, take account for the previous experience of the dose individualization and peculiarity of residence conditions and vital activity of inhabitants of the raion.

Results presented in [7–13] have been used for the dose individualization of the SRU subjects. In the present paper there were used the dose coefficients and periods of biological half-elimination of radionuclides from human body, that were recommended by ICRP Publication 67 [14].

Approaches, models and their parameters, which were used for the individualization of exposure doses for the SRU persons from Korosten raion of Zhytomyr Oblast, are raion-specific and

повнотою радіоекологічного і дозиметричного моніторингу, що проводилися на території району в період 1986–2013 рр.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Розробка еколого-дозиметричної моделі реконструкції індивідуалізованих доз опромінення суб'єктів ДРУ, які проживають на радіоактивно-забрудненій території Коростенського району Житомирської області, та розрахунок доз опромінення для цих осіб.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

Загальні співвідношення моделі індивідуалізації доз

Річна доза за T -й рік опромінення усього тіла $D_{i,j}^T$ (мЗв/рік) суб'єкта i , що проживає у j -му НП Коростенського району представляється у вигляді двох складових:

$$D_{i,j}^T = D_{i,j}^{ext,T} + D_{i,j}^{ing,T} \tag{1}$$

де $D_{i,j}^{ext,T}$ та $D_{i,j}^{ing,T}$ – річні ефективні дози зовнішнього гамма-опромінення (за рахунок радіоактивних випадів на ґрунті) та внутрішнього опромінення всього тіла (за рахунок споживання забруднених радіоактивними ізотопами продуктів харчування). Доза зовнішнього опромінення у період 1986–2016 рр. і доза внутрішнього опромінення у 1986 р. вираховуються від усіх основних радіонуклідів радіоактивного аварійного викиду. Доза внутрішнього опромінення після 1986 р. оцінюється лише з урахуванням внеску від радіоізоотопів цезію (^{134}Cs та ^{137}Cs), оскільки внесок інших радіоізоотопів Чорнобильського викиду, зокрема ^{90}Sr , ^{106}Ru , $^{144}\text{Ce} + ^{144}\text{Pr}$, у цей період є незначним порівняно з ^{134}Cs та ^{137}Cs [9, 13, 15–17].

Починаючи з 1987 р. річна доза $D_{i,j}^{ing,T}$ внутрішнього опромінення i -го суб'єкта, який проживав у j -му НП, представляється як сума доз від ^{134}Cs та ^{137}Cs , відповідно $D_{i,j}^{Cs7,T}$ та $D_{i,j}^{Cs4,T}$:

$$D_{i,j}^{ing,T} = D_{i,j}^{Cs7,T} + D_{i,j}^{Cs4,T} \tag{2}$$

Індивідуалізована доза опромінення i -го суб'єкта ДРУ Коростенського району у T -му році відповідає середній дозі, яку у НП проживання суб'єкта ДРУ отримують представники вікової (або гендерно-вікової) групи, до якої у даному році T належить цей суб'єкт ДРУ. Накопичена доза кожного суб'єкта ДРУ визначається як сума річних доз, розрахованих для цього суб'єкта за

settled by the quality and completeness of radioecological and dosimetric monitoring held at the territory of the raion in the period of 1986–2013.

OBJECTIVE

Elaboration of an ecological-dosimetric model for the reconstruction of individualized exposure doses for SRU subjects residing at the radioactively-contaminated territory of Korosten raion of Zhytomyr Oblast, and calculation of exposure doses for those persons.

MATERIALS AND METHODS

General relations of the model for the dose individualization

Annual dose of the whole body exposure for year T $D_{i,j}^T$ (mSv/year) of subject i , which resides in the settlement j of Korosten raion is decomposed as

where $D_{i,j}^{ext,T}$ and $D_{i,j}^{ing,T}$ are annual effective doses of external gamma exposure (due to radioactive fallouts on the ground) and internal exposure of the whole body (due to consumption of meal contaminated by radioactive isotopes), respectively. The dose of external exposure in the period 1986–2016 and the dose of internal exposure in 1986 are calculated from all major radionuclides of accidental release. The dose of internal radiation after 1986 is estimated only taking into account the contribution from radioisotopes of cesium (^{134}Cs and ^{137}Cs), because the contribution of other radioactive isotopes of the Chernobyl release, in particular ^{90}Sr , ^{106}Ru , $^{144}\text{Ce} + ^{144}\text{Pr}$, during this period is negligible compared to ^{134}Cs and ^{137}Cs [9, 13, 15–17].

Starting from 1987, annual dose $D_{i,j}^{ing,T}$ of internal exposure for subject i residing in settlement j is represented as a sum of doses from ^{134}Cs and ^{137}Cs , respectively $D_{i,j}^{Cs7,T}$ and $D_{i,j}^{Cs4,T}$:

The individualized exposure dose of SRU subject i from Korosten raion in year T corresponds to a mean dose, which get in the settlement of the residence of the subject the representatives of the age (or gender-age) group to which in the year T the subject belongs. Accumulated dose of each SRU subject is determined as a sum of annual doses calculated for this subject for the period of residence

період проживання у районі, і враховує результати радіоекологічного та дозиметричного моніторингів в цьому НП, або у районі за час (роки) можливого опромінення.

Моделі, що використовуються для реконструкції доз внутрішнього опромінення усього тіла у період 1987–2016 рр. є виражено районно-специфічними як за структурою, так і за параметрами. Це обумовлено тим, що починаючи з 1987 р., специфіка дозоутворення від внутрішнього опромінення для населення визначалася показниками, які мають суто районну специфіку, а саме: рівнями забруднення радіоцезієм продуктів харчування, проведенням сільськогосподарських контрзаходів, коефіцієнтом переходу ґрунт-рослинність-молоко.

Модель реконструкції дози зовнішнього опромінення

У загальному формалізованому вигляді доза зовнішнього опромінення за T -й рік ($D_{i,j}^{ext,T}$) суб'єкта i , що проживав у j -му НП Коростенського району [4,9–11,15] оцінюється за допомогою співвідношення:

$$D_{i,j}^{ext,T} = k_{dos}^{ext,a} \cdot K_{bih}^a \cdot \sigma_{Cs,j}^{86} \cdot \int_0^T \tilde{d}^{ext}(t) dt \quad (3)$$

де $k_{dos}^{ext,a}$ – залежний від віку (a) коефіцієнт переходу від потужності поглинутої дози у повітрі (ППД) до ефективної дози в тілі людини ($Зв \cdot Гр^{-1}$); K_{bih}^a – коефіцієнт режиму поведінки представників професійно-вікової групи a , до якої належить i -й суб'єкт (b/p); $\sigma_{Cs,j}^{86}$ – щільність випадінь ^{137}Cs на ґрунті для даного j -го НП, у 1986 р. ($кБк \cdot м^{-2}$); $\tilde{d}^{ext}(t)$ – референтна функція ППД від усіх r -х радіонуклідів, що присутні на момент часу T у випадіннях, нормована на одиницю щільності випадінь ^{137}Cs на ґрунті: ($nГр \cdot с^{-1}$ на $1 кБк \cdot м^{-2}$).

Функція $\tilde{d}^{ext}(t)$ оцінюється для кожного радіонукліду Чорнобильського викиду на території України і враховує такі параметри та функції, як: відношення концентрації r -го радіонукліду до ^{137}Cs у випадіннях на ґрунті; ППД, що обумовлена одиницею випадінь r -го радіонукліду на ґрунт; стала радіоактивного напіврозпаду r -го радіонукліду, функція часової динаміки послаблення ППД від ^{137}Cs за рахунок вертикальної міграції радіоцезію у ґрунті. У таблиці 2 наведені числові значення функції $\tilde{d}^{ext}(t)$, розраховані для періоду 1986–2016 рр. з урахуванням зазначених параметрів [10, 11].

in the raion, and it takes account for results of radio-ecological and dosimetric monitorings in this settlement or in the raion for the years of possible exposure.

The models used to reconstruct the doses of internal exposure of the whole body in the period of 1987–2016 are considered as raion-specific both by the structure and by the parameters. This is because starting from 1987 the construction of internal exposure doses for the population was determined by indicators which has exclusively raion's peculiarity, namely as follows: level of meal contamination by radiocesium, conducting agricultural counteractions, transfer factor ground-vegetation-milk.

Model of external exposure dose reconstruction

In a general formalized form, the external exposure dose for year T ($D_{i,j}^{ext,T}$) of subject i residing in settlement j of Korosten raion [4, 9–11, 15] is estimated as

where $k_{dos}^{ext,a}$ is age-dependent (a) conversion factor from gamma dose in air to effective dose in human body ($Sv \cdot Gy^{-1}$); K_{bih}^a is the behavior factor for members of age-professional group a , to which subject i belongs (dimensionless); $\sigma_{Cs,j}^{86}$ is ^{137}Cs activity per unit area on the ground of the settlement j in 1986 ($kBq \cdot m^{-2}$); $\tilde{d}^{ext}(t)$ is reference gamma exposure rate in air function at a height of 1 m above an open area resulting from all radionuclides presented at the time moment T in the fallouts, which is normalized by ^{137}Cs activity per unit area on the ground ($pGy \cdot s^{-1}$ per $1 kBq \cdot m^{-2}$).

The function $\tilde{d}^{ext}(t)$ is estimated for each radionuclide of the Chornobyl fallout at the territory of Ukraine and takes account for the following parameters and functions: deposition of radionuclide r relative to deposition of ^{137}Cs in fallouts on the ground; external gamma-exposure rate due to radionuclide r normalized to unit activity of radionuclide r on the ground; a radioactive decay constant for radionuclide r ; attenuation function of external gamma-exposure rate due deposited radionuclide r as the result of its vertical migration into the soil. Table 2 contains numerical values of the function $\tilde{d}^{ext}(t)$ calculated for the period of 1986–2016 taking into account abovementioned parameters [10, 11].

Таблиця 2

Значення ППД у повітрі на одиницю активності ^{137}Cs на ґрунті $\tilde{d}^{ext}(t)$.

Table 2

External gamma-exposure rate in air to unit of ^{137}Cs activity on the ground $\tilde{d}^{ext}(t)$ values.

Рік / year	$\tilde{d}^{ext}(t)$ (мкГр·рік ⁻¹ на кБк·м ⁻²) (μGy·year ⁻¹ per kBq·m ⁻²)	Рік / year	$\tilde{d}^{ext}(t)$ (мкГр·рік ⁻¹ на кБк·м ⁻²) (μGy·year ⁻¹ per kBq·m ⁻²)
1986*	131	2002	6,3
1987	40	2003	6,0
1988	26	2004	5,8
1989	20	2005	5,6
1990	16	2006	5,4
1991	13	2007	5,2
1992	12	2008	5,1
1993	10	2009	4,9
1994	9,6	2010	4,8
1995	8,9	2011	4,6
1996	8,4	2012	4,5
1997	7,9	2013	4,3
1998	7,5	2014	4,1
1999	7,2	2015	4,0
2000	6,9	2016	3,9
2001	6,5		

Примітка. *Враховується інтервал часу з 26.04.86 до 31.12.86.

Note. *It is taken into account the time interval from 26.04.86 till 31.12.86.

Числове значення коефіцієнта режиму поведінки K_{bih}^a для i -го суб'єкту ДРУ у рівнянні (3) залежить від типу НП, де проживає особа з ДРУ (міський, сільський), її віку та соціально-професійної групи. Така інформація зберігається у відповідних полях бази даних ДРУ. У таблиці 3 наведені прийняті при розрахунках професійні групи дорослих і відповідні референтні значення коефіцієнтів режиму поведінки K_{bih}^a , а також значення K_{bih}^a для п'яти вікових груп дітей окремо для мешканців сільських НП Коростенського району та для м. Коростень.

При визначенні коефіцієнтів режиму поведінки K_{bih}^a для тієї чи іншої особи з ДРУ згідно з таблицею 3 приймаються наступні припущення.

- Тип НП вважається міським, якщо особа проживала у місті. У інших випадках (сmt, село, селище) тип НП вважається сільським.
- Припускається, що в НП сільського типу жителі (дорослі і діти) проживають у дерев'яних будинках, а робітники, які працюють всередині приміщення працюють у цегляних будинках. У міських населених пунктах жителі проживають і працюють у цегляних будинках.
- Якщо професійна група особи формулюється як «студент», то використовуються значення коефіцієнтів режиму поведінки K_{bih}^a для вікової групи «діти 8–18 років».

Numerical value of the behavior factor K_{bih}^a for SRU subject i in equation (3) depends on the type of settlement (urban or rural), his/her age and social-professional group. Such information is preserved in the fields of the SRU database. Table 3 presents professional adult groups accepted in calculations and corresponding reference values of K_{bih}^a , and also the values of K_{bih}^a for five age groups of children, separately for residents of rural settlements of Korosten raion and for the city of Korosten.

In determining of behavior factors K_{bih}^a for a person from SRU according to Table 3, the following assumptions are made.

- A type of settlement is assumed urban if the person resided in a city. In other cases (urban community, village, or small village) a type of settlement is assumed rural.
- It is assumed that in rural settlements the inhabitants (adults and children) are living in wooden houses, and workers who are working inside, they are actually working in brick houses. In urban settlements the inhabitants are living and working in brick houses.
- If a professional group is stated as 'student' then the value of K_{bih}^a is used for the age group 'children of age 8–18'.

Таблиця 3

Значення коефіцієнтів режиму поведінки K_{bih}^a для різних професійних груп дорослих (особи старші 18 років) для НП сільського і міського типів Коростенського району [10, 11].

Table 3

Values of behavior factors K_{bih}^a for various professional groups of adults (i.e., persons older than 18) for settlements of rural and urban types of Korosten raion [10, 11].

№ / #	Професійна група / professional group	Коефіцієнт поведінки / behavior factor K_{bih}^a	
		село / rural	місто \ urban
1	Робітник / worker	0,26	0,14
2	С/г робітник / farm worker	0,40	0,23
3	Службовець / employee	0,26	0,14
4	Пенсіонер (за віком, за станом здоров'я) / pensioner (by age or level of health)	0,26	0,14
5	Домогосподарка / housewife	0,26	0,14
6	Особа вільної професії або група невідома / freelancer or group is unknown	0,28	0,13
7	Дитина у віці / a child in the age *	< 1 року / year	0,14 (0,16)
		1–2 роки / years	0,15 (0,18)
		3–7 років / years	0,17 (0,21)
		8–18 років / years	0,21 (0,23)

Примітка. *Для дитячих вікових груп розглядаються два часові періоди: 1986–1987 рр. і 1988–2016 рр. Значення для K_{bih}^a для другого періоду наведено у дужках.
Note. *For children's age groups, two time periods are considered: 1986–1987 and 1988–2016. The value of K_{bih}^a for second period is given in parenthesis.

➤ У випадку відсутності позначки про професійну групу в БД ДРУ, її відновлення відбувається наступним чином:

- якщо у поточний рік особа була молодша 18 років, використовуються дані таблиці 3;
- якщо у поточному році особа мала вік старше 18 років, то для проживаючих у селі вона розглядається як «с/г робітник», для проживаючих у місті – «робітник».

У таблиці 4 наведені коефіцієнти переходу від ППД у повітрі до ефективної дози на все тіло $k_{dos}^{ext,a}$ у (3) для п'яти вікових груп [10].

➤ In case where a professional group is not marked in the SRU database, its reconstruction is made as follows:

- if the person was younger than 18 in the current year, the data of Table 3 are used.
- if the person was older than 18 in the current year, then for rural residents he/she is qualified as 'farm worker', and for urban residents as 'worker'.

Table 4 presents coefficients $k_{dos}^{ext,a}$, which are given in (3), of conversion factor from gamma dose in air to effective dose in human body for five age groups [10].

Таблиця 4

Значення залежних від віку коефіцієнтів переходу від ППД у повітрі до ефективної дози у тілі людини $k_{dos}^{ext,a}$ (Зв·Гр⁻¹).

Table 4

Values of age-dependent conversion factor from gamma dose in air to effective dose in human body $k_{dos}^{ext,a}$ (Sv · Gy⁻¹).

Вік (роки) / age (years)	< 2	3–7	8–12	13–18	>18)
Зв·Гр ⁻¹	1	0.82	0.82	0.77	0.77

Модель реконструкції дози внутрішнього опромінення

Модель формування дози внутрішнього опромінення у 1986 р. детально представлена у [7–9, 15], тому у даному повідомленні нема потреби детально зупинятись на опису моделі. Зауважимо лише, що ефективні дози внутрішнього опромінення у 1986 р. були оцінені для 14 радіонуклідів аварійного викиду.

Model of internal exposure dose reconstruction

The model of forming internal exposure doses accumulated in 1986 is presented in detail in [7–9, 15]; therefore, there is no need to describe the model thoroughly. Notice only that effective internal exposure doses accumulated in 1986 were estimated for 14 radionuclides of the accidental fallout. The estimate of annu-

Оцінка річної ефективної дози внутрішнього опромінення усього тіла для дорослих на одиницю випадіння ^{137}Cs в НП (без урахування внеску ^{131}I) складала $19,7 \text{ мкЗв}$ на $1 \text{ кБк}\cdot\text{м}^{-2}$ ^{137}Cs на ґрунті і приблизно на 90 % обумовлювалась радіонуклідами ^{137}Cs і ^{134}Cs . З урахуванням внеску в ефективну дозу опромінення від ^{131}I , її оцінка становить 63 мкЗв на $1 \text{ кБк}\cdot\text{м}^{-2}$ ^{137}Cs [15].

Модель реконструкції доз внутрішнього опромінення суб'єктів ДРУ починаючи з 1987 р.

Для реконструкції індивідуалізованої дози суб'єкта ДРУ, який проживає в j -му НП Коростенського району у T -й рік після аварії використовуються:

- > НП-специфічна функція часової динаміки ^{137}Cs у молоці – $c_j^{\text{milk}}(t)$;
- > абсолютний молочний еквівалент раціону для дорослих жителів Коростенського району $ARME^T$ (л/доба), який залежить від часу, що пройшов після Чорнобильської аварії, і визначається як кількість коров'ячого молока, споживання якого забезпечує таке ж надходження радіоцезію в організм жителів, як і весь раціон;
- > відносне вік-залежне надходження ^{137}Cs з раціоном жителів району RRI_a , що визначається як відношення надходження радіоцезію з раціоном у представників вікової групи a до надходження радіоцезію з раціоном дорослих.

Параметри моделі та доза внутрішнього опромінення спочатку оцінюються для дорослих мешканців району. Після чого розраховується річна доза внутрішнього опромінення для дітей віку a ($D_j^{a,T}$) з використанням дози для дорослих $D_j^{ad,T}$:

$$D_j^{a,T} = D_j^{ad,T} \cdot RRI_a \cdot k_a^{dos} / k_{ad}^{dos} \quad (5)$$

де k_a^{dos} , k_{ad}^{dos} – доза на одиницю надходження (дозовий коефіцієнт) для вікової групи a або дорослих (таблиця 5), відповідно (Зв/Бк).

Таблиця 5

Доза внутрішнього опромінення k_a^{dos} і k_{ad}^{dos} від ^{137}Cs та ^{134}Cs на одиницю надходження для різних вікових груп [9].

Table 5

Internal exposure dose k_a^{dos} and k_{ad}^{dos} from ^{137}Cs and ^{134}Cs on a unit of intake for various age groups [9].

Радіонуклід / radionuclide	k_a^{dos} , k_{ad}^{dos} (Зв·Бк ⁻¹) для вікової групи, роки / (Sv·Bq ⁻¹) for age group, years				
	0–2	3–7	8–12	13–17	> 18
^{137}Cs	1,00E-08	8,30E-09	9,10E-09	1,20E-08	1,30E-08
^{134}Cs	1,30E-08	1,10E-08	1,30E-08	1,70E-08	1,70E-08

Процедура відновлення дози $D_j^{ad,T}$ суттєво залежить від наявності та об'єму ЛВЛ- та молочного

al effective internal exposure dose of the whole body for adults on a unit of ^{137}Cs depositions in settlement (neglecting the contribution of ^{131}I) constituted $19.7 \mu\text{Sv}$ per $1 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-2}$ of ^{137}Cs on the ground and it was up to ~ 90 % stipulated by radio nuclides ^{137}Cs and ^{134}Cs [15]. Taking into account the contribution to the effective exposure dose from ^{131}I , its estimation is $63 \mu\text{Sv}$ per $1 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-2}$ of ^{137}Cs .

Model of internal exposure dose reconstruction for SRU subjects since 1987

To reconstruct individualized dose of SRU subject residing in the settlement j from Korosten raion in year T after the accident we use the following:

- > settlement-specific function of time dynamics of ^{137}Cs in milk, $c_j^{\text{milk}}(t)$;
- > absolute milk equivalent of diet for adult residents of Korosten raion, $ARME^T$ (L/day), which depends on time after the Chornobyl accident and is defined as such a quantity of cow milk that it supplies the same intake of radio cesium to inhabitant's organism as a total diet;
- > relative age-dependent intake of ^{137}Cs with diet of residents of the raion, RRI_a , which is defined as a ratio of radio cesium intake with diet for representatives of children age group a to radio cesium intake with diet of adults.

The model parameters and the internal exposure dose are estimated for adult residents of the raion. After that it is calculated the annual internal exposure dose for children of age a , $D_j^{a,T}$, using the dose for adults, $D_j^{ad,T}$:

where k_a^{dos} , k_{ad}^{dos} (Sv/Bq) is the dose on a unit of intake (i.e. dose coefficient) for age group a or for adults (see Table 5), respectively.

The reconstruction procedure of the dose $D_j^{ad,T}$ depends significantly from the scope of WBC and

моніторингові в цьому НП. Так, при наявності достатньої кількості ЛВЛ-вимірювань $N_{ad,j}^{ЛВЛ,T}$ у j -му НП в T -му році у дорослих ($N_{ad,j}^{ЛВЛ,T} > 10$), доза $D_j^{ad,T}$ оцінюється безпосередньо за результатами ЛВЛ-вимірювань так, що:

$$D_j^{ad,T} = \bar{q}_j^{ad,T} \cdot k_{ad}^{dos} \cdot \Delta T \quad (6)$$

де $\Delta T = 365$ діб; $\bar{q}_j^{ad,T}$ – середнє значення надходження ^{137}Cs з раціоном у дорослих жителів j -го НП у T -му році (Бк/доба). У свою чергу:

$$\bar{q}_j^{ad,T} = \frac{1}{N_{ad,j}^{ЛВЛ,T}} \sum_i (Q_{i,j}^{ad,T} \cdot \lambda_{ad}^{Cs}) \quad (7)$$

У (7) $Q_{i,j}^{ad,T}$ – вміст ^{137}Cs у організмі i -го дорослого жителя j -го НП, виміряний у T -й рік (Бк); λ_{ad}^{Cs} – стала напіввиведення цезію із організму дорослого (доба⁻¹).

Якщо у j -му НП Коростенського району проживання суб'єкта ДРУ у T -й рік ЛВЛ-моніторинг не проводився, але мав місце моніторинг вмісту радіоцезію у молоці, то річна доза внутрішнього опромінення для дорослих $D_j^{ad,T}$ розраховується з використанням НП-специфічної «молочної» функції часової динаміки концентрації ^{137}Cs у коров'ячому молоці $c_j^{milk}(t)$ (Бк/л) за співвідношенням:

$$D_j^{ad,T} = c_j^{milk}(t) \Big|_{t=T} \cdot ARME^T \cdot k_{ad}^{dos} \cdot \Delta T \quad (8)$$

де $c_j^{milk}(t) \Big|_{t=T}$ – середня концентрація ^{137}Cs в молоці, розрахована за функцією $c_j^{milk}(t)$ у момент $t = T$.

При недостатньому обсязі та періодичності як ЛВЛ, так і молочного моніторингу в j -му НП для оцінки дози $D_j^{ad,T}$ передбачене застосування процедури встановлення параметрів функції $c_j^{milk}(t)$ з використанням результатів молочного моніторингу в довколишніх НП. Структурна схема моделі реконструкції, розроблена для індивідуалізації доз опромінення суб'єктів ДРУ Коростенського району, представлена на рисунку 1.

Функція $c_j^{milk}(t)$ апроксимувалась наступною математичною формою:

$$c_j^{milk}(t) = a_j^{milk} \cdot (b_j \cdot \exp(-\lambda_{j1}^{milk} \cdot t) + (1 - b_j) \exp(-\lambda_{j2}^{milk} \cdot t)) \quad (9)$$

де a_j^{milk} , b_j , λ_{j1}^{milk} та λ_{j2}^{milk} – параметри, що оцінюються методом найменших квадратів

Усього «молочна» функція була оцінена для 109 НП Коростенського району. У селах Беги, Жабче, Мединівка та Нивки потужність «молочного»

milk monitorings in the settlement. Thus, if there is enough number of WBC measurements, $N_{ad,j}^{ЛВЛ,T}$, at the settlement j in year T for adults ($N_{ad,j}^{ЛВЛ,T} > 10$), then the dose $D_j^{ad,T}$ is estimated directly by the results of WBC measurements, such as:

with $\Delta T = 365$ days; $\bar{q}_j^{ad,T}$ is mean intake of ^{137}Cs with ration for adults of the settlement j in year T (Bq/day). And

Here in (7) $Q_{i,j}^{ad,T}$ is content of ^{137}Cs in the body of adult person i from the settlement j measured in year T (Bq); λ_{ad}^{Cs} is a constant of half-removal of cesium from the body of adult (day⁻¹).

If in the settlement j of Korosten raion, where the SRU subject resides, in year T the WBC monitoring was not held but it took place the monitoring of radiocesium content in milk, then annual internal exposure dose for adults, $D_j^{ad,T}$, is calculated using settlement-specific 'milk function' of time dynamics of ^{137}Cs concentration in cow milk, $c_j^{milk}(t)$ (Bq/L), as

where $c_j^{milk}(t) \Big|_{t=T}$ is mean concentration of ^{137}Cs in milk, which is evaluated by the function $c_j^{milk}(t)$ at moment $t = T$.

If the scope and periodicity of WBC are not sufficient, as well as of the milk monitoring in the settlement j , in order to estimate the dose $D_j^{ad,T}$ the special procedure of parameters reconstruction for the function $c_j^{milk}(t)$ is used. It is based on results of the milk monitoring in neighboring settlements. A structural scheme of the reconstruction model, which is elaborated for individualization of exposure doses for SRU subjects of Korosten raion, is presented in Picture 1.

The function $c_j^{milk}(t)$ was approximated by the formula

where a_j^{milk} , b_j , λ_{j1}^{milk} , and λ_{j2}^{milk} are parameters to be estimated by the Least Squares method.

Totally 'milk function' was estimated for 109 settlements of Korosten raion. In villages Behy, Zhabche, Medynivka, and Nyvky the power of

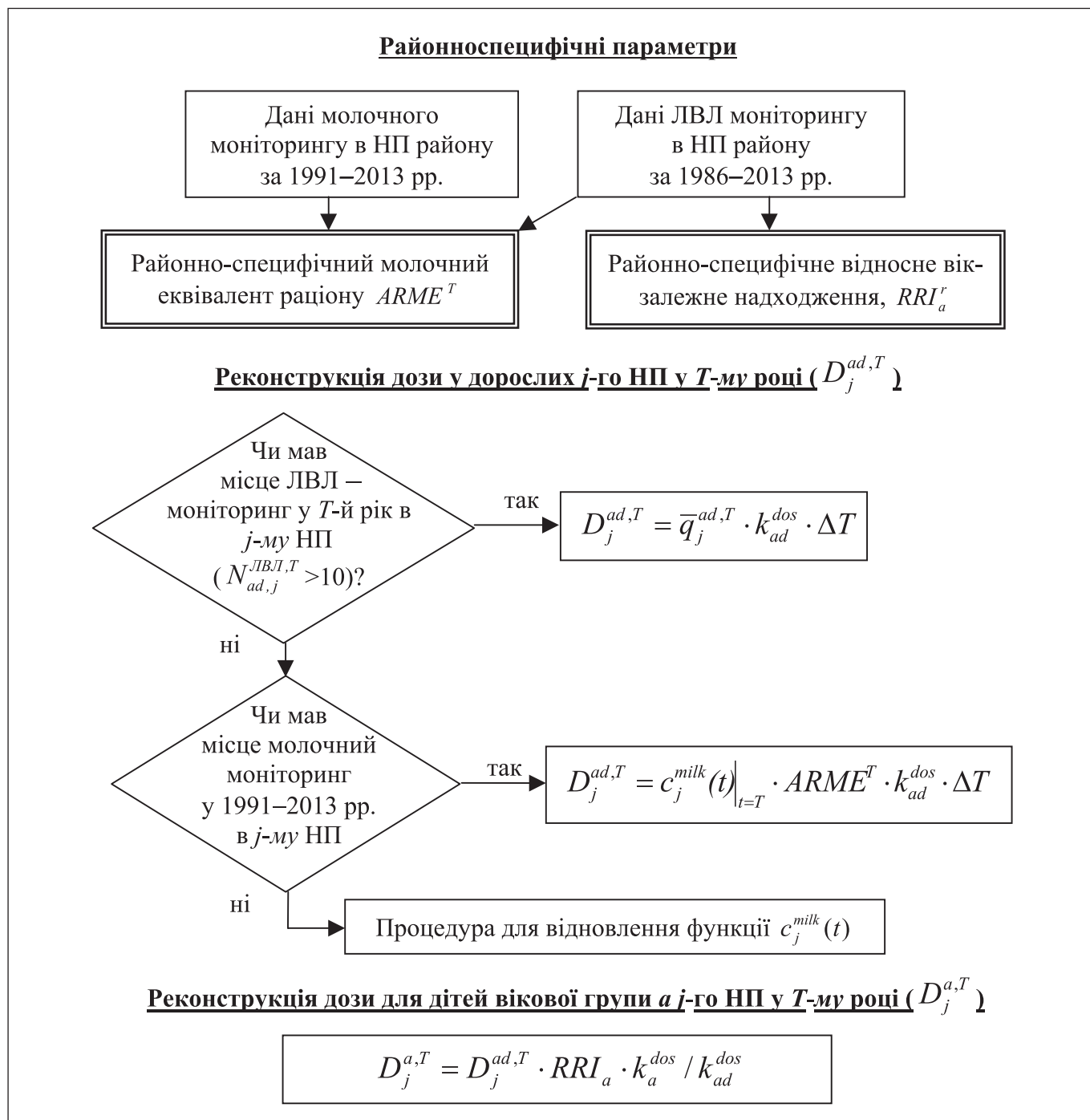


Рисунок 1. Загальна схема послідовності процедур в моделі реконструкції індивідуалізованих доз внутрішнього опромінення суб'єктів ДРУ, що проживають в НП Коростенського району.

моніторингу не задовольняла загальним умовам побудови функції $c_j^{milk}(t)$, і тому для кожного з цих НП функцію $c_j^{milk}(t)$ оцінювали з використанням результатів «молочного» моніторингу у прилеглих НП.

Чисельне значення абсолютного районного «молочного» еквіваленту раціону для дорослих жителів Коростенського району у поточному році T ($ARME^T$) визначається як середнє (зважає на кількість ЛВЛ-вимірювань) значення молочних еквівалентів раціону для дорослих ($\bar{w}_{i,j}^{T,ad}$), розрахованих для окремих ЛВЛ-вимірювань за співвідношенням:

milk monitoring did not satisfy general conditions for reconstruction of the function $c_j^{milk}(t)$, and therefore, for each of these settlements the function $c_j^{milk}(t)$ was estimated based on results of milk monitoring in neighboring settlements.

Numerical value of absolute raion 'milk' equivalent of the diet for adults of Korosten raion in current year T , $ARME^T$, is defined as mean value (i.e., weighted over the number of WBC measurements) of milk equivalents of the diet for adults, $\bar{w}_{i,j}^{T,ad}$, namely

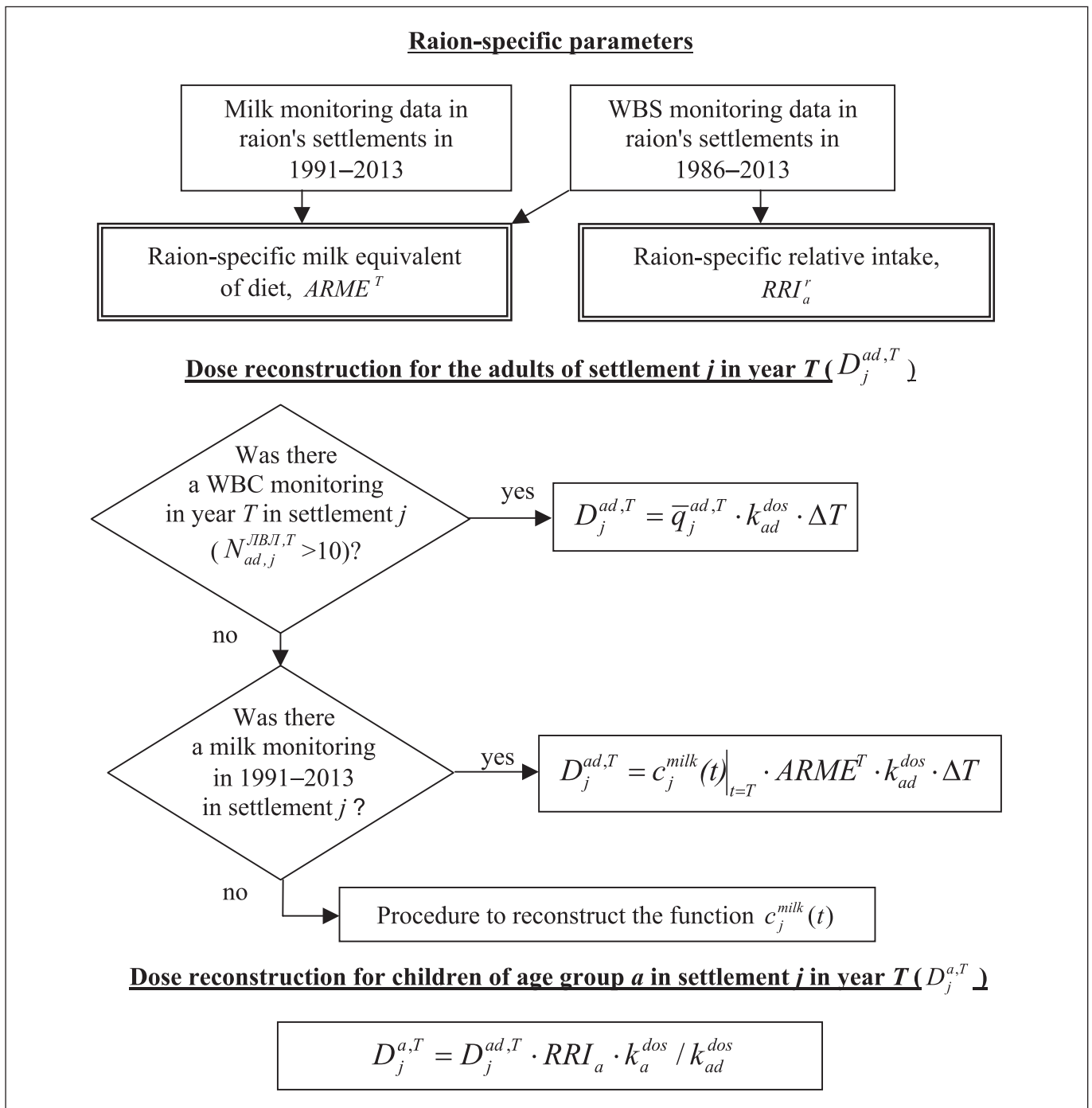


Figure 1. General scheme of a sequence of procedures in the model of reconstruction individualized internal exposure doses for SRU subjects residing in settlements of Korosten raion.

$$ARME^T = \frac{1}{N_{ad}^T} \sum_i \bar{w}_{i,j}^{T,ad} \quad (10)$$

де N_{ad}^T – кількість ЛВЛ-вимірювань в районі серед дорослих у поточний рік T . Значення $\bar{w}_{i,j}^{T,ad}$ оцінювалось як:

where N_{ad}^T is the number of WBC measurements among adults of the raion in current year T . The $\bar{w}_{i,j}^{T,ad}$ was estimated as

$$\bar{w}_{i,j}^{T,ad} = \frac{(Q_{i,j}^{ad,T} \cdot \lambda_{ad}^{Cs})}{c_j^{milk}(t)|_{t=T}} \quad (11)$$

де $Q_{i,j}^{ad,T}$ – вміст ^{137}Cs в організмі i -го дорослого жителя j -го НП у поточному році T .

where $Q_{i,j}^{ad,T}$ is ^{137}Cs content in organism of adult person I from settlement j in current year T .

При розрахунку брали до уваги дані моніторингу всіх НП розглядуваного району, незалежно від того, чи проживають у цих НП суб'єкти ДРУ. У таблиці 6 наведені статистичні характеристики параметру $ARME^T$, оцінені для жителів Коростенського району для кожного року з інтервалу 1987–2016 рр. Активність ^{137}Cs у організмі та концентрація ^{137}Cs у молоці, що подаються у таблиці 6, усереднені за роком, у який проводився ЛВЛ-моніторинг.

In calculation of it was taken account of monitoring data of all the settlements of the raion, regardless whether SRU subjects reside or not in those settlements. Table 6 presents statistical characteristics of the parameter $ARME^T$ estimated for residents of Korosten raion for each year of the interval 1987–2016. The ^{137}Cs activity in human organism and ^{137}Cs concentration in milk, which are presented in Table 6, are averaged in years when WBC monitoring was held.

Таблиця 6

Числові значення середньорайонних абсолютних молочних еквівалентів раціону $ARME^T$, оцінені окремо для жителів сільських НП Коростенського району і міста Коростень у період 1987–2013 рр.

Table 6

Numerical values of mean raion absolute milk equivalents of diet, $ARME^T$, estimated separately for residents of rural settlements of Korosten raion and the city of Korosten in the period of 1987–2013.

Рік / year	Села Коростенського району / villages of Korosten raion				м. Коростень / the city of Korosten			
	К-сть ЛВЛ-вимірювань Numb. of WBC meas.	Активність ^{137}Cs в організмі, Бк ^{137}Cs activity in organism, Bq	Концентрація ^{137}Cs у молоці, Бк/л ^{137}Cs concentration in milk, Bq/L	$ARME^T$, л-доба ⁻¹ / L-day ⁻¹ ArM STD	К-сть ЛВЛ-вимірювань Numb. of WBC meas.	Активність ^{137}Cs в організмі, Бк ^{137}Cs activity in organism, Bq	Концентрація ^{137}Cs у молоці, Бк/л ^{137}Cs concentration in milk, Bq/L	$ARME^T$, л-доба ⁻¹ // L-day ⁻¹ ArM STD
1987	60	21.346	104	1.84 2.09	731	3.766	220	0.11 0.17
1988	407	9.541	66	1.05 1.03	*			0.16 0.46
1989	*			0.80 1.32	*			0.16 0.46
1990	*			0.60 0.99	*			0.16 0.46
1991	363	1.640	32	0.44 0.54	350	3.955	108	0.23 1.31
1992	*			0.50 0.82	*			0.16 0.46
1993	*			0.60 0.99	*			0.16 0.46
1994	217	1.966	55	0.70 0.28	780	1.311	88	0.09 0.27
1995	3,867	2.539	22	0.73 2.17	216	1.817	84	0.14 0.14
1996	819	3.930	21	1.14 2.17	410	2.834	81	0.22 0.20
1997	1,381	4.576	29	1.18 0.93	1,984	2.740	79	0.22 0.20
1998	570	6.165	35	1.39 1.46	1,892	2.069	77	0.17 0.82
1999	901	4.326	32	0.94 0.78	615	1.314	75	0.11 0.15
2000	421	5.956	43	1.17 1.53	*			0.12 0.35
2001	353	3.277	24	1.11 1.53	205	1.697	72	0.15 0.18
2002	*			0.95 1.57	*			0.12 0.35
2003	358	3.530	45	0.78 0.93	483	1.242	70	0.11 0.35
2004	308	3.442	41	0.71 0.51	414	1.089	68	0.10 0.51
2005	306	3.634	35	1.08 0.88	53	811	67	0.08 0.06
2006	270	3.997	30	1.35 1.00	586	516	66	0.05 0.08
2007	478	3.286	30	1.04 0.67	1,016	1.423	64	0.14 0.13
2008	512	3.558	31	1.13 1.21	81	671	63	0.07 0.04
2009	*			1.10 1.82	*			0.16 0.46
2010	*			1.10 1.82	*			0.16 0.46
2011	441	1.899	27	0.66 0.64	641	2.404	60	0.25 0.35
2012	488	3.473	27	1.18 0.98	288	2.308	59	0.25 0.10
2013	338	3.162	31	1.08 1.15	84	2.755	58	0.30 0.30
2014-2016	*			0.97 1.62	*			0.27 0.78

Примітка. *Кількість ЛВЛ-вимірювань менше 20, приймалось експертне рішення щодо величини $ARME^T$.
Note. *Number of WBC measurements was less than 20, and expert decision was taken concerning the value of $ARME^T$.

Для розрахунку параметрів таблиці 6 відбирали дані, які задовольняють наступним умовам:

- вік особи, у якої проводились ЛВЛ-вимірювання, ≥ 18 ;
- населені пункти, кількість ЛВЛ-вимірювань, у яких в поточний рік ≥ 20 ;
- середня по НП концентрація ^{137}Cs в молоці в поточному році більше 10 Бк/л.

При недостатній кількості ЛВЛ-вимірювань у поточному році (менше 20 вимірювань) використовували узагальнені експертні оцінки $ARME^T$.

Відносне районно-специфічне міжвікове надходження радіоцезію з раціоном (RRI_a)

Параметр RRI_a використовується для розрахунку доз внутрішнього опромінення від радіоцезію для різних дитячих вікових груп. Введення параметру RRI_a базується на припущенні, що відносне надходження радіоцезію з раціоном між різними віковими групами дітей і дорослих можна прийняти приблизно сталим для жителів усіх НП одного району.

Параметр RRI_a розраховується як усереднене по роках періоду 1986–2013 рр. значення параметру відносного (міжвікового) надходження $f_a^{Cs,T}$, який визначається за співвідношенням:

$$f_a^{Cs,T} = \frac{1}{n_{a,j}^{ЛВЛ,T}} \sum_j f_{a,j}^{Cs,T} \quad (12)$$

де $n_{a,j}^{ЛВЛ,T}$ – кількість НП, для яких було розраховано НП-специфічне відносне надходження, а параметр $f_{a,j}^{Cs,T}$ характеризує міжвікове надходження радіоцезію з раціоном для j -го НП у T -му році. Для вікової групи a :

$$f_{a,j}^{Cs,T} = \frac{\bar{q}_{a,j}^T}{\bar{q}_{ad,j}^T} = \frac{\lambda_a^{Cs} \cdot \bar{Q}_j^{a,T}}{\lambda_{ad}^{Cs} \cdot \bar{Q}_j^{ad,T}} \quad (13)$$

де λ_a^{Cs} , λ_{ad}^{Cs} – константи напіввиведення цезію (1/доба) з організму дітей віку a та дорослих відповідно; $\bar{Q}_j^{a,T}$ та $\bar{Q}_j^{ad,T}$ – середнє значення вмісту ^{137}Cs у організмі (Бк), зареєстровані при ЛВЛ-вимірюваннях у T -й рік у j -му НП як у дітей віку a , так і у дорослих.

Значення $f_{a,j}^{Cs,T}$ розраховували для чотирьох вікових груп дітей: ≤ 2 , 3–7, 8–12, 13–17 років. При розрахунку $f_{a,j}^{Cs,T}$ розглядали лише ті ЛВЛ-вимірювання активності ^{137}Cs у організмі жителів, які принаймні на 30 % перевищували МДА приладу.

У таблиці 7 наведені статистичні характеристики параметру RRI_a , встановлені для різних вікових груп дітей Коростенського району. Статистична дос-

For computation of parameters in Table 6, the data were selected satisfying the following conditions:

- age of a person, for which WBC measurements were made, ≥ 18 ;
- settlements, where the number of WBC measurements in current year, ≥ 20 ;
- mean over the settlement concentration of ^{137}Cs in milk in current year exceeds 10 Bq/L.

Under insufficient number of WBC measurements in current year (less than 20 measurements) generalized expert estimates $ARME^T$ were used.

Relative raion-specific intake of radiocesium with diet for different age groups, RRI_a

The parameter RRI_a is used to evaluate doses of internal exposure from radiocesium for various children's age groups. Introduction of the parameter RRI_a is based on assumption that the relative radiocesium intake with ration between various age groups of children and adults can be taken approximately constant for residents of all settlements of a single raion.

The parameter RRI_a is evaluated as a value of relative (inter-age) intake $f_a^{Cs,T}$, which is averaged in years of the period of 1986–2013:

where $n_{a,j}^{ЛВЛ,T}$ is the number of settlements, for which settlement-specific relative intake was evaluated, and the parameter $f_{a,j}^{Cs,T}$ characterizes inter-age intake of radiocesium with ration for settlement j in year T . For age group a , it holds

where λ_a^{Cs} and λ_{ad}^{Cs} are constants of half-removal of caesium (1/day) from body of children of age a and of adults, respectively; $\bar{Q}_j^{a,T}$ and $\bar{Q}_j^{ad,T}$ are mean values of ^{137}Cs content in organism (Bq), which are measured in WBC in year T in settlement j for children of age a and adults, respectively.

The value $f_{a,j}^{Cs,T}$ was evaluated for four age groups of children: ≤ 2 , 3–7, 8–12, and 13–17 years. In evaluation of $f_{a,j}^{Cs,T}$, were considered only such WBC measurements of ^{137}Cs activity in organism of residents that at least at 30 % exceeded the MDA of device.

Table 7 presents statistical characteristics of the parameter RRI_a , established for various age groups of children of Korosten raion. Statistical signifi-

Таблиця 7

Числові значення відносного міжвікового надходження радіоцезію з раціоном (RRI_a) для різних вікових груп дітей Коростенського району.

Table 7

Numerical values of relative inter-age radiocesium intake with diet, RRI_a , for various age groups of children from Korosten raion.

Вікова група a , років Age group a , years	Кількість НП N of settlements	RRI_a				
		ArM	STD	GM	GSD	Медіана / median
<i>Села Коростенського р-ну / villages of Korosten raion</i>						
0–7	85	1,24	0,66	1,12	1,6	1,08
8–12	124	0,98	0,42	0,92	1,4	0,94
13–17	121	0,87	0,23	0,84	1,3	0,86
≥ 18	207	1	0	1	1	1
<i>м. Коростень / City of Korosten</i>						
0–7	1	1,28	0,31	1,25	1,3	1,31
8–12	1	1,03	0,23	1,01	1,3	1,08
13–17	1	0,9	0,18	0,88	1,2	0,89
≥ 18	1	1	0	1	1	1

товірність параметрів розподілу RRI_a для зазначених вікових груп доведена з використанням статистичних тестів: Вілкоксона (непараметричний) та Стьюдента (параметричний).

Внесок ^{134}Cs у дозу внутрішнього опромінення

Радіоізотопи ^{134}Cs суттєво впливали на величину дози внутрішнього опромінення населення у перші роки після аварії. Для розрахунку внеску ^{134}Cs в дозу опромінення приймали, що відношення вмісту ^{134}Cs до ^{137}Cs у продуктах харчування на час аварії складало 0,5. Оскільки радіологічні характеристики цих двох радіонуклідів ідентичні, для оцінки дози від ^{134}Cs , дозу від ^{137}Cs ($D_{137}^{a,T}$) коригували з урахуванням фізичного періоду напіврозпаду ^{134}Cs (2,06 роки).

Сумарну дозу ($D^{a,T}$) розраховували за співвідношенням:

$$D^{a,T} = D_{137}^{a,T} (1 + 0.5 \cdot k_T \cdot k_a), \tag{14}$$

де k_T – коригуючий фактор, що враховує радіоактивний розпад ^{134}Cs , k_a – відношення дозових коефіцієнтів ^{134}Cs та ^{137}Cs для вікової групи a (таблиця 5).

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Оцінку індивідуалізованих доз опромінення суб'єктів ДРУ Коростенського району проводили у 2 етапи.

1. Формування референтної «матриці доз», елементом якої є розраховані річні дози (зовнішнього, внутрішнього і сумарного) опромінення представників кожної вікової групи a для j -го НП у T -й рік із інтервалу 1986–2016 рр.

cance of the distribution parameters of RRI_a for abovementioned age groups is proven based on statistical tests: Wilkison (nonparametric) and Student (parametric).

Contribution of ^{134}Cs in internal exposure dose

Radioisotopes ^{134}Cs made essential contribution to internal exposure dose of the population in first years after the accident. To evaluate the contribution of ^{134}Cs exposure to the dose it was assumed that the ratio of ^{134}Cs content to ^{137}Cs in meal at the moment of the accident constituted 0.5. Because radiological characteristics of those two radionuclides are identical, in order to estimate the dose from ^{134}Cs , the dose from ^{137}Cs , $D_{137}^{a,T}$, was corrected taking account for physical period of half-decay of ^{134}Cs (2.06 years).

The total dose $D^{a,T}$ was evaluated as

where k_T is correcting factor taking account for radioactive decay of ^{134}Cs , and k_a is ratio of dose coefficients of ^{134}Cs and ^{137}Cs for age group a (see Table 5).

RESULTS AND DISCUSSION

Estimation of individualized exposure doses of SRU subjects from Korosten raion was made in the next two stages.

1. Forming of the reference ‘dose matrix’, whose matrix elements are evaluated annual doses (of external, internal, and total) exposure for representatives of each age group a of settlement j in year T of the interval 1986–2016.

2. Встановлення для кожного суб'єкта ДРУ (на основі інформації «матриці доз») індивідуалізованої річної дози зовнішнього гама-опромінення та ефективної дози внутрішнього опромінення усього тіла в залежності від:

- поточного року з інтервалу 1986–2016 рр.;
- вікової групи, до якої суб'єкт належав у поточному році;
- НП проживання у поточному році;
- соціальної групи у поточному році (якщо вона відома).

У таблиці 8 наведено середні значення річних індивідуалізованих доз зовнішнього, внутрішнього і сумарного опромінення дорослих жителів сільських НП Коростенського району та окремо міста Корос-

2. For each SRU subject, based on information in 'dose matrix', establishing the individualized annual dose of internal exposure of the whole body in dependence on:

- current year from the interval 1986–2016,
- are group to which the subject belonged in current year,
- settlement of residence in current year,
- social group in current year if it is known.

Table 8 presents mean values of annual individualized doses of external, internal, and total exposure for adult residents of settlements of Korosten raion and separately of Korosten city. There are

Таблиця 8

Індивідуалізовані дози сумарного (зовнішнього і внутрішнього) опромінення, реконструйовані для суб'єктів ДРУ сільських НП Коростенського району та міста Коростень.

Table 8

Individualized doses of total (external and internal) exposure, reconstructed for SRU subjects from rural settlements of Korosten raion and of Korosten city.

Рік (часовий інтервал) Year (or time interval)	Села Коростенського р-ну / villages of Korosten raion			м. Коростень / city of Korosten		
	Середня річна індивідуалізована доза, мЗв / mean annual individualized dose, mSv					
	зовнішня / external	внутрішня / internal	сумарна / total	зовнішня / external	внутрішня / internal	сумарна / total
1986	4.65	2.22	6.87	4.22	5.67	9.90
1987	1.43	0.93	2.36	1.28	0.17	1.44
1988	0.94	0.39	1.33	0.84	0.18	1.02
1989	0.71	0.22	0.93	0.63	0.14	0.77
1990	0.57	0.13	0.70	0.51	0.11	0.62
1991	0.48	0.08	0.56	0.43	0.13	0.56
1992	0.42	0.07	0.50	0.38	0.08	0.46
1993	0.38	0.07	0.45	0.34	0.08	0.41
1994	0.35	0.07	0.42	0.31	0.06	0.37
1995	0.32	0.07	0.39	0.29	0.06	0.35
1996	0.31	0.09	0.40	0.27	0.10	0.37
1997	0.29	0.08	0.37	0.26	0.08	0.34
1998	0.28	0.09	0.37	0.25	0.08	0.32
1999	0.26	0.06	0.32	0.23	0.04	0.28
2000	0.25	0.06	0.32	0.23	0.04	0.27
2001	0.24	0.05	0.30	0.22	0.05	0.27
2002	0.23	0.05	0.28	0.21	0.04	0.25
2003	0.22	0.03	0.26	0.20	0.04	0.24
2004	0.22	0.03	0.25	0.19	0.05	0.24
2005	0.21	0.04	0.25	0.18	0.03	0.21
2006	0.20	0.05	0.25	0.18	0.03	0.21
2007	0.19	0.04	0.23	0.17	0.04	0.21
2008	0.19	0.04	0.22	0.17	0.02	0.19
2009	0.18	0.04	0.22	0.16	0.05	0.21
2010	0.17	0.04	0.21	0.15	0.05	0.20
2011	0.17	0.02	0.19	0.15	0.07	0.22
2012	0.16	0.03	0.19	0.14	0.07	0.21
2013	0.15	0.03	0.18	0.14	0.08	0.22
2014	0.15	0.03	0.18	0.13	0.07	0.21
2015	0.14	0.02	0.17	0.13	0.07	0.20
2016	0.14	0.02	0.16	0.12	0.07	0.19
	Середня накопичена індивідуалізована доза, мЗв / mean accumulated individualized dose, mSv					
	зовнішня / external	внутрішня / internal	сумарна / total	зовнішня / external	внутрішня / internal	сумарна / total
1986–2000	11.6	4,6	16.2	10.5	7.0	17.5
2001–2016	2.96	0,55	3.51	2.65	0.83	3.47
1986–2016	14.6	5,2	19.8	13.1	7.8	20.9

тень. Представлено також оцінки доз, які б могли отримати дорослі жителі Коростенського району (при умові проживання на території району) за окремі періоди опромінення:

- перші 15 років після аварії (1986–2000 рр.);
- наступні 15 років (2001–2016 рр.);
- 30 років після аварії (1986–2016 рр.).

Опромінення жителів сільських НП Коростенського району та мешканців м. Коростень має деякі відмінності. Так, дози зовнішнього опромінення (як щорічні, так і накопичені), отримані сільськими жителями району, в середньому на 10 % більші, ніж дози мешканців м. Коростень. У той же час величина внутрішнього опромінення жителів м. Коростень в середньому більше на 50 % такої ж величини для жителів сільських населених пунктів Коростенського району.

Доза, накопичена за перші 15 років після аварії (1986–2000 рр.), має значний внесок у опромінення мешканців району (як сільських, так і міських). Її величина становить приблизно три чверті від дози, накопиченої за 30 років після аварії (1986–2016 рр.). Індивідуалізована доза, отримана мешканцями Коростенського району у 1986 р. дає найбільший внесок у накопичену за післяаварійні роки дозу опромінення. При цьому, якщо для жителів сільських НП району доза внутрішнього опромінення в 1986 р. оцінюється як величина у 2 рази менша від дози зовнішнього опромінення, то для жителів м. Коростень саме у 1986 р. внутрішнє опромінення було переважаючим. Починаючи з 1987 р., зовнішнє опромінення для всього населення Коростенського району було переважаючим у сумарній дозі опромінення. У таблиці 9 представлено відносний (%) розподіл населених пунктів Коростенського району Житомирської області та 9 інших районів [5, 6], де проживали суб'єкти ДРУ і для яких були розраховані індивідуалізовані дози опромінення, за інтервалами накопичених доз, які могли отримати дорослі жителі зазначених районів при умові проживання в районі протягом 30 років, починаючи з 1986 р. Методики, які використовувались для оцінки накопичених доз, враховували «референтне» для всієї території України співвідношення радіонуклідів у випадіннях та район- або НП-специфічні характеристики радіоактивного забруднення [5, 6, 10].

Як видно з таблиці 9, жителі ~ 66 % НП Коростенського району за 30 років після аварії (за умови постійного проживання в районі) могли отримати дози у інтервалі 5–20 мЗв. Для жителів ~ 25 % НП накопичена за 30 років доза оцінена в інтервалі 20–50 мЗв, а для 7 % НП цього ж району – як більша

also estimates of doses, which could obtain adult residents of Korosten raion (provided they lived at the territory of the raion) for various periods of exposure:

- first 15 years after the accident (1986–2000),
- next 15 years (2001–2016),
- 30 years after the accident (1986–2016).

Exposure of residents of rural settlements of Korosten raion and the residents of Korosten city have some difference. Thus, external exposure doses (both annual and accumulated), obtained by rural residents of the raion, in average are at 10% larger than the ones for residents of Korosten city. At the same time, internal exposure dose for residents of Korosten city is at 50 % larger than the one for rural residents of the raion.

The dose accumulated for the first 15 years after the accident (1986–2000) makes essential contribution in exposure of residents of the raion (both rural and urban). Its value constitutes about 3/4 of the dose accumulated for 30 years after the accident (1986–2016). Individualized dose obtained by residents of Korosten raion in 1986 makes the most contribution in accumulated exposure dose during all the post-accidental years. At the same time, if for residents of rural settlements of the raion the internal exposure dose in 1986 is estimated as a value which is twice less than external exposure dose, then for residents of Korosten city in 1986 internal exposure was prevalent. Starting from 1987, a component of external exposure has been prevalent for all the population of Korosten raion. Table 9 presents relative (in %) distribution of settlements of Korosten raion of Zhytomyr Oblast and of 9 other raions [5, 6], where SRU subjects resided and for which individualized exposure doses were evaluated, by intervals of accumulated doses, that adults of this raions could obtain, provided they resided in the raion for 30 years starting from 1986. The methods used to estimate the accumulated doses were taking into account the 'reference' ratio of radionuclides in precipitation and district-specific or NP-specific characteristics of radioactive contamination for the whole territory of Ukraine [5, 6, 10].

As seen from Table 9, residents of ~ 66 % settlements of Korosten raion for 30 years after the accident (considered they permanently resided in the raion) could obtain doses within 5–20 mSv. For residents of ~ 25 % settlements the dose accumulated for 30 years is estimated in the interval 20–50 mSv, and

Таблиця 9

Відносний розподіл НП районів індивідуалізації дози за інтервалами сумарної (зовнішньої і внутрішньої) дози опромінення усього тіла, яка могла бути накопичена дорослими жителями за 30 післяаварійних років.

Table 9

Relative distribution of settlements of the raion, where the dose was individualized, by intervals of total (external and internal) exposure dose of the whole body, which could be accumulated by adult residents for 30 post-accidental years.

Район Raion	Кількість НП N of settlements	Інтервал накопичених доз, мЗв / interval of accumulated doses, mSv				
		≤ 5	5–10	10–20	20–50	> 50
відносна кількість НП (%) / relative number of settlements (%)						
<i>Житомирська обл. / Zhytomyr Oblast</i>						
Народицький	82	1,2	2,5	13,6	46,9	35,8
Овруцький	171	2,9	2,4	21,8	64,7	8,2
Олевський	63	-	3,2	50,8	41,3	4,8
Коростенський	115	2,6	29,8	36,0	24,6	7,0
<i>Київська обл. / Kyiv Oblast</i>						
Іванківський	90	13,5	36,0	42,7	7,9	-
<i>Рівненська обл. / Rivne Oblast</i>						
Дубровицький	61	-	3,4	37,3	54,2	5,1
Рокитнівський	46	2,3	4,7	30,2	55,8	7,0
Сарненський	72	1,5	40,6	49,3	8,7	-
<i>Чернігівська обл. / Chernihiv Oblast</i>						
Козелецький	113	74,3	22,1	3,5	-	-
Ріпкинський	128	65,6	21,1	7,8	4,7	0,8

за 50 мЗв. Порівнюючи накопичені за 30 років індивідуалізовані дози населення Коростенського району з іншими районами Житомирської області, можна бачити, що для жителів 83 % НП Народицького, 73 % НП Овруцького та 46 % НП Олевського районів ця величина знаходиться в інтервалі доз більше 20 мЗв. При цьому для ~ 36 % НП Народицького, 8 % НП Овруцького та 5 % НП Олевського районів вона є більшою 50 мЗв. Накопичена доза у інтервалі 5–20 мЗв оцінена для мешканців 16 % НП Народицького району, а також для жителів 24 та 54 % НП Овруцького та Олевського районів, відповідно. Тобто, дозове навантаження, яке отримали жителі Коростенського району за 30 років після аварії на ЧАЕС, нижче порівняно з іншими районами Житомирської області.

ВИСНОВКИ

Розроблено еколого-дозиметричну модель для індивідуалізації доз зовнішнього та внутрішнього опромінення суб'єктів ДРУ, що мешкають в НП Коростенського району Житомирської області. Модель базується на результатах радіоекологічного (грунт, продукти харчування) та дозиметричного моніторингу (ЛВЛ-вимірювання), який мав місце у 1986–2013 рр. на території північних областей Ук-

for 7 % settlements of the raion as > 50 mSv. Comparing accumulated for 30 years individualized doses of population of Korosten raion with other raions of Zhytomyr Oblast, one can see that for residents of 83 % of settlements from Narodytskyy raion, 73% of Ovrutsky one, and 46 % of Olevsky one this value is in the dose range over 20 mSv. At that for ~ 36 % of settlements of Narodytskyy raion, 8% of settlements of Ovrutsky one, and 5 % of settlements of Olevsky one it was > 50 mSv. Accumulated dose in the interval 5–20 mSv is estimated for residents of 16 % settlements of Narodytskyy raion, and also 24 % and 54 % for residents of Ovrutsky and Olevsky raion, respectively. Thus, exposure doses obtained by residents of Korosten raion for 30 years after the accident are lower vs. with other raions of Zhytomyr Oblast.

CONCLUSIONS

The ecological-dosimetric model is elaborated for individualization of external and internal exposure doses of SRU subjects residing in settlements of Korosten raion of Zhytomyr Oblast. The model is based on the results of radio-ecological monitoring (ground, meal) and dosimetric one (WBC measurements) that took place in 1986–2013 at the territory of northern oblasts of Ukraine in the

раїни в рамках програми Загальнодозиметричної паспортизації [1–4]. Інформація про результати цих моніторингів зберігається в базі даних Центрального еколого-дозиметричного реєстру лабораторії радіологічного захисту ННЦРМ.

Річна доза за кожний післяаварійний рік для мешканців НП Коростенського району представляється у вигляді двох складових: річної ефективної дози зовнішнього гамма-опромінення (за рахунок радіоактивних випадінь на ґрунті) і внутрішнього опромінення всього тіла (за рахунок споживання забруднених радіоактивними ізотопами продуктів харчування). 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).

Дози зовнішнього і внутрішнього опромінення (річні та накопичені) оцінені для населення різних вікових груп, яке проживає у НП Коростенського району (близько 100 НП). Окремо представлено дози для сільських НП району та для м. Коростень за кожний рік з інтервалу 1986–2016 рр. Наведені оцінки накопичених доз за перші 15 післяаварійних років, за період 2000–2016 рр., та за 30-річний період після аварії. Середня доза, накопичена за 30 років після аварії на ЧАЕС, для жителів сільських НП Коростенського району оцінена на рівні 19,8 мЗв, а для жителів м. Коростень – 20,9 мЗв.

Проведене порівняння результатів розрахунку індивідуалізованих доз, накопичених за період 30 років після аварії (1986–2016 рр.), для мешканців Коростенського району і суб'єктів ДРУ, що проживають в дев'яти районах Житомирської, Київської, Рівненської та Чернігівської областей. Показано, що за цей період дозове навантаження жителів Коростенського району є нижчим порівняно з Народицьким, Овруцьким та Олевським районами Житомирської області.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ліхтарьов І. А., Ковган Л. М., Масюк С. В., Іванова О. М., Чепурний М. І., Бойко З. Н., Герасименко В. Б. Основні принципи та досвід проведення комплексної дозиметричної паспортизації населених пунктів України. Проблеми радіаційної медицини та радіобіології. 2015. Вип. 20. С. 75-103.
2. Василенко В. В., Пікта В. О., Ліхтарьов І. А., Нечаев С. Ю., Циганков М. Я., Литвинець Л. О., Шпаченко В. І. Багаторічний комплексний моніторинг внутрішнього опромінення населення радіоактивно забруднених територій України після аварії на ЧАЕС. Тридцять років Чорнобильської катастрофи: радіологічні та медичні наслідки. Національна доповідь України. Київ, 2016. С. 20-25.

frame of general dosimetric passportization Program [1–4]. Information about the results of the monitorings is preserved in database of Central ecological-dosimetric register of Radiation Protection Laboratory of NRCRM.

Annual dose for each post-accidental year for residents of settlements of Korosten raion is decomposed in two components: (a) annual effective dose of external gamma exposure (due to radioactive depositions on the ground), and (b) internal exposure of the whole body (due to consumption of meal contaminated by radioactive isotopes). For 1986, the dose is evaluated from all main radionuclides of radioactive accidental fallout, and after 1987 – only from radio isotopes of cesium, ^{134}Cs and ^{137}Cs .

External and internal exposure doses (annual and accumulated) are estimated for population of various age groups residing in settlements of Korosten raion (about 100 settlements). Separately are presented the doses for rural settlements of the raion and for the city of Korosten for each year of the interval 1986–2016. The estimates are presented for first 15 post-accidental years, for the period of 2000–2016, and for 30 year period after the accident. Mean dose accumulated for 30 years after the accident for residents of rural settlements of Korosten raion is estimated as 19.8 mSv, and for residents of Korosten city as 20.9 mSv.

A comparison is made of estimates of individualized doses accumulated for the period of 30 years after the accident (1986–2016) for residents of Korosten raion and for SRU subjects residing in nine raions of Zhytomyr, Kyiv, Rivne, and Chernihiv oblasts. It is shown that during this period the dose load of residents of Korosten raion is lower compared with the one for Naroditsky, Ovrutsky, and Olevsky raions of Zhytomyr Oblast.

REFERENCES

1. Likhtarov I. A., Kovgan L. M., Masiuk S. V., Ivanova O. M., Chepurny M. I., Boyko Z. N., Gerasymenko V. B. Basic principles and practices of integrated dosimetric passportization of the settlements in Ukraine. Probl Radiac Med Radiobiol. 2015;20:75-103.
2. Vasylenko W, Pikta VO, Lichtarov I. A., Nechaev SYu, Tsigankov MYa, Litvinets LO, Shpachenko VI. [Long-term integrated internal exposure monitoring of the population of radioactively contaminated territories of Ukraine after the Chernobyl accident]. In: Thirty years of the Chernobyl disaster: radiological and medical implications. National report of Ukraine. Kyiv, 2016. p. 20-5. Ukrainian.

3. Радіаційно-дозиметрична паспортизація населених пунктів території України, що зазнали радіоактивного забруднення внаслідок аварії ЧАЕС, включаючи тиреодозиметричну паспортизацію. Інструктивно-методичні вказівки: «Методика-96» / Ліхтарьов І. А., Ковган Л. М., Табачний Л. Я. та ін. ; МОЗ України, Мінчорнобиль України, НЦПМ 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.
5. Лихтарев И. А., Ковган Л. Н., Масюк С. В., Иванова О. Н., Чепурной Н. И., Бойко З. Н., Герасименко В. Б., Терещенко С. А., Кравченко И. Г., Кортюшин Г. И., Марценюк О. Д. 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. *Проблеми радіаційної медицини та радіобіології*. 2014. Вип. 19. С. 80-101.
6. Лихтарев И. А., Ковган Л. Н., Масюк С. В., Иванова О. Н., Чепурной Н. И., Бойко З. Н., Герасименко В. Б., Терещенко С. А., Кравченко И. Г., Кортюшин Г. И., Марценюк О. Д. Реконструкция индивидуализированных доз внутреннего облучения субъектов Государственного регистра Украины: Сообщение 2. Локально-специфические модели и дозы облучения жителей Козелецкого и Репкинских районов Черниговской области. *Проблеми радіаційної медицини та радіобіології*. 2014. Вип. 19. С. 102-125.
7. Ковган Л., Ліхтарьов І. Чорнобиль-орієнтований комплекс еколого-дозиметричних моделей та узагальнені оцінки доз опромінення населення України в результаті Чорнобильської аварії (1986-2000 рр.). *Ядерная и радиационная безопасность*. 2004. Т. 7, вып. 3. С.13-25.
8. Muck K., Prohl G., Likhtarev I., Meckbach R, Golikov V. A consistent radionuclide vector after the Chernobyl accident. *Health Physics*. 2002. Vol.82, no. 2. P. 141-156.
9. Ковган Л. Н., Лихтарев И. А. Общее внешнее и внутреннее облучение населения Украины за 15 лет после чернобыльской аварии и прогноз рисков. *Международный журнал радиационной медицины*. 2002. Т. 4, № 1-4. С. 79-98.
10. Likhtarev I. A., Kovgan L. N., Jacob J. P., Anspaugh L. R. Chernobyl accident: Retrospective and prospective estimates of external dose of the population of Ukraine. *Health Phys*. 2002. Vol. 82, no. 3. P. 290-303.
11. Likhtariov I., Kovgan L., Novak D., Vavilov S., Jacob P., Paretzke H. G. Effective doses due to external irradiation from the Chernobyl accident for different population groups of Ukraine. *Health Physics*. 1996. Vol.70, no. 1. P. 87-98.
12. Likhtarev I. A., Kovgan L. N., Vavilov S. E., Gluvchinsky R. R., Perevoznikov O. N., Litvinets L. N., Anspaugh L. R., Kercher J. R., Bouville A. Internal exposure from the ingestion of foods contaminated by ¹³⁷Cs after the Chernobyl accident. Report 1. General model: Ingestion doses and countermeasure effectiveness for the adults of Rovno Oblast of Ukraine. *Health Physics*. 1996. Vol. 70, no. 3. P. 297-317.
3. Likhtarov IA, Kovgan LM, Tabachnyi Lya, et al.; Ministry of Health of Ukraine, Ministry of Affairs of Population Protection from the Consequences of Chernobyl 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.
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 I. A., Kovgan L. N., Masiuk S. V., Ivanova O. N., Chepurny M. I., Boyko Z. N., Gerasymenko V. B., Tereshchenko S. A., Kravchenko I. G., Kortushin G. I., Marcenjyk 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 I. A., Kovgan L. N., Masiuk S. V., Ivanova O. N., Chepurny M. I., Boyko Z. N., Gerasymenko V. B., Tereshchenko S. A., Kravchenko I. G., Kortushin G. I., Marcenjyk O. D. 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. Kovgan L, Likhtarev I. [Chernobyl-oriented complex of ecological and dosimetric models and generalized estimations of doses of radiation of the population of Ukraine as a result of the Chernobyl accident (1986-2000)]. *Nuclear and Radiation Safety*. 2004;7(3):13-25. Russian.
8. Muck K., Prohl G., Likhtarev I., Meckbach R, Golikov V. A consistent radionuclide vector after the Chernobyl accident. *Health Physics*. 2002;82(2):141-56.
9. Kovgan LN, Likhtarev IA. General external and General external and internal exposure of the population of Ukraine during 15 years after chernobyl accidebt and the prognosis of the risks. *International Journal of Radiation Medicine*. 2002;4(1/4):79-98.
10. Likhtarev 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. 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 Physics*. 1996;70(1):87-98.
12. Likhtarev IA, Kovgan LN, Vavilov SE, Gluvchinsky RR, Perevoznikov ON, Litvinets LN, Anspaugh LR, Kercher JR, Bouville A. Internal exposure from the ingestion of foods contaminated by

13. Likhtarev I. A., Kovgan L. N., Vavilov S. E., Perevoznikov O. N., Litvinets L. N., Anspaugh L. R., Jacob P., Prohl G. Internal exposure from the ingestion of foods contaminated by ^{137}Cs after the Chernobyl accident. Report 2. Ingestion doses of the rural population of Ukraine up to 12 y after the accident (1986-1997). Health Physics. 2000. Vol. 79, no. 4. P.341-357.
14. ICRP Publication 67. Age-Dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 2. Ingestion Dose Coefficients. Annals of the ICRP. 1994. Vol. 23, no. 3/4. 166 p.
15. 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.
16. UNSCEAR 1988 Report. Sources, effects and risks of ionizing radiation. Annex D: Exposures from the Chernobyl accident. New York : United Nations, 1988. 74 p.
17. Дозиметрическая паспортизация населенных пунктов Украины, подвергшихся радиоактивному загрязнению после Чернобыльской аварии. Сводные данные, июнь 1991 - март 1995 г. Сборник 5 / под ред. И. А. Лихтарева. Киев, 1995. 312 с.
- ^{137}Cs after the Chernobyl accident. Report 1. General model: Ingestion doses and countermeasure effectiveness for the adults of Rovno Oblast of Ukraine. Health Physics. 1996;70(3):297-317.
13. Likhtarev IA, Kovgan LN, Vavilov SE, Perevoznikov ON, Litvinets LN, Anspaugh LR, Jacob P, Prohl G. Internal exposure from the ingestion of foods contaminated by ^{137}Cs after the Chernobyl accident. Report 2. Ingestion doses of the rural population of Ukraine up to 12 years after the accident (1986-1997). Health Physics. 2000;79(4):341-57.
14. ICRP Publication 67. Age-Dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 2. Ingestion Dose Coefficients. Annals of the ICRP. 1994;23(3/4). 166 p.
15. 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.
16. UNSCEAR 1988 Report. Sources, effects and risks of ionizing radiation. Annex D: Exposures from the Chernobyl accident. New York : United Nations, 1988. 74 p.
17. Likhtarev IA, editor. [Dosimetric passportization of settlements of Ukraine exposed to radioactive contamination after the Chernobyl accident. Summary data, June 1991 - March 1995. Collection 5]. Kyiv, 1995. 312 p. Russian.

Стаття надійшла до редакції 28.06.2017

Received: 28.06.2017