

УДК 614.876:613.648

О. М. Іванова¹, М. І. Чепурний¹, С. В. Масюк¹✉, В. В. Василенко¹, М. С. Курята¹,
В. Б. Будерацька¹, З. Н. Бойко¹, А. Б. Білоник¹, Г. В. Федосенко¹, В. В. Морозов¹,
С. Г. Горбачов¹, Н. С. Жадан¹, С. О. Терещенко², І. Г. Губіна², В. В. Дроздович³

¹Державна установа «Національний науковий центр радіаційної медицини, гематології та онкології Національної академії медичних наук України», вул. Юрія Ілленка, 53, м. Київ, 04050, Україна

²Державна установа «Український центр інформаційних технологій та Національного реєстру» Міністерства охорони здоров'я України, просп. Берестейський, 119/121 м. Київ, 03115, Україна

³Division of Cancer Epidemiology and Genetics, National Cancer Institute, NIH, DHHS, 9609 Medical Center Drive, Bethesda, MD 20892-9778, USA

МЕТОДОЛОГІЯ РЕКОНСТРУКЦІЇ ДОЗ ВНУТРІШНЬОГО ОПРОМІНЕННЯ ВІД РАДІОНУКЛІДІВ ¹³⁷Cs ТА ¹³⁴Cs МЕШКАНЦІВ РАДІОАКТИВНО ЗАБРУДНЕНИХ НАСЕЛЕНИХ ПУНКТІВ УКРАЇНИ, НЕ ОХОПЛЕНИХ ЛВЛ-МОНІТОРИНГОМ

Мета: наукове обґрунтування методології розрахунку доз внутрішнього опромінення від радіонуклідів ¹³⁷Cs та ¹³⁴Cs мешканців радіоактивно забруднених внаслідок Чорнобильської катастрофи територій України, що проживають у населених пунктах, де не проводились вимірювання інкорпорованого радіоцезію на лічильниках випромінювання людини (ЛВЛ).

Матеріали та методи. У роботі представлена нова методологія реконструкції доз внутрішнього опромінення від радіонуклідів ¹³⁷Cs та ¹³⁴Cs чорнобильського походження у випадку як аерального (1986 р.), так і кореневого (1987–2023 рр.) шляхів їхнього надходження до організму людини. У випадку аерального надходження методологія розрахунку доз ґрунтується на теоретичній моделі міграції радіонуклідів цезію ланками харчового ланцюжка з подальшим коригуванням цієї моделі на результати ЛВЛ-вимірювань, виконаних у період з 15 липня по 31 грудня 1986 р. У випадку кореневого надходження використовується еколого-дозиметрична модель, параметри якої визначаються видами, якістю і повнотою молочного та ЛВЛ-моніторингу, що проводився на радіоактивно забруднених територіях у 1987–2013 рр. При відсутності ЛВЛ-вимірювань доза опромінення оцінюється з урахуванням властивостей та специфіки радіоактивного забруднення об'єктів довкілля кожного регіону: характеристики ґрунту, рівень забруднення ґрунту та молока, значення молочного еквіваленту.

Результати. Обґрунтовано нову методологію реконструкції доз внутрішнього опромінення від радіонуклідів ¹³⁷Cs та ¹³⁴Cs мешканців радіоактивно забруднених внаслідок Чорнобильської катастрофи територій України. Методологія ґрунтується на аналізі усіх даних, отриманих в результаті радіоекологічного та дозиметричного моніторингу, що проводився в Україні після аварії.

Висновки. За розробленою у роботі методологією розрахунок річних доз внутрішнього опромінення мешканців населених пунктів (НП), що не були охоплені ЛВЛ-моніторингом, базується на даних вимірювань питомої активності ¹³⁷Cs у молоці приватних господарств, що проводились у цих НП, а у разі відсутності таких вимірювань у населеному пункті, для розрахунку доз використовується лінійна регресійна модель, що пов'язує величину інкорпорованого ¹³⁷Cs в тілі людини з чотирма групами ґрунтів у буферній зоні НП. Дози опромінення, розраховані за новою методологією узгоджуються з дозами, розрахованими безпосередньо за результатами ЛВЛ-вимірювань.

Ключові слова: внутрішнє опромінення; лічильник випромінювання людини; доза опромінення; радіоактивно забруднені території; Чорнобильська катастрофа; радіонукліди цезію.

Проблеми радіаційної медицини та радіобіології. 2024. Вип. 29. С. 115–151. doi: 10.33145/2304-8336-2024-29-115-151

✉ Масюк Сергій Володимирович, e-mail: masja1979@gmail.com

O. M. Ivanova¹, M. I. Chepurny¹, S. V. Masiuk¹✉, V. V. Vasylenko¹, M. S. Kuriata¹,
V. B. Buderatska¹, Z. N. Boiko¹, A. B. Bilonyk¹, G. V. Fedosenko¹, V. V. Morozov¹, S. G. Gorbachov¹,
N. S. Zhadan¹, S. O. Tereshchenko², I. G. Hubina², V. V. Drozdovitch³

¹State Institution «National Research Center for Radiation Medicine, Hematology and Oncology of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine», 53 Yurii Illienka Str., Kyiv, 04050, Ukraine

²State institution «Ukrainian Center of Information Technologies and National Register of the Ministry of Health of Ukraine», 119/121 Beresteyskyi Ave., Kyiv, 03115, Ukraine

³Division of Cancer Epidemiology and Genetics, National Cancer Institute, NIH, DHHS, 9609 Medical Center Drive, Bethesda, MD 20892, USA

METHODOLOGY OF RECONSTRUCTION OF INTERNAL DOSES FROM ¹³⁷Cs AND ¹³⁴Cs OF RESIDENTS OF RADIOACTIVELY CONTAMINATED SETTLEMENTS IN UKRAINE NOT COVERED BY WBC MONITORING

Objective. Scientific justification of the methodology for calculating radiation internal doses from ¹³⁷Cs and ¹³⁴Cs intake for residents of Ukrainian settlements radioactively contaminated as a result of the Chernobyl (Chernobyl) accident in which measurements of incorporated radiocesium isotopes in humans using whole-body counters (WBC) were not carried out.

Materials and methods. The paper presents a new methodology for reconstructing doses due to internal irradiation from Chernobyl fallout for both surface (in 1986) and root (in 1987–2023) contamination of vegetation with ¹³⁷Cs and ¹³⁴Cs and their transfer into the human body. The methodology for calculating the dose due to surface contamination of vegetation was based on the theoretical model of the transfer of radiocesium isotopes through the food chain with further adjustment of this model to the results of WBC measurements carried out between 15 July and 31 December 1986. For root intake, an ecological dosimetric model is used with the parameters determined by the types, quality and completeness of cow's milk and WBC monitoring carried out in radioactively contaminated territories in 1987–2013. In the absence of WBC measurements, the doses were estimated considering the properties and specifics of radioactive contamination of environmental objects in each region: soil type, levels of soil and milk contamination, and milk equivalent.

Results. A new methodology for reconstruction of internal doses from radionuclides ¹³⁷Cs and ¹³⁴Cs to residents of the territories of Ukraine radioactively contaminated due to the Chernobyl disaster is substantiated. The methodology is based on the analysis of all data obtained as the result of radioecological and dosimetric monitoring carried out in Ukraine after the accident.

Conclusions. According to the methodology developed in the work, the calculation of annual internal doses to residents of settlements that were not covered by WBC monitoring is based on the measurements of the ¹³⁷Cs activity in the milk of private farms, which were carried out in these settlements. In the absence of such measurements, a linear regression model which connect the incorporated in human body ¹³⁷Cs with four groups of soils in the vicinity of the settlement is used for doses calculation. The doses calculated according to the new methodology agree with the doses derived directly from the results of WBC measurements.

Key words: internal radiation; whole-body counter; radiation dose; radioactively contaminated territories; Chernobyl (Chernobyl) accident; radiocesium isotopes.

Problems of Radiation Medicine and Radiobiology. 2024;29:115-151. doi: 10.33145/2304-8336-2024-29-115-151

ВСТУП

У Державній установі «Український центр інформаційних технологій та Національного реєстру» МОЗ України діє «Державний реєстр України осіб, які постраждали внаслідок Чорнобильської катастрофи».

INTRODUCTION

The «Ukrainian State Register of Persons Affected due to the Chernobyl Disaster» (SRU) operates by the State Institution «Ukrainian Center of Information Technologies and the National Register» of

✉ Serhyi V. Masiuk, e-mail: masja1979@gmail.com

рофи» (ДРУ). Основною метою цього реєстру є надання науковим і медичним установам інформації про стан здоров'я людей, які зазнали радіаційного впливу через Чорнобильську катастрофу. Для оцінки впливу радіації на здоров'я зареєстрованих у ДРУ осіб необхідно забезпечити якісні оцінки доз радіаційного опромінення, особливо для мешканців радіоактивно забруднених територій (РЗТ) та дітей, народжених від опромінених батьків [1–3]. Стаття 11 Закону України «Про захист людини від впливу іонізуючого випромінювання» [4] та указ Президента № 196 від 05.07.2018 «Про додаткові заходи з відродження територій, що зазнали радіоактивного забруднення внаслідок Чорнобильської катастрофи, із соціального захисту постраждалих осіб, безпечного поводження з радіоактивними відходами» [5], окрім інших видів діяльності, спрямованої на забезпечення радіаційного захисту та безпеки, передбачають проведення наукових досліджень на постраждалих територіях, створення для цього сучасної дослідницької інфраструктури, електронних баз даних та інформаційних систем.

Роботи з реконструкції індивідуалізованих доз опромінення осіб, облікованих у ДРУ, розпочались у 2007 році фахівцями лабораторії радіологічного захисту ННЦРМГО [6, 7]. За цей час дозові оцінки отримали близько 515 тис. осіб, які мешкали у післяварійний період на найбільш забрудненій радіоактивними речовинами території України – у населених пунктах (НП), розташованих у північних регіонах Житомирської, Київської, Рівненської та Чернігівської областей. Лєвова частка дози внутрішнього опромінення у постчорнобильський період жителів цих територій формувалась радіонуклідами ^{137}Cs та ^{134}Cs . Для найбільш точної оцінки річної індивідуальної дози від цих радіонуклідів необхідно мати результат вимірювання вмісту інкорпорованої радіоактивності ^{137}Cs та ^{134}Cs на лічильнику випромінювання людини (ЛВЛ) у тому році, за який накопичується доза. Якщо особа не вимірювалась на ЛВЛ безпосередньо, дозу з достатньою точністю можна реконструювати за даними ЛВЛ-вимірювань інших мешканців того населеного пункту, де проживала дана особа. Якщо у цьому НП у рік, за який накопичується доза, ЛВЛ-моніторинг не проводився, то дозу, звичайно вже з меншою точністю, можна відновити за даними ЛВЛ-вимірювань в межах адміністративного району, до якого належить зазначений НП.

the Ministry of Health of Ukraine. The main purpose of this register is to provide scientific and medical institutions with information about the health status of people who were exposed to radiation after the Chernobyl accident. To assess the impact of irradiation on the health of persons registered in the SRU, it is necessary to provide the qualitative estimates of radiation doses, especially for residents of radioactively contaminated areas (RCA) and children born to exposed parents [1–3]. Article 11 of the Law of Ukraine «On the Protection of Humans from the Impact of Ionizing Radiation» [4] and Presidential Decree No. 196 of 05/07/2018 «On Additional Measures to Rehabilitate Territories Exposed to Radioactive Pollution as a Result of the Chernobyl Disaster, Social Protection of Affected Persons, Safe Handling of radioactive waste» [5], in addition to other types of activities aimed at ensuring radiation protection and safety, include conducting scientific research in the affected territories, creating modern research infrastructure, electronic databases and information systems for this purpose.

Work on the reconstruction of individualized doses for persons included in the SRU began in 2007 in the laboratory of radiological protection of the National Research Center for Radiation Medicine, Hematology and Oncology (NRCRMHO) [6, 7]. Since then, doses have been reconstructed for around 420,000 people who lived in the post-accident period in the most radioactively contaminated territories of Ukraine, in particular in settlements located in the northern part of Zhytomyrska, Kyivska, Rivnenska and Chernihivska Oblasts. A significant portion of the internal radiation dose of residents in these territories in the post-Chernobyl period was formed by ^{137}Cs and ^{134}Cs . For the most accurate assessment of the annual individual dose from the intake of these radionuclides, it is necessary to have the result of measurements of the activity of ^{137}Cs and ^{134}Cs incorporated in the human body done using of whole-body counter (WBC) in the year for which the dose was accumulated. If a person was not measured by WBC, the dose can be reconstructed with reasonable accuracy from WBC measurements in other residents of the settlement where the person lived. If WBC monitoring was not carried out in the settlement where the person lived in the year for which the dose was accumulated, the dose can be reconstructed with less accuracy using WBC measurements carried out within the administrative district in which the settlement is located.

Найбільшою проблемою є розрахунок доз внутрішнього опромінення осіб, які проживають (проживали) у НП, що знаходяться в регіонах, не охоплених ЛВЛ-моніторингом [8, 9]. Це стосується як реконструкції доз особам, що перебувають на обліку в ДРУ, так і особам, залученим до міжнародних наукових радіоепідеміологічних та інших досліджень, пов'язаних зі шкідливою дією іонізуючого випромінювання на здоров'я людини, які наразі проводяться в Україні [10–14]. Для вирішення цієї проблеми необхідно розробити еколого-дозиметричну модель, яка уможливить оцінку доз внутрішнього опромінення представників різних вікових груп населення радіоактивно забруднених НП України. Тобто потрібна релевантна методологія оцінки доз внутрішнього опромінення осіб, що проживають (проживали) у цих НП. Очевидно, що така методологія повинна ґрунтуватись на аналізі усіх даних, отриманих в рамках радіоекологічного та дозиметричного моніторингів, що проводились на РЗТ з 1986 по 2013 рр. Зазначимо, що основний масив результатів ЛВЛ-вимірювань і вимірювань ^{137}Cs у молоці був отриманий в рамках загальнодозиметричної паспортизації населених пунктів України у 1991–2013 рр. [15].

МЕТА

Наукове обґрунтування методології розрахунку доз внутрішнього опромінення від радіонуклідів ^{137}Cs та ^{134}Cs мешканців радіоактивно забруднених внаслідок Чорнобильської аварії територій України, не охоплених ЛВЛ-моніторингом.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

При побудові дозиметричної моделі внутрішнього опромінення від радіонуклідів цезію доцільно розділити весь післяаварійний період на дві частини: період від початку аварії до приблизно кінця 1986 року, коли переважало аеральне забруднення рослинності (і, як наслідок, молока та листових овочів) радіонуклідами цезію, та період, коли забруднення продуктів харчування відбувалося шляхом міграції радіонуклідів углиб ґрунту з подальшим забрудненням рослинності через кореневу систему.

Особливість аерального шляху забруднення полягає у тому, що при осіданні радіонуклідів з атмосфери (сухих або вологих) відбувається їхнє накопичення у наземній частині рослини, тоді як у разі міграції радіонуклідів углиб ґрунту, значна їхня частина там фіксується і є недоступною для поглинання рослинами. Тому вважається, що зазвичай аеральний шлях

The biggest problem is the calculation of internal doses to persons living (having lived) in settlements in regions not covered by WBC monitoring [8, 9]. This applies both to the reconstruction of doses to persons registered with the SRU and to persons involved in international scientific radiation epidemiological and other studies related to the harmful effects of ionizing radiation on human health, which are currently being conducted in Ukraine [10–14]. To solve this problem, it is necessary to develop an ecological and dosimetric models that will allow estimation of internal doses to representatives of different age groups living in radioactively contaminated settlements of Ukraine. Thus, it is necessary to develop a relevant methodology for assessing internal doses to people living (or having lived) in these settlements. Obviously, such a methodology should be based on the analysis of all data obtained in the framework of radioecological and dosimetric monitoring conducted at the RCA from 1986 to 2013. It should be noted that most of the results of WBC measurements and measurements of ^{137}Cs activity in milk were obtained as part of the dosimetric passportization of Ukrainian settlements in 1991–2013 [15].

OBJECTIVE

Scientific justification of the methodology for calculating internal doses from ^{137}Cs and ^{134}Cs to residents of the territories of Ukraine contaminated by the Chernobyl accident and not covered by whole-body counters monitoring.

MATERIALS AND METHODS

When constructing a dosimetric model of internal exposure from cesium radionuclides, it is advisable to divide the entire post-accident period into two parts: the period from the time of the accident to approximately the end of 1986, when aerial contamination of vegetation (and, as a result, milk and leafy vegetables) with cesium radionuclides prevailed, and the period when food was contaminated by migration of radionuclides deep into the soil with subsequent contamination of vegetation through the root system. The peculiarity of the aerial route of contamination is that when radionuclides are deposited from the atmosphere (dry or wet), they accumulate in the ground part of the plant, while in case of migration of radionuclides deep into the soil, a significant part of them is fixed there and is not available for absorption by plants. Therefore, it is consid-

надходження радіонуклідів суттєво перевищує кореневий [16].

Внутрішнє опромінення у 1986 році

Величина середньорічної ефективної індивідуалізованої дози внутрішнього опромінення представника професійно-вікової групи a у 1986 році, який проживав у j -му НП, зумовлена споживанням радіоактивно забруднених продуктів харчування. Загальний вираз для розрахунку індивідуалізованої дози внутрішнього опромінення $D_{a,j}^{int,86}$ можна представити сумою доз від радіонуклідів чорнобильського походження (r):

$$D_{a,j}^{int,86} = k_j^{86} \cdot \sigma_{Cs,j}^{86} \cdot RI_a^{86} \cdot \sum_r D_{ad,r}^{int,86} = k_j^{86} \cdot \sigma_{Cs,j}^{86} \cdot RI_a^{86} \cdot \sum_r K_r \cdot E_{a,r}^{int} \cdot \tilde{Q}_{ad,r}^{86} \quad (1)$$

де $D_{ad,r}^{int,86}$ – річна ефективна доза внутрішнього опромінення у 1986 р. від радіонукліду r для дорослих жителів від споживання радіоактивно забруднених молока та листової зелені, нормована на щільність випадіння ^{137}Cs на ґрунті у j -му НП, Зв на $1 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-2}$ ^{137}Cs на ґрунті [17–19];

$E_{a,r}^{int}$ – дозовий коефіцієнт МКРЗ [20] внутрішнього опромінення від радіонукліду r для представників вікової групи a на одиницю перорального надходження, Зв·Бк $^{-1}$;

K_r – зведене до 26 квітня 1986 р. референтне відношення активності r -го радіонукліду до активності ^{137}Cs у випадіннях [21], б/р.

$\tilde{Q}_{ad,r}^{86}$ – нормоване на щільність випадіння радіонукліду r на ґрунті кумулятивне річне надходження активності радіонукліду r до організму дорослої людини у 1986 р. з раціоном, Бк на $\text{kBq} \cdot \text{m}^{-2}$;

RI_a^{86} – відносне надходження ^{137}Cs з раціоном представника дитячої / підліткової вікової групи a порівняно з дорослим, б/р;

$\sigma_{Cs,j}^{86}$ – щільність випадіння ^{137}Cs на ґрунті в j -му НП, приведена до 26.04.86, $\text{kBq} \cdot \text{m}^{-2}$;

k_j^{86} – коригуючий фактор, що залежить від особливостей харчування, контрзаходів та екологічних характеристик району, б/р.

Надходження активності радіонуклідів цезію до організму людини у 1986 році

Величина $\tilde{Q}_{ad,r}^{86}$ оцінюється інтегралом за часом від початку аварії до кінця 1986 р. [17, 22, 23]:

$$\tilde{Q}_{ad,r}^{86} = \int_{t=26.04.86}^{31.12.86} (c_r^{mil,86}(t) \cdot w_{ad}^{mil} + c_r^{veg,86}(t) \cdot w_{ad}^{veg}) \quad (2)$$

ered that the aerial route of radionuclide intake is usually significantly higher than the root route [16].

Internal exposure in 1986

The value of the average annual effective individualized internal dose to a representative of occupational and age group a in 1986, who resided in the j -th settlement, was due to the consumption of radioactively contaminated food. The general equation for calculating the individualized internal dose, $D_{a,j}^{int,86}$, can be represented by the sum of doses from radionuclides of Chernobyl origin (r):

where $D_{ad,r}^{int,86}$ – annual effective internal dose in 1986 from radionuclide r for adult residents from consumption of radioactively contaminated milk and leafy vegetables normalized to the ^{137}Cs deposition density in the j -th settlement, Sv per $\text{kBq} \cdot \text{m}^{-2}$ [17–19]; $E_{a,r}^{int}$ – ICRP ingestion dose coefficient for radionuclide r for representatives of age group a per unit of intake, Sv·Bq $^{-1}$ [20];

K_r – reference ratio of activity of the r -th radionuclide to ^{137}Cs activity in deposition on April 26, 1986 [20], unitless;

$\tilde{Q}_{ad,r}^{86}$ – annual intake of radionuclide r activity for adults in 1986 with a diet normalized to the deposition density of radionuclide r , Bq per $\text{kBq} \cdot \text{m}^{-2}$;

RI_a^{86} – relative intake of ^{137}Cs with a diet for a representative of the age group a compared to an adult, unitless;

$\sigma_{Cs,j}^{86}$ – ^{137}Cs deposition density in the j -th settlement on 26 April 1986, $\text{kBq} \cdot \text{m}^{-2}$;

k_j^{86} – correction factor that depends on the specifics of nutrition, countermeasures and environmental characteristics of the district, unitless.

Intake of cesium radionuclide activity in the human body in 1986

The value of $\tilde{Q}_{ad,r}^{86}$ was estimated as the integral intake of radionuclide r activity from the beginning of the accident to the end of 1986 [17, 22, 23]:

де $c_r^{mil,86}(t)$ та $c_r^{veg,86}(t)$ – нормовані на одиницю випадіння ^{137}Cs на ґрунті часові функції концентрації радіонукліда r у коров'ячому молоці та у листових овочах відповідно, $\text{Бк}\cdot\text{л}^{-1}(\text{кг}^{-1})$ на $\text{кБк}\cdot\text{м}^{-2}$; w_{ad}^{mil} та w_{ad}^{veg} – добові споживання коров'ячого молока та листових овочів місцевого виробництва дорослою людиною, $\text{л}(\text{кг})\cdot\text{доба}^{-1}$.

Сумарна річна ефективна доза внутрішнього опромінення $D_{ad}^{int,86}$ з рівняння (1) приблизно на 90 % обумовлюється радіонуклідами цезію ^{137}Cs та ^{134}Cs [17, 19]. Доза, нормована на одиницю випадіння ^{137}Cs на поверхню ґрунту в 1986 р., становить $10,2 \text{ мкЗв}$ на $\text{кБк}\cdot\text{м}^{-2}$ від ^{137}Cs та $7,1 \text{ мкЗв}$ на $\text{кБк}\cdot\text{м}^{-2}$ від ^{134}Cs .

Коригувальний фактор дози внутрішнього опромінення 1986 році

Необхідність введення до розрахунку доз внутрішнього опромінення у 1986 році коригуючого коефіцієнта k_j^{86} пов'язана з можливістю скоригувати теоретичні дози на результати ЛВЛ-вимірювань (виконаних у період з 15.07.1986 по 31.12.1986) у тих регіонах, де ці вимірювання проводились (рис. 1).

Коефіцієнт k_j^{86} (рис. 2) оцінюється як відношення середньої дози у НП від ^{137}Cs , оціненої за даними індивідуальних ЛВЛ-вимірювань, до теоретичної до-

where $c_r^{mil,86}(t)$ and $c_r^{veg,86}(t)$ – variation with time of radionuclide r activity concentration in locally produced cow's milk and in leafy vegetables normalized per unit of ^{137}Cs deposition density, respectively, $\text{Bq}\cdot\text{L}^{-1}(\text{kg}^{-1})$ per $\text{kBq}\cdot\text{m}^{-2}$; w_{ad}^{mil} and w_{ad}^{veg} – daily consumption of cow's milk and leafy vegetables by an adult, $\text{L}(\text{kg})\cdot\text{d}^{-1}$.

The total annual effective internal dose, $D_{ad}^{int,86}$, calculated using Equation (1) was determined by approximately 90% due to the intake of ^{137}Cs and ^{134}Cs [17, 19]. The dose normalized per unit ^{137}Cs deposition density in 1986 is $10.2 \text{ }\mu\text{Sv}$ per $\text{kBq}\cdot\text{m}^{-2}$ from ^{137}Cs and $7.1 \text{ }\mu\text{Sv}$ per $\text{kBq}\cdot\text{m}^{-2}$ from ^{134}Cs .

Correction factor for internal dose in 1986

The introduction of the correction factor, k_j^{86} , into the calculation of internal doses in 1986 related to the opportunity to correct 'theoretical' doses using the results of WBC measurements (performed from 15 July 1986 to 31 December 1986) in areas where these measurements were carried out (Fig. 1).

The correction factor k_j^{86} (Fig. 2) was estimated as the ratio of the average dose in the settlement from ^{137}Cs intake derived from individual WBC measurements to the 'theoretical' dose for an adult

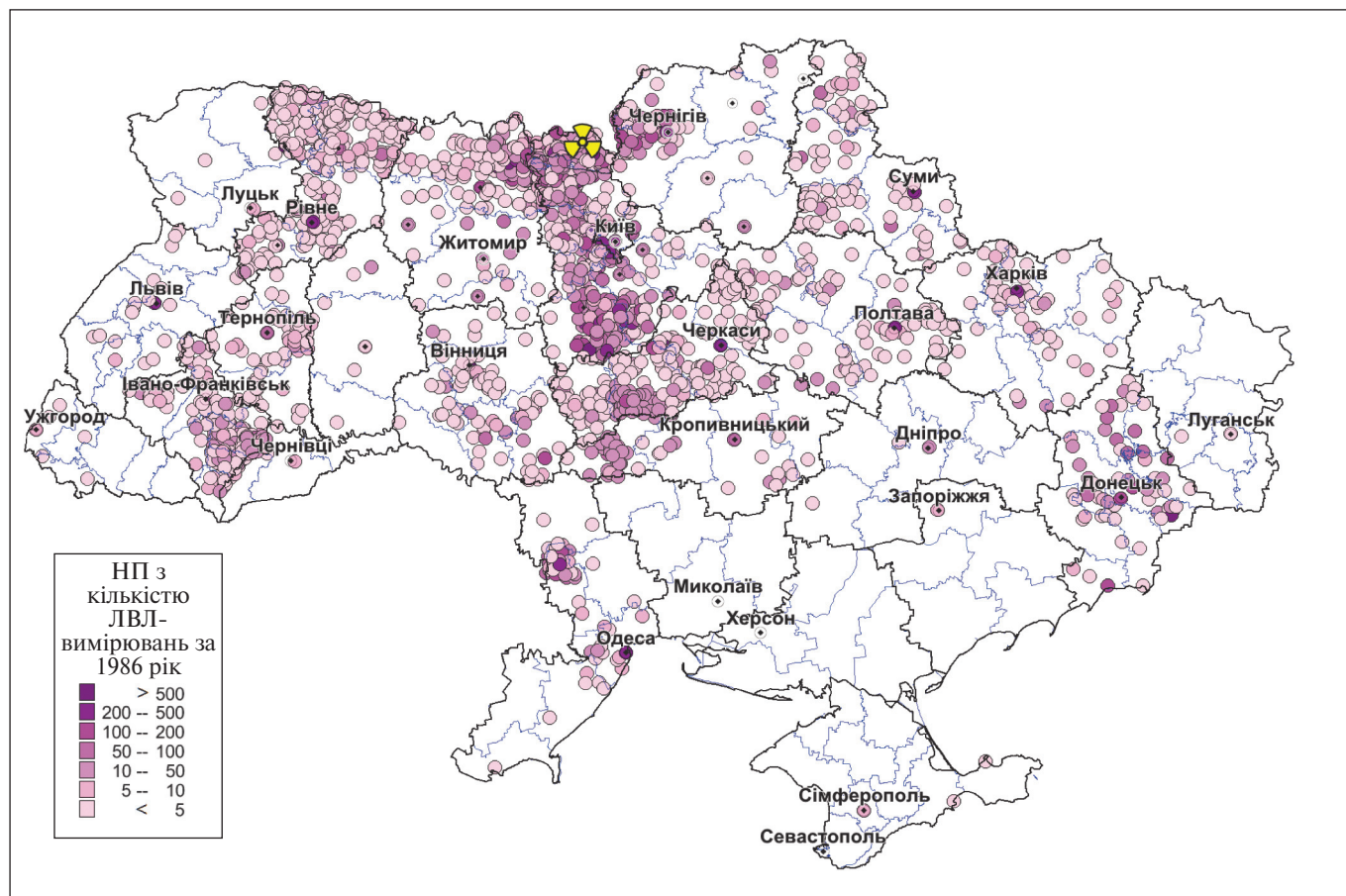


Рисунок 1. Розподіл ЛВЛ-вимірювань, проведених в Україні у 1986 році

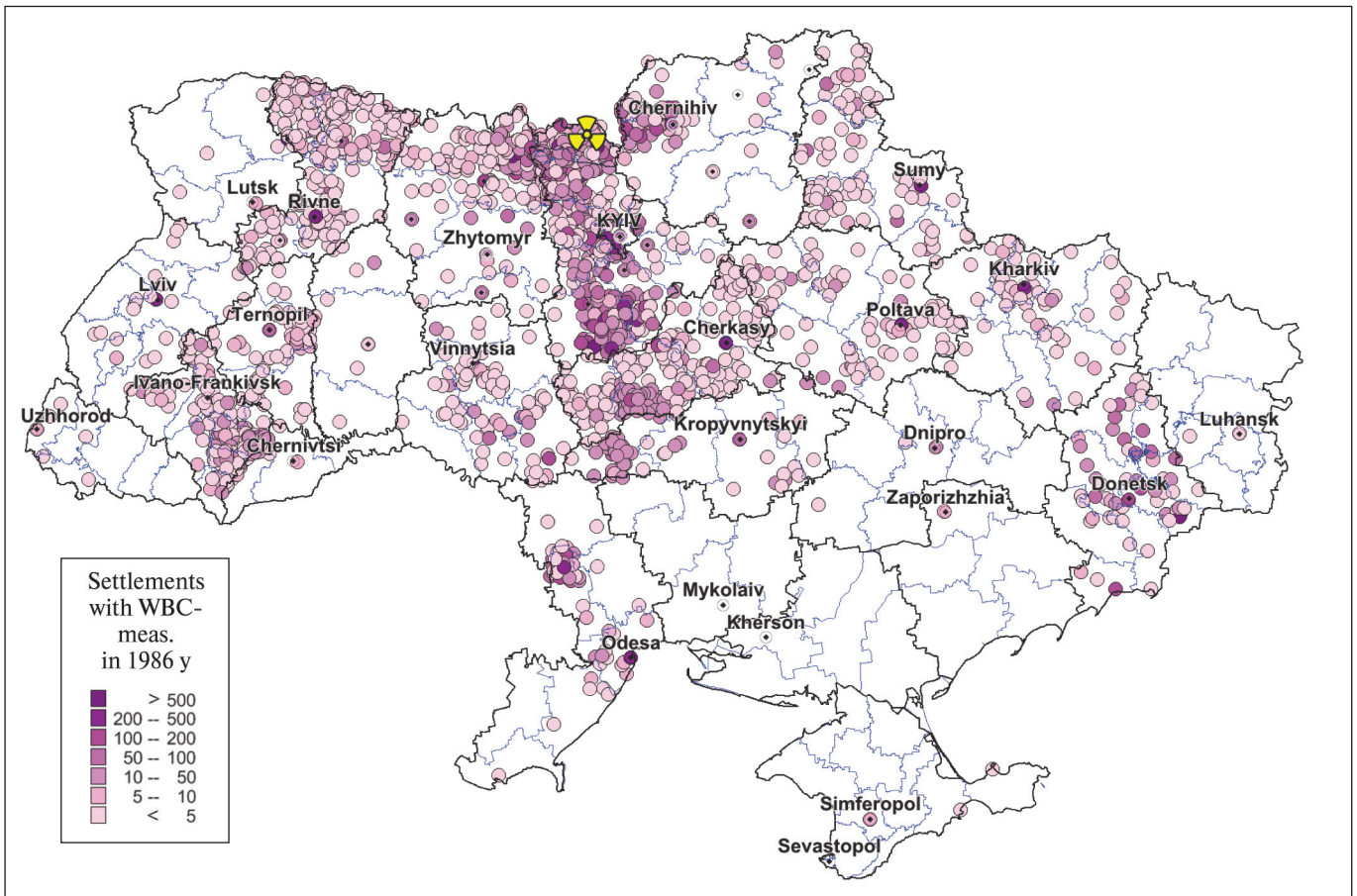


Figure 1. Distribution of WBC measurements conducted in Ukraine in 1986

зи для дорослої людини у цьому НП, розрахованої за формулами (1) та (2):

resident of this settlement calculated using Equations (1) and (2):

$$k_j^{86} = \frac{\frac{1}{N_j} \sum_{i,a} D_{a,j,i}^{WBC,86} \cdot f_{a,i}^{86}}{D_{ad,j}^{int,86}} \quad (3)$$

де $D_{a,j,i}^{WBC,86}$ – індивідуальна доза внутрішнього опромінення від ^{137}Cs обчислена за даними ЛВЛ-вимірювань у j -му населеному пункті у i -ї особи, Зв;
 $D_{ad,j}^{int,86}$ – теоретична доза для дорослої людини у j -му НП, розрахована за формулами (1) та (2), Зв;
 N_j – кількість ЛВЛ-вимірювань у j -му населеному пункті;
 $f_{a,i}^{86}$ – віковий коефіцієнт для вікової групи a , до якої належить i -та особа, б/р.

where $D_{a,j,i}^{WBC,86}$ – individual internal dose from ^{137}Cs intake derived from the results of WBC measurement of the i -th person resided in the j -th settlement, Sv;
 $D_{ad,j}^{int,86}$ – 'theoretical' dose for an adult resident of the j -th settlement calculated using Equations (1) and (2), Sv;

N_j – number of persons measured by WBC the j -th settlement;

$f_{a,i}^{86}$ – age factor for the age group a to which the i -th person belongs, unitless.

Віковий коефіцієнт f_a^{86} є відношенням нормованих на щільність випадень ^{137}Cs на ґрунті усереднених індивідуальних доз опромінення дорослих та представників вікової групи a :

The age factor, f_a^{86} , is the ratio of the average individual doses of adults and representatives of the age group a normalized to the ^{137}Cs deposition density:

$$f_a^{86} = \frac{\frac{1}{N_{ad}} \sum_{i,j} \frac{D_{ad,j,i}^{WBC,86}}{\sigma_{Cs,j}^{86}}}{\frac{1}{N_a} \sum_{i,j} \frac{D_{a,j,i}^{WBC,86}}{\sigma_{Cs,j}^{86}}} \quad (4)$$

де N_a та N_{ad} – кількість ЛВЛ-вимірювань, виконаних у 1986 році у представників вікової групи a та дорослих відповідно (табл. 1).

Відношення (4) розраховується для НП, де щільність забруднення ґрунту ^{137}Cs у 1986 році перевищувала $37 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-2}$. За нашими розрахунками, віковий коефіцієнт f_a^{86} становить 0,43; 0,39; 0,68; 1,09 та 1,02 для відповідних вікових груп: до 1 року, 1–2 роки, 3–7 років, 8–12 років та 13–17 років.

У зв'язку з обмеженою кількістю ЛВЛ-вимірювань було введено три рівні усереднення доз за результатами ЛВЛ-вимірювань, а фактично три рівні точності визначення k_j^{86} : населений пункт (k_j^{86}), район (k_R^{86}), область (k_O^{86}).

Для визначення k_j^{86} використовуються результати ЛВЛ-вимірювань, які задовольняють умовам: (1) вимірювання виконані у період з 15.07.1986 по 31.12.1986; (2) виміряна величина вмісту ^{137}Cs в організмі людини має бути більше половини від мінімально-детектованої активності (МДА) приладу або щільність випадіння в НП, де проводились вимірювання, більше $37 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-2}$; (3) кількість ЛВЛ-вимірювань в одному НП має бути не менше 10, якщо це НП сільського типу, не менше 50 у містах і не менше 100 в обласних центрах.

where N_a and N_{ad} – are the numbers of WBC measurements performed in 1986 in representatives of age group a and adults, respectively (see Table 1 below).

The Equation (4) was used for settlements where the ^{137}Cs deposition density exceeded $37 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-2}$ in 1986. According to our calculations, the age factor, f_a^{86} , was 0.43, 0.39, 0.68, 1.09, and 1.02 for the age groups <1 y, 1–2 y, 3–7 y, 8–12 y, and 13–17 years, respectively.

Due to the limited number of WBC measurements, three levels of dose averaging based on WBC measurements were introduced, which correspond to three levels of k_j^{86} accuracy: settlement (k_j^{86}), district (k_R^{86}), and oblast (k_O^{86}).

To calculate k_j^{86} , the results of WBC measurements that meet the following conditions were used:

- (1) measurements were performed from 15 July 1986 to 31 December 1986;
- (2) the measured ^{137}Cs activity in the human body should be more than half of the minimum detectable activity (MDA) of the WBC device or the ^{137}Cs deposition density in the settlement where the measurements were performed should be more than $37 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-2}$;
- (3) the number of WBC measurements should be at least 10 in a rural settlement, at least 50 in cities, and at least 100 in administrative centers of oblast.

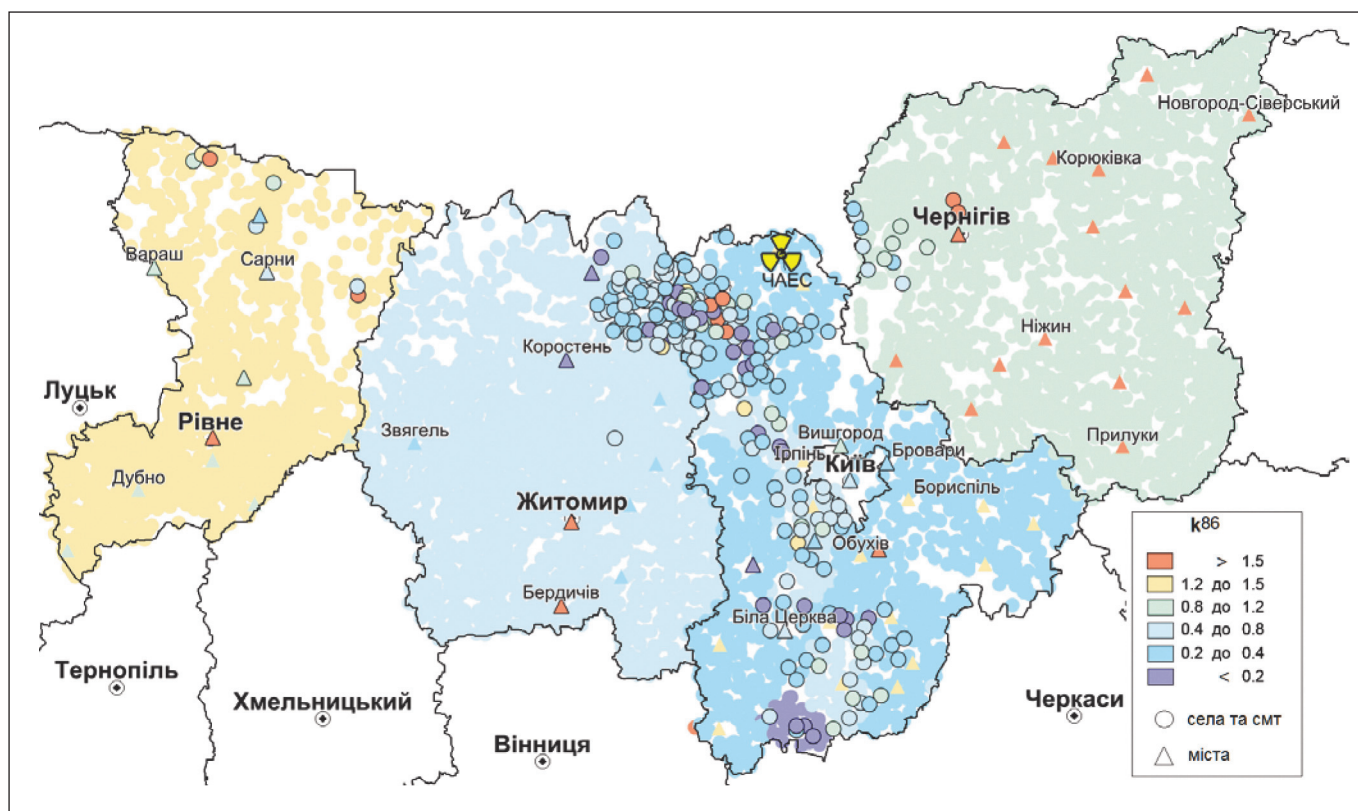


Рисунок 2. Розподіл коригуючих факторів k_j^{86} у Житомирській, Київській, Рівненській та Чернігівській областях України (символи \circ та \blacktriangle позначають НП, що задовольняють умовам (1)–(3))

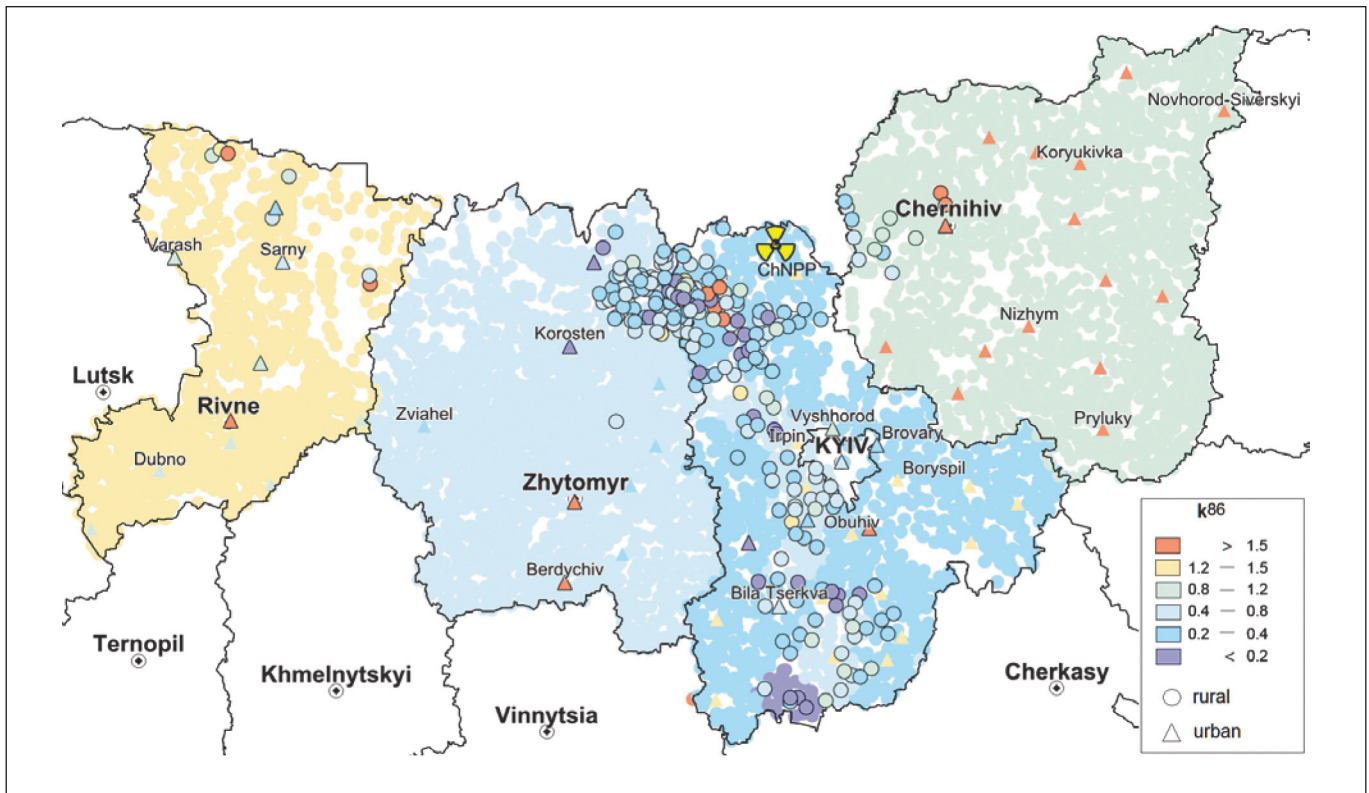


Figure 2. Distribution of correction factor-values, k_j^{86} , in Zhytomyrska, Kyivska, Rivnenska and Chernihivska Oblasts of Ukraine (symbols O and ▲ denote settlements that satisfy conditions (1)–(3))

Умова (2) пов’язана з тим, що у 1986 році для вимірювань інкорпорованого ^{137}Cs використовувались вимірювальні прилади (наприклад, ГТРМ-01Ц, ГКС, УР-1 тощо), МДА яких сягає тисяч беккерель. Тому в НП з відносно низькою щільністю випадіння ^{137}Cs на поверхню ґрунту результати вимірювань вмісту ^{137}Cs у тілі людини, як правило, не перевищують МДА і є занадто неточними.

Можливість розрахунку k_j^{86} для окремого НП (k_j^{86}) передбачає наявність у ньому ЛВЛ-вимірювань, що задовольняють умовам (1)–(3). Було розраховано 240 таких коефіцієнтів у межах чотирьох областей (табл. 1).

При неможливості оцінити k_j^{86} в окремому НП, розрахунок коригуючого фактору здійснюється на рівні району (k_R^{86}), проте у цьому районі мають бути не менше 5 сільських НП, що задовольняють умовам (1)–(3). В цьому випадку усереднення у формулі (3) відбувається по всіх ЛВЛ-вимірюваннях, виконаних в даному районі. Таких коефіцієнтів у межах чотирьох областей було розраховано 568 (табл. 1).

Якщо умови для розрахунку k_j^{86} на районному¹ рівні не виконуються, коригуючий фактор оцінюється на рівні області k_O^{86} з використанням результатів ЛВЛ-вимірювань в тих НП області, які задо-

Condition (2) is related to the fact that measurements of ^{137}Cs incorporated in the human body were performed in 1986 using measuring devices (e.g., GTRM-01C, GKS, UR-1, etc.) with an MDA of thousands of becquerels. Therefore, in the settlements with a relatively low ^{137}Cs deposition density, the results of measurements of ^{137}Cs body-burden, as a rule, did not exceed the MDA and turned out to be inaccurate.

The possibility to calculate correction factor-values for a specific j -th settlement k_j^{86} , assumes the presence of WBC measurements in the settlement that satisfy conditions (1)–(3) above. We calculated the settlement-specific correction factors for 240 settlements in four oblasts (Table 1).

If it is not possible to estimate k_j^{86} in a given settlement, the calculation of the correction factor was carried out at the district level, k_R^{86} , but district should include at least 5 rural settlement that satisfy conditions (1)–(3) above. In this case, the averaging in Equation (3) was performed over all the WBC measurements performed in a given district. A total of 568 district-specific correction factors, were calculated in four oblasts (Table 1).

If the conditions for calculating k_j^{86} at the district level¹ were not met, the correction factor was estimated at the oblast level, k_O^{86} , using the results of WBC

¹За адміністративним поділом до 2020 року

¹According to administrative division in 2020

Таблиця 1

Кількість НП у чотирьох областях України, для яких були розраховані k_j^{86} різного рівня (для окремих НП, на рівні району та на рівні області)

Table 1

The number of settlements in four regions of Ukraine, for which of different k_j^{86} levels were calculated (for individual settlements, at the district level and at the oblast level)

Область / Oblast	Окремі НП Individual settlements	Районний рівень District level	Обласний рівень / Oblast level		Кількість осіб, виміряних на ЛВЛ Number of WBC measurements
			Міста / Urban	Сільські НП / Rural	
Житомирська / Zhytomyrska	62	30	5	1630	10967
Київська / Kyivska	152	409	19	775	15722
Рівненська / Rivnenska	12	0	5	1060	613
Чернігівська / Chernihivska	14	129	14	1449	980
Всього / Total	240	568	43	4914	28282

вольняють умовам (1)–(3). При цьому доза опромінення усереднюється окремо для НП сільського типу (села, селища, селища міського типу) та НП, які мають статус міст (табл. 1).

Відмінність у різних регіонах (рис. 2) пов'язана зі специфікою екологічних і кліматичних умов на радіоактивно забруднених територіях та обсягом впроваджених контрзаходів. Серед них: початок випасу худоби у 1986 році, види трав на пасовищі – сіяні чи дикорослі, кількість опадів, рівні споживання продукції, виробленої у підсобних господарствах, самообмеження споживання тощо.

Оцінка доз внутрішнього опромінення осіб дитячого та підліткового віку у 1986 році

Розрахунок параметра RI_a^{86} базується на припущенні, що відносно надходження радіоцезію з раціоном різних вікових груп є приблизно сталим для мешканців усіх НП на території України. Величина RI_a^{86} у 1986 р. розраховується як відношення нормованих на щільність випадіння ^{137}Cs на ґрунті у 1986 році усереднених за віковою групою a індивідуальних величин надходження ^{137}Cs в організм дітей/підлітків ($q_{a,j,i}^{86}$) та дорослих ($q_{ad,j,i}^{86}$):

$$RI_a^{86} = \frac{\frac{1}{N_a} \sum_{i,j} \frac{q_{a,j,i}^{86}}{\sigma_{Cs,j}^{86}}}{\frac{1}{N_{ad}} \sum_{i,j} \frac{q_{ad,j,i}^{86}}{\sigma_{Cs,j}^{86}}} = \frac{\frac{1}{N_a} \sum_{i,j} \frac{U_{a,j,i}^{86} \cdot \lambda_{a,Cs}^{int}}{\sigma_{Cs,j}^{86}}}{\frac{1}{N_{ad}} \sum_{i,j} \frac{U_{ad,j,i}^{86} \cdot \lambda_{ad,Cs}^{int}}{\sigma_{Cs,j}^{86}}} \quad (5)$$

де $U_{a,j,i}^{86}$ та $U_{ad,j,i}^{86}$ – індивідуальні значення вмісту ^{137}Cs в організмі, зареєстровані при ЛВЛ-вимірюваннях у 1986 році у дітей/підлітків віку a та у дорослих (ad) у населеному пункті j , Бк;

measurements in those settlements of the oblast that meet conditions (1)–(3). In this case, the dose is averaged separately for rural areas (villages, towns, urban-type settlements) and for settlements with the status of cities (Table 1).

Differences in on different territories (see Fig. 2) are related to the specifics of environmental and climatic conditions in radioactively contaminated areas and the scope of countermeasures implemented. These include: the beginning of cattle grazing in 1986, types of grasses on the pasture (sown or wild), precipitation, consumption levels of products produced in subsidiary farms, self-limitation of consumption, etc.

Estimation of internal doses to children and adolescents in 1986

The calculation of the parameter RI_a^{86} was based on the assumption that the relative intake of radiocaesium in the diet of different age groups is approximately constant for residents of all settlements in Ukraine. The value of RI_a^{86} was calculated as the ratio of ^{137}Cs intake for children / adolescents averaged for age group a ($q_{a,j,i}^{86}$) to that averaged for adults ($q_{ad,j,i}^{86}$) normalized to the ^{137}Cs deposition density:

where $U_{a,j,i}^{86}$ and $U_{ad,j,i}^{86}$ – individual values of ^{137}Cs content in the body measured by WBC in 1986 in children / adolescents of age group a and in adults resided in j -th settlement, respectively, Bq;

$\lambda_{a,Cs}^{int}$ та $\lambda_{ad,Cs}^{int}$ – константи напіввиведення радіоцезію з організму, дітей/підлітків віку a та дорослих, доба⁻¹ [24].

Значення RI_a^{86} розраховувалось за формулою (5) для усієї України для п'яти вікових груп: < 1, 1–2, 3–7, 8–12 та 13–17 років незалежно від НП проживання. Значення параметра RI_a^{86} представлено в табл. 2.

Таблиця 2

Усереднені значення відносного надходження радіоцезію з раціоном () для дітей та підлітків у 1986 році

Table 2

The average values of the relative intake of radiocesium with the diet () for various in 1986

Вік особи, роки Age, y	Кількість осіб, виміряних на ЛВЛ Number of WBC measurements	RI_a^{86}
< 1	176	1.1
1–2	884	2.3
3–7	3382	1.8
8–12	4943	1.2
13–17	4166	1.0
18+	18823	1.0

Внутрішнє опромінення у 1987–2023 роках

У період 1987–2023 років суттєвий внесок у дозу внутрішнього опромінення населення радіоактивно забруднених територій робили лише радіонукліди ¹³⁷Cs та ¹³⁴Cs, останній з них впливав на формування дози лише у перші 5–7 післяаварійних років. На момент аварії співвідношення активностей ¹³⁴Cs : ¹³⁷Cs складало 1 : 2, а в наступні роки воно зменшувалось завдяки швидшому розпаду ¹³⁴Cs [18, 25].

Модель реконструкції індивідуалізованих доз внутрішнього опромінення від радіонуклідів цезію у період 1987–2023 років представлено на рис. 3. При цьому розглядається три основні ситуації: 1) НП був охоплений ЛВЛ-моніторингом; 2) НП не був охоплений ЛВЛ-моніторингом, але був охоплений молочним моніторингом; 3) НП, в якому ЛВЛ-вимірювання та вимірювання питомої активності ¹³⁷Cs у молоці не проводились.

Ситуація 1) характерна для відносно невеликої кількості населених пунктів у найбільш постраждалих областях північної України, тоді як більша частина населених пунктів України ЛВЛ-моніторингом не охоплювалась (табл. 3). Навіть у найбільш благополучних з точки зору наявності ЛВЛ-вимірювань областях (табл. 4) ситуація стає суттєво менш благополучною, якщо розглядати розподіл вимірювань по роках. ЛВЛ-вимірювання розподілені за роками вкрай нерівномірно, залишаючи окремі періоди майже неохопленими або навіть

$\lambda_{a,Cs}^{int}$ and $\lambda_{ad,Cs}^{int}$ – is the half-life of radiocesium in the body of children / adolescents of age group a and in adults, d⁻¹ [24].

The values of RI_a^{86} were calculated using Equation (5) for the entire Ukraine for the following age groups: < 1, 1–2, 3–7, 8–12, and 13–17 y, regardless of the place of residence. Table 2 gives the values of the parameter RI_a^{86} .

Internal exposure in 1987–2023

During the period 1987–2023, the main contribution to the internal radiation dose of the population of radioactively contaminated areas was made by ¹³⁷Cs and ¹³⁴Cs, and the latter of them contributed to the formation of the dose only in the first 5–7 years after the accident. At the time of the accident, the ratio of ¹³⁴Cs to ¹³⁷Cs activities was 1 to 2, and in subsequent years it decreased due to the faster decay of ¹³⁴Cs [18, 25].

Fig. 3 shows the model for reconstructing individualized internal doses from cesium radionuclides in the period 1987–2023. Three main situations are considered: 1) the settlement was covered by WBC monitoring; 2) the settlement was not covered by WBC monitoring, but was covered by milk monitoring; 3) the settlement in which WBC measurements and measurements of ¹³⁷Cs activity in milk were not performed.

Situation 1) was realized in a relatively small number of settlements in the most contaminated regions of northern Ukraine, while most of the settlements in Ukraine were not covered by WBC monitoring (Table 3). Even in the most favorable oblasts in terms of the availability of WBC measurements (Table 4), the situation becomes significantly less favorable when considering the distribution of WBC measurements by year. WBC measurements are extremely unevenly distributed over the years, leaving some periods almost uncovered or even completely uncov-

Таблиця 3
Охоплення ЛВЛ-вимірюваннями населених пунктів України

Table 3
Coverage of WBC measurements of populated areas of Ukraine

Область / Oblast	Кількість* населених пунктів Number* of settlements	Кількість* населених пунктів з наявністю ЛВЛ-вимірювань Number* of settlements with WBC measurements	Відсоток населених пунктів, охоплених** ЛВЛ-моніторингом Percentage of settlements covered** by WBC monitoring
Вінницька / Vinnytska	1513	77	5.1
Волинська / Volynska	1075	–	–
Луганська / Luhanska	942	–	–
Дніпропетровська / Dnipropetrovska	1536	–	–
Донецька / Donetska	1305	–	–
Житомирська / Zhytomyrska	1717	556	32.4
Закарпатська / Zakarpatska	599	–	–
Запорізька / Zaporizka	968	–	–
Івано-Франківська / Ivano-Frankivska	793	–	–
Київська / Kyivska	1263	402	31.8
Кіровоградська / Kirovohradska	1065	–	–
АР Крим / AR Krym	1056	–	–
Львівська / Lvivska	1947	–	–
Миколаївська / Mykolaivska	963	–	–
Одеська / Odeska	1200	–	–
Полтавська / Poltavska	1940	–	–
Рівненська / Rivnenska	1030	314	30.5
Сумська / Sumska	1579	10	0.6
Тернопільська / Ternopilka	976	–	–
Харківська / Kharkivska	1846	–	–
Херсонська / Khersonska	744	–	–
Хмельницька / Khmelnytska	1452	–	–
Черкаська / Cherkaska	831	74	8.9
Чернівецька / Chernivetska	414	–	–
Чернігівська / Chernihivska	1570	215	13.7

Примітки. *Тут і нижче адміністративний поділ України та чисельність населених пунктів в межах адміністративних одиниць наведено на 1986 рік; **населений пункт вважається охопленим моніторингом, якщо для нього існують результати не менше 10 ЛВЛ-вимірювань
Notes. * Here and below, the administrative division of Ukraine and the number of settlements within the boundaries of administrative units are given for 1986; **a settlement is considered covered by monitoring if there are results of at least 10 WBC measurements

повністю неохопленими. Отже, найбільша увага в моделі реконструкції індивідуалізованих доз приділяється ситуаціям 2) і 3).

Загальний вираз для оцінки річної ефективної дози внутрішнього опромінення в T -му році ($T > 1986$ р.) представника a -ї вікової групи, що проживав у j -му НП, можна записати так:

$$D_{a,j}^{int,T} = RI_a \cdot Q_{ad,j}^T \cdot d_{a,Cs}^{int,T} \quad (6)$$

де $Q_{ad,j}^T$ – кумулятивне річне надходження ^{137}Cs з раціоном харчування до організму дорослої людини, що мешкає у j -му НП, Бк;

RI_a – відносне міжвікове надходження ^{137}Cs з раціоном мешканців вікової групи a , б/р;

$d_{a,Cs}^{int,T}$ – річна ефективна доза внутрішнього опромінення представника вікової групи a у рік T на одиницю перорального надходження ^{137}Cs , Зв·Бк $^{-1}$.

ered. Therefore, the greatest attention in the individualized dose reconstruction model was paid to situations 2) and 3).

The general equation for estimating the annual effective internal dose in the T -th year ($T > 1986$) for a representative of the a -th age group living in the j -th settlement can be written as:

where $Q_{ad,j}^T$ – cumulative annual intake of ^{137}Cs with the diet by an adult living in the j -th settlement, Bq;

RI_a – relative intake of ^{137}Cs with a diet for a representative of the age group a compared to an adult, unitless;

$d_{a,Cs}^{int,T}$ – annual effective internal dose to a representative of age group a in year T per unit of ^{137}Cs ingestion, Sv·Bq $^{-1}$.

Таблиця 4

Охоплення ЛВЛ-вимірюваннями населених пунктів чотирьох найбільш забруднених радіонуклідами областей України за роками

Table 4

Coverage by WBC measurements of settlements in the 4 most polluted regions of Ukraine by years

Рік / Year	Київська область Kyivska Oblast	Житомирська область Zhytomyrska Oblast	Рівненська область Rivnenska Oblast	Чернігівська область Chernihivska Oblast
	Відсоток населених пунктів з наявністю ЛВЛ-вимірювань Percentage of settlements covered by WBC monitoring			
1987	2,1	11,6	3,7	2,0
1988	0,2	11,4	7,3	0,3
1989	1,0	3,3	5,6	0,2
1990	0,1	14,4	3,9	–
1991	2,1	5,8	1,5	–
1992	0,3	1,7	0,2	–
1993	0,3	0,9	0,3	–
1994	1,0	2,7	0,4	–
1995	1,3	10,0	5,7	0,8
1996	6,1	12,6	15,6	1,8
1997	10,7	17,1	19,8	7,4
1998	7,1	16,2	14,1	3,2
1999	3,0	9,0	12,4	4,8
2000	7,5	9,1	11,1	5,4
2001	9,3	10,8	10,4	4,7
2002	2,8	5,7	11,7	–
2003	–	9,7	11,8	3,5
2004	3,2	10,1	13,8	2,1
2005	6,3	6,9	13,5	3,8
2006	3,5	8,7	10,1	2,2
2007	0,6	5,8	12,7	2,9
2008	2,1	5,9	12,0	2,9
2009	0,7	0,3	–	–
2010	0,6	0,4	–	–
2011	7,8	7,3	11,7	2,7
2012	4,4	4,3	7,6	–
2013	2,0	1,8	6,4	–

Величина $d_{a,Cs}^{int,T}$ у рівнянні (6) розраховується за формулою:

The value of $d_{a,Cs}^{int,T}$ in Equation (6) was calculated as:

$$d_{a,Cs}^{int,T} = (E_{a,Cs7}^{int} + 0,5 \cdot K_{Cs4}^T \cdot E_{a,Cs4}^{int}) \tag{7}$$

де $E_{a,Cs7}^{int}$ та $E_{a,Cs4}^{int}$ – дозові коефіцієнти МКРЗ [20] внутрішнього опромінення від ^{137}Cs та ^{134}Cs відповідно для представників вікової групи a на одиницю перорального надходження, Зв·Бк⁻¹;
 K_{Cs4}^T – коригувальний фактор, що враховує швидший радіоактивний розпад ^{134}Cs порівняно з ^{137}Cs , б/р:
 $K_{Cs4}^T = e^{(\lambda_{Cs7} - \lambda_{Cs4}) \cdot (T - 1986) \cdot 365}$;
 λ_{Cs7} та λ_{Cs4} – сталі радіоактивного розпаду радіоізотопів ^{137}Cs та ^{134}Cs , відповідно, доба⁻¹

where $E_{a,Cs7}^{int}$ and $E_{a,Cs4}^{int}$ – ICRP ingestion dose coefficients for ^{137}Cs and ^{134}Cs , respectively, for representatives of age group a [20], Sv·Bq⁻¹;
 K_{Cs4}^T – correction factor taking into account the faster radioactive decay of ^{134}Cs compared to ^{137}Cs , unitless: $K_{Cs4}^T = e^{(\lambda_{Cs7} - \lambda_{Cs4}) \cdot (T - 1986) \cdot 365}$;
 λ_{Cs7} and λ_{Cs4} – radioactive decay rate of ^{137}Cs and ^{134}Cs , respectively, d⁻¹.

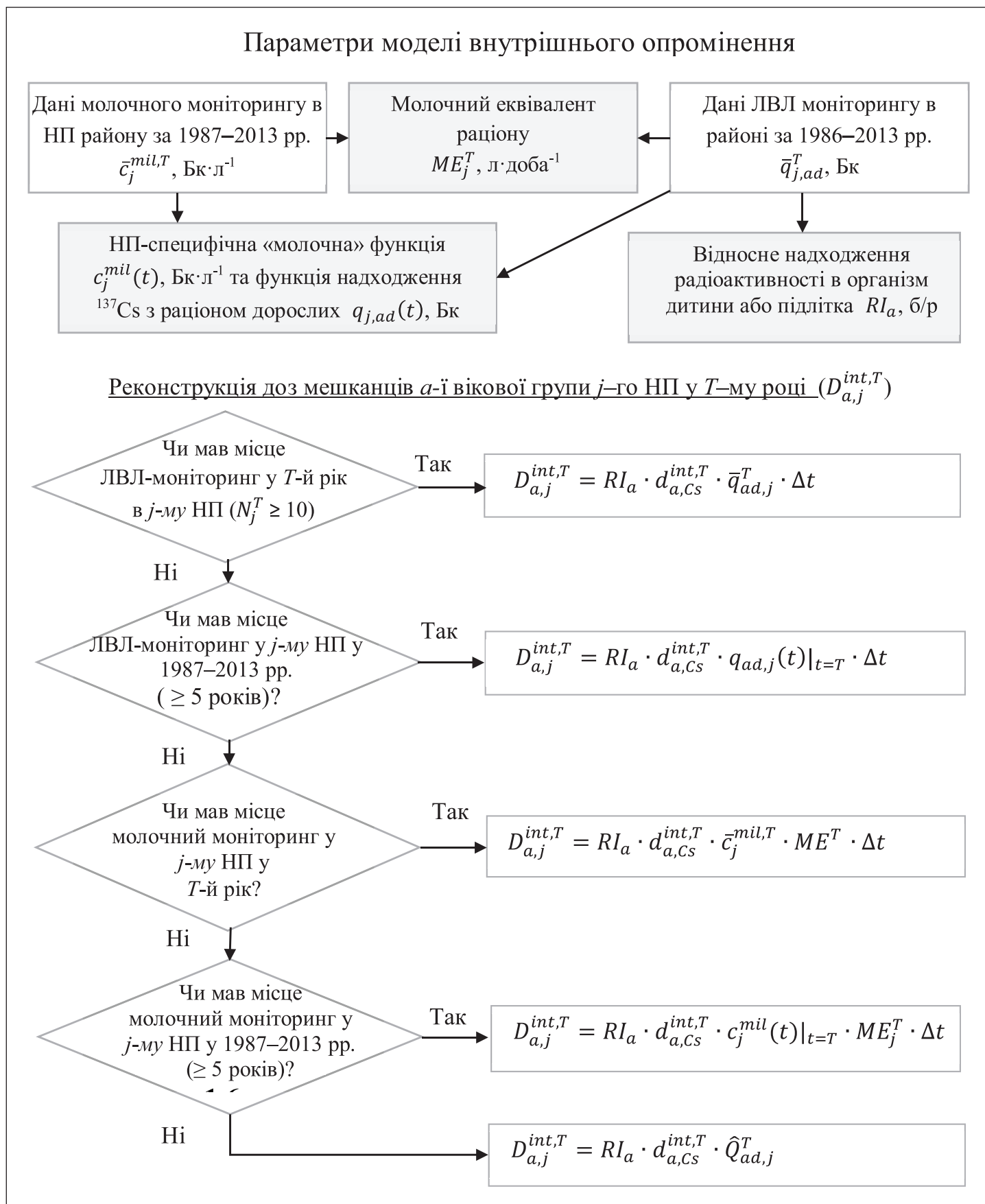


Рисунок 3. Схема реконструкції доз внутрішнього опромінення у 1987–2023 рр.

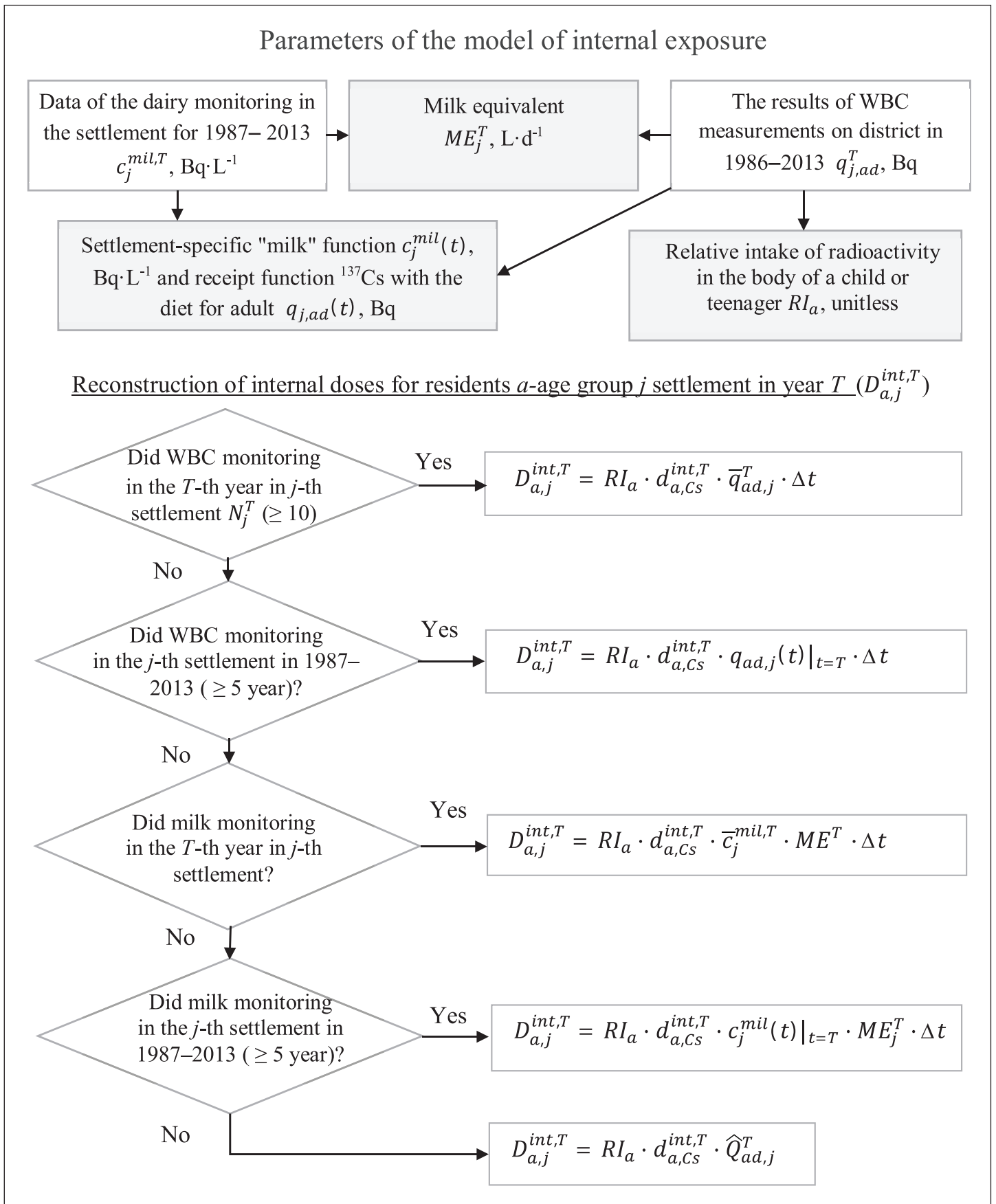


Figure 3. Scheme of internal doses reconstruction in 1987–2023

Оцінка доз внутрішнього опромінення у населених пунктах, охоплених ЛВЛ-моніторингом

Для оцінки $Q_{ad,j}^T$ – кумулятивного річного (у T -му році) надходження ^{137}Cs з раціоном харчування до організму дорослої людини, що мешкає у j -му НП, пріоритет надається усередненим результатам ЛВЛ-вимірювань активності інкорпорованого ^{137}Cs у тілі людини в тому НП, де проживала особа: (середнє значення $\bar{q}_{ad,j}^T$ або функція, яка його апроксимує – $q_{ad,j}(t)$):

$$Q_{ad,j}^T = \bar{q}_{ad,j}^T \cdot \Delta t = \bar{U}_{ad,j}^T \cdot \lambda_{Cs,ad}^{int} \cdot \Delta t \quad (8)$$

де $\bar{U}_{ad,j}^T$ – середній вміст ^{137}Cs у організмі дорослого мешканця j -го НП, Бк;

$\lambda_{Cs,ad}^{int}$ – стала напіввиведення радіоцезію з організму дорослих [24];

$\Delta t = 365$ діб.

Якщо у j -му НП району у T -й рік ЛВЛ-моніторинг не проводився, але в цьому НП принаймні у 5 окремих роках (з яких хоча б у один рік до 1992 року та хоча б у один рік після 2004 року) впродовж періоду 1986–2013 років виконувалися ЛВЛ-вимірювання дорослих жителів (не менше 5 вимірювань на один рік), то для цього НП за результатами наявних ЛВЛ-вимірювань будується НП-специфічна функція надходження ^{137}Cs з раціоном дорослих мешканців НП $q_{ad,j}(t)$, а рівняння для $Q_{ad,j}^T$ набувають вигляду:

$$Q_{ad,j}^T = q_{ad,j}(t)|_{t=T} \cdot \Delta t, \quad (9)$$

$$q_{ad,j}(t) = a_j^{wbc} \cdot (b_j^{wbc} \cdot \exp(-l_{j1}^{wbc} \cdot t) + (1 - b_j^{wbc}) \cdot \exp(-l_{j2}^{wbc} \cdot t)), \quad (10)$$

де a_j^{wbc} [Бк·доба⁻¹], b_j^{wbc} [б/р], l_{j1}^{wbc} [доба⁻¹], l_{j2}^{wbc} [доба⁻¹] – параметри, що оцінюються за даними ЛВЛ-моніторингу при апроксимації надходження ^{137}Cs з раціоном дорослих мешканців j -го НП. На рис. 4 представлено середньорічні значення $\bar{q}_{ad,j}^T$ та функція $q_{ad,j}(t)$ для двох НП північного регіону України. Функція $q_{ad,j}(t)$ використовується лише для тих НП, де оцінка параметрів цієї функції характеризується значенням коефіцієнта детермінації $R^2 > 0,5^1$.

Estimation of internal doses in settlements covered by WBC monitoring

To estimate $Q_{ad,j}^T$ the cumulative annual (in year T) ^{137}Cs intake with the diet for an adult person residing in the j -th settlement, priority was given to the average results of WBC measurements of the ^{137}Cs activity incorporated in the human body carried out in the settlement where the person lived: (average value $\bar{q}_{ad,j}^T$ or its approximating function $q_{ad,j}(t)$):

where $\bar{U}_{ad,j}^T$ – average ^{137}Cs activity in the body of an adult resident of the j -th settlement, Bq;

$\lambda_{Cs,ad}^{int}$ – half-life of radiocesium in the body of adults [24];

$\Delta t = 365$ days.

If in the j -th settlement in the T -th year, WBC monitoring was not conducted, but in this settlement at least during 5 separate years (including at least one year before 1992 and at least one year after 2004) in 1986–2013 WBC measurements of adults were performed (at least 5 measurements per year), then for this settlement, based on the results of available WBC measurements, a settlement-specific function of ^{137}Cs intake with the diet for adults $q_{ad,j}(t)$ was derived with the following equations for $Q_{ad,j}^T$:

where a_j^{wbc} [Bq·d⁻¹], b_j^{wbc} [unitless], l_{j1}^{wbc} [d⁻¹], l_{j2}^{wbc} [d⁻¹] – parameters of approximation of ^{137}Cs intake with diet derived from the results of WBC measurements of adult residents of the j -th settlement. Fig. 4 shows the average annual values of $\bar{q}_{ad,j}^T$ and the function $q_{ad,j}(t)$ for two settlements in the northern Ukraine. The function $q_{ad,j}(t)$ was used only for those settlements where the parameters of approximation were characterized by the value of the coefficient of determination $R^2 > 0.5^1$.

¹Коефіцієнт 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.

¹The coefficient of determination (R^2) is a statistical indicator used in statistical models as a measure of the dependence of the variation of the dependent variable on the variation of the independent variables. It shows the extent to which the available observations confirm the model.

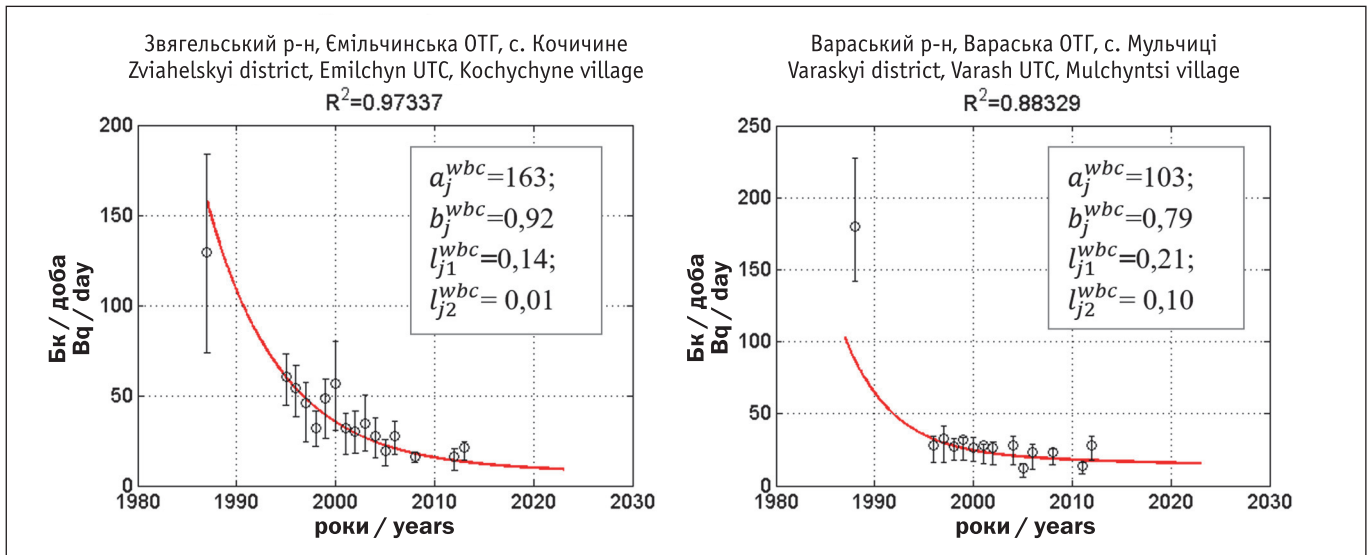


Рисунок 4. Приклади емпіричних (O) середньорічних значень та модельних (суцільна крива) функцій надходження ^{137}Cs до організму дорослих з раціоном

Figure 4. Examples of empirical (O) average annual values and model (solid curve) settlement-specific function of ^{137}Cs intake for adults with diet,

Розрахунок доз внутрішнього опромінення у населених пунктах, не охоплених ЛВЛ-моніторингом, але охоплених молочним моніторингом

За відсутності достатнього ЛВЛ-моніторингу використовуються значення концентрації ^{137}Cs у молоці приватних господарств, усереднені по j -му НП в T -му році:

Calculation of internal doses in settlements not covered by WBC monitoring but covered by milk monitoring

In the absence of the required number of WBC measurements, measurements of the ^{137}Cs activity concentration in milk from privately owned cows in the j -th settlement, averaged over the year T , were used:

$$Q_{ad,j}^T = c_j^{mil,T} \cdot ME_j^T \cdot \Delta t, \tag{11}$$

де $c_j^{mil,T}$ – питома радіоактивність ^{137}Cs у молоці, виробленому в приватних господарствах j -го НП у рік (не менше 5 вимірювань у поточному році), $\text{Bq} \cdot \text{L}^{-1}$, ME_j^T – цезієвий молочний еквівалент¹ раціону для дорослих у j -му НП у рік T , $\text{L} \cdot \text{doba}^{-1}$.

where $c_j^{mil,T}$ – ^{137}Cs activity concentration in milk from privately owned cows in the j -th settlement (at least 5 measurements in the current year), $\text{Bq} \cdot \text{L}^{-1}$; ME_j^T – is the cesium milk equivalent¹ of the diet for adults in the j -th settlement in year T , $\text{L} \cdot \text{d}^{-1}$.

Якщо у j -му НП в T -му році не проводився молочний моніторинг, то для цього НП будується НП-специфічна «молочна» функція часової динаміки питомої активності ^{137}Cs у коров'ячому молоці $c_j^{mil}(t)$ (рис. 5). У цьому випадку надходження радіоцезію до організму дорослої людини розраховується за співвідношенням:

If milk monitoring was not conducted in the j -th settlement in year T , then a settlement-specific «milk» function describing variation with time of ^{137}Cs activity concentration in cow's milk, $c_j^{mil}(t)$, was constructed for the settlement (Fig. 5). The ^{137}Cs intake by adults was calculated using the following equation:

$$Q_{ad,j}^T = c_j^{mil}(t)|_{t=T} \cdot ME_j^T \cdot \Delta t, \tag{12}$$

де ME_j^T – молочний еквівалент раціону для дорослих у j -му НП у рік T , $\text{L} \cdot \text{doba}^{-1}$.

where ME_j^T – a milk equivalent of the adult diet in the j -th settlement in year T , $\text{L} \cdot \text{d}^{-1}$.

¹Цезієвий молочний еквівалент – це гіпотетичне добове споживання молока, виробленого у приватних господарствах населеного пункту (літрів на добу), яке могло б забезпечити надходження в організм дорослої людини точно такої ж кількості радіонукліда ^{137}Cs , як і весь раціон людини.

¹The cesium milk equivalent is a hypothetical daily consumption of milk produced in private households of a settlement (liters per day), which equal to exactly the same ^{137}Cs intake as with the entire diet.

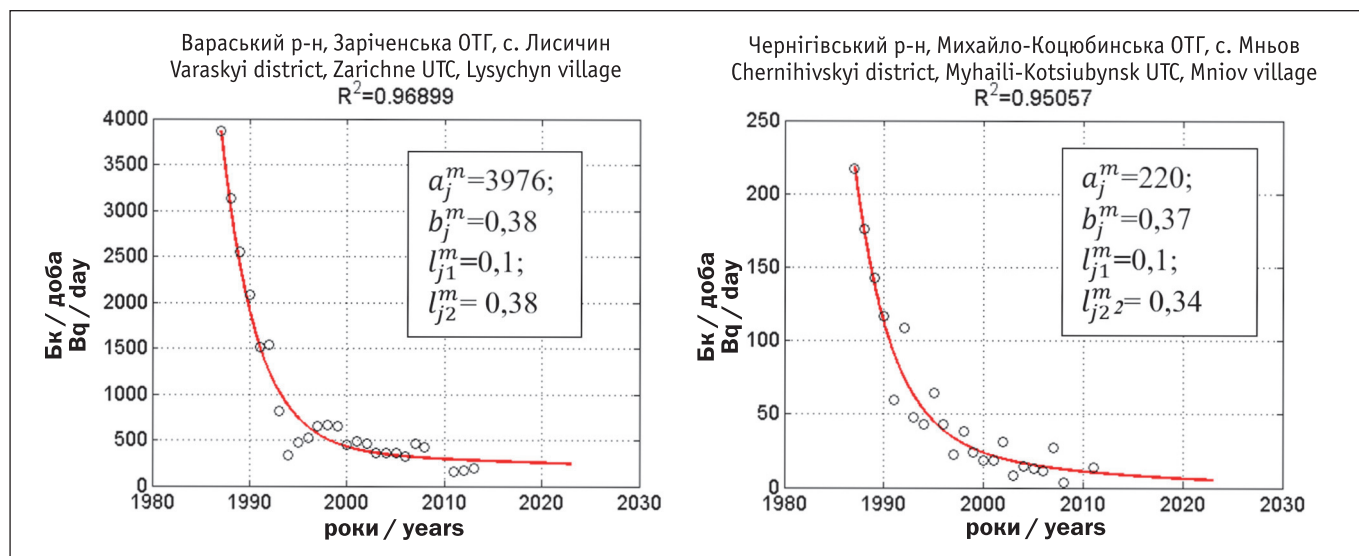


Рисунок 5. Приклади апроксимації середньорічної питомої активності ¹³⁷Cs у молоці (суцільна крива) за результатами вимірювань (○)

Figure 5. Examples of approximation of the average annual specific activity of ¹³⁷Cs in milk (solid curve) and the measurement results (○)

Для апроксимації функції $c_j^{mil}(t)$ використовується такий вираз:

$$c_j^{mil}(t) = a_j^m \cdot (b_j^m \cdot \exp(-l_{j1}^m \cdot t) + (1 - b_j^m) \cdot \exp(-l_{j2}^m \cdot t)), \quad (13)$$

де a_j^m [Бк·доба⁻¹], b_j^m [б/р], l_{j1}^m [доба⁻¹], l_{j2}^m [доба⁻¹] – параметри, що оцінюються.

Функція $c_j^{mil}(t)$ використовується лише для тих НП, де оцінка параметрів цієї функції характеризується значенням коефіцієнта детермінації $R^2 > 0,5$.

Оскільки масовий моніторинг концентрації ¹³⁷Cs у молоці почався лише з 1991 році, для періоду 1987–1990 років оцінювались значення питомої активності ¹³⁷Cs у молоці за загальноукраїнською двічі нормованою (на щільність випадінь ¹³⁷Cs у 1986 р. та на коефіцієнт переходу «грунт–молоко» у 1992 році) «молочною» функцією [19, 22], що представлена в табл. 5.

The function $c_j^{mil}(t)$ has the following form:

where a_j^m [Bq·L⁻¹], b_j^m [unitless], l_{j1}^m [d⁻¹], l_{j2}^m [d⁻¹] – parameters of approximation.

The function $c_j^{mil}(t)$ was used only for those settlements where the parameters of approximation were characterized by the value of the coefficient of determination $R^2 > 0.5$.

Since large-scale monitoring of ¹³⁷Cs activity concentration in cow's milk began only in 1991, the values of ¹³⁷Cs activity concentration in milk for the period 1987–1990 were estimated using the all-Ukrainian «milk» function that was normalized to the ¹³⁷Cs deposition density and to the ¹³⁷Cs soil-to-milk transfer coefficient in 1992 [19, 22] (Table 5).

Таблиця 5

Параметри загальноукраїнської референтної «молочної» функції $\tilde{c}_{UA}^{mil}(t)$, яка використовується для оцінки вмісту ¹³⁷Cs у молоці у 1986–1990 роках

Table 5

Parameters of the all-Ukrainian reference «milk» function $\tilde{c}_{UA}^{mil}(t)$, which is used to estimate the content of ¹³⁷Cs in milk in 1986–1990

Параметр / Parameter	$\tilde{c}_{UA}^{mil}(t) = a \cdot (b \cdot \exp(-l_1 \cdot t) + (1 - b) \cdot \exp(-l_2 \cdot t))$			
	a	b	l_1	l_2
	л ² ·Бк ⁻¹ ·доба ⁻¹ / L ² Bq ⁻¹ · d ⁻¹	б/р / unitless	рік ⁻¹ / year ⁻¹	рік ⁻¹ / year ⁻¹
Середнє / Average	3,46	0,9	0,236	0,046
STD	0,17	0,04	0,021	0,031

Реконструкція цезієвого молочного еквіваленту раціону

Молочний еквівалент раціону (ME_j^T , л·доба⁻¹) для мешканців j -го НП у рік T визначається як середнє значення індивідуальних молочних еквівалентів раціону $IME_{j,i}^T$, розраховане на основі усіх індивідуальних ЛВЛ-вимірювань, виконаних у T -му році у j -му НП серед осіб, старше 7 років:

$$ME_j^T = \frac{1}{N_j^T} \cdot \sum_i IME_{j,i}^T \quad (14)$$

де N_j^T – кількість ЛВЛ-вимірювань у НП у році T .

Індивідуальний молочний еквівалент $IME_{j,i}^T$ розраховується за формулою:

$$IME_{j,i}^T = \frac{U_{j,i}^T \cdot \lambda_{Cs,a}^{int}}{c_j^{mil,T}} \quad (15)$$

де $U_{j,i}^T$ – вміст ¹³⁷Cs в організмі i -го мешканця j -го НП, який проходив ЛВЛ-вимірювання у році T , Бк.

Безпосередній розрахунок ME_j^T можливий лише в тих НП, де проводився у достатній кількості як молочний, так і ЛВЛ-моніторинг. Насправді таких пунктів відносно небагато, тому для оцінки молочного еквіваленту була побудована математична модель, яка апроксимує ME_j^T залежно від характеристик ґрунту в околиці НП (рис. 6–8). Якщо НП розташований у адміністративному районі з достатнім рівнем молочного та ЛВЛ-моніторингу у період ΔT , то апроксимоване значення молочного еквівалента \widehat{ME}_j^T коригується на районний коефіцієнт $k_R^{\Delta T}$, який визначається як відношення середнього значення молочного еквівалента (усереднюється в межах району за період ΔT), розрахованого безпосередньо за результатами цих моніторингів (молочного та ЛВЛ), та середнього теоретичного значення:

$$\widehat{ME}_j^T = (m_1^T \cdot p_{j,1} + m_2^T \cdot p_{j,2} + m_3^T \cdot p_{j,3} + m_4^T \cdot p_{j,4}) \cdot k_R^T \quad (16)$$

$$k_R^{\Delta T} = \frac{\sum_{j \in R, T \in \Delta T} ME_j^T}{\sum_{j \in R, T \in \Delta T} \widehat{ME}_j^T} \quad (17)$$

де $p_{j,1}, p_{j,2}, p_{j,3}, p_{j,4}$ – частки чотирьох груп ґрунтів (рис. 8) у буферній зоні j -го НП, б/р;

$m_1^T, m_2^T, m_3^T, m_4^T$ – коефіцієнти, визначені у результаті регресійного аналізу для кожної з чотирьох груп ґрунтів у рік T , л·доба⁻¹.

Reconstruction of the cesium milk equivalent of the diet

The milk equivalent of the diet (ME_j^T , L·d⁻¹) for residents of the j -th settlement in year T was defined as the average value of individual milk equivalents of the diet, $IME_{j,i}^T$, calculated based on all individual WBC measurements performed the j -th settlement in year T among persons older than 7 years:

$$ME_j^T = \frac{1}{N_j^T} \cdot \sum_i IME_{j,i}^T \quad (14)$$

where N_j^T – number of WBC measurements conducted in the j -th settlement in year T .

Individual milk equivalent of the diet, $IME_{j,i}^T$, was calculated using the following equation:

$$IME_{j,i}^T = \frac{U_{j,i}^T \cdot \lambda_{Cs,a}^{int}}{c_j^{mil,T}} \quad (15)$$

where $U_{j,i}^T$ – ¹³⁷Cs activity in the body of the i -th resident of the j -th settlement who was measured by WBC in year T , Bq.

The direct calculation of ME_j^T was possible only in those settlements where monitoring of both cow's milk and WBC were conducted with a sufficient number of measurements, but there are relatively few such settlements. Therefore, to estimate the milk equivalent, a mathematical model was built that approximated ME_j^T depending on the characteristics of the soil in the vicinity of the settlement (Fig. 6–8). If the settlement is located in an administrative district with a sufficient number of milk and WBC measurements in the period ΔT , then the approximated value of milk equivalent, \widehat{ME}_j^T , was adjusted by the district coefficient $k_R^{\Delta T}$, which was defined as the ratio of the average milk equivalent (averaged within the district over the period ΔT) derived from milk and WBC measurements and the average theoretical value:

$$\widehat{ME}_j^T = (m_1^T \cdot p_{j,1} + m_2^T \cdot p_{j,2} + m_3^T \cdot p_{j,3} + m_4^T \cdot p_{j,4}) \cdot k_R^T \quad (16)$$

$$k_R^{\Delta T} = \frac{\sum_{j \in R, T \in \Delta T} ME_j^T}{\sum_{j \in R, T \in \Delta T} \widehat{ME}_j^T} \quad (17)$$

where $p_{j,1}, p_{j,2}, p_{j,3}, p_{j,4}$ – fraction of four soil types (Fig. 8) in the vicinity of the j -th settlement, unitless;

$m_1^T, m_2^T, m_3^T, m_4^T$ – coefficients determined by the regression analysis for each of the four soil types in year T , L·d⁻¹.

Характеристики ґрунтів

Ґрунтовий покрив України досить різноманітний, тому для оцінки параметрів моделей розрахунку індивідуалізованих доз необхідним є узагальнення характеристик ґрунтів. Для цього було використано електронну версію «Карти ґрунтів» [26, 27], складену на основі районних карт ґрунтів масштабу 1:25000, які формувались за матеріалами великомасштабних досліджень ґрунтів у 1957–1961 роках. Дана карта ідентифікує 198 видів ґрунту. На рис. 6 зображено електронну карту ґрунтів України з розподілом ґрунтів, які були зведені до 41 типу ґрунту. Легенда цієї карти представлена на рис. 7.

Аналіз залежності надходження радіоцезію в організм людини від характеристик ґрунту в околиці НП неможливий у випадку детальної класифікації ґрунтів (рис. 6–7), оскільки кількість ЛВЛ-вимірів у НП з певними типами ґрунтів буде незначною або взагалі нульовою. Тому було прийнято рішення об’єднати все розмаїття ґрунтів в чотири великі групи, виходячи з їхніх фізико-хімічних характеристик. Це такі групи ґрунтів: (1) дерново-підзолисті піщані ґрунти; (2) глинисті ґрунти; (3) торфово-болотні ґрунти; (4) сірі лісові ґрунти та чорноземи. На рис. 7 ліворуч кожного кольорового прямокутника, що позначає окремий тип ґрунту, зображено цифру, що відображає його приналежність до однієї з 4 груп ґрунтів. На рис. 8 показаний підсумковий територіальний розподіл ґрунтів за 4 групами.

Soil characteristics

The soil cover of Ukraine is quite diverse, therefore, generalization of soil characteristics was necessary to estimate the parameters of individualized dose calculation models. For this purpose, an electronic version of the soil map [26, 27] was used. The soil map was compiled from regional soil maps at a scale of 1:25000 based on large-scale soil research carried out in 1957–1961. Fig. 6 shows an electronic soil map of Ukraine with the geographical pattern of 41 soil types (see Fig. 7 for legend).

The analysis of the dependence of radiocesium intake in the human body on soil characteristics in the vicinity of the settlement was impossible using a detailed classification of soils (Figs. 6–7), since the number of WBC measurements in the settlement with certain soil types was small or even zero. Therefore, it was decided to combine all soil types into four large groups based on their physical and chemical characteristics: (1) sod-podzolic sandy soil; (2) clay soil; (3) peat-boggy soil; (4) gray forest soil and chernozems. Fig. 7 shows the soil type number that reflects its belonging to one of the four soil groups (see on the left of each colored rectangle). Fig. 8 shows the geographical pattern of four soil groups.

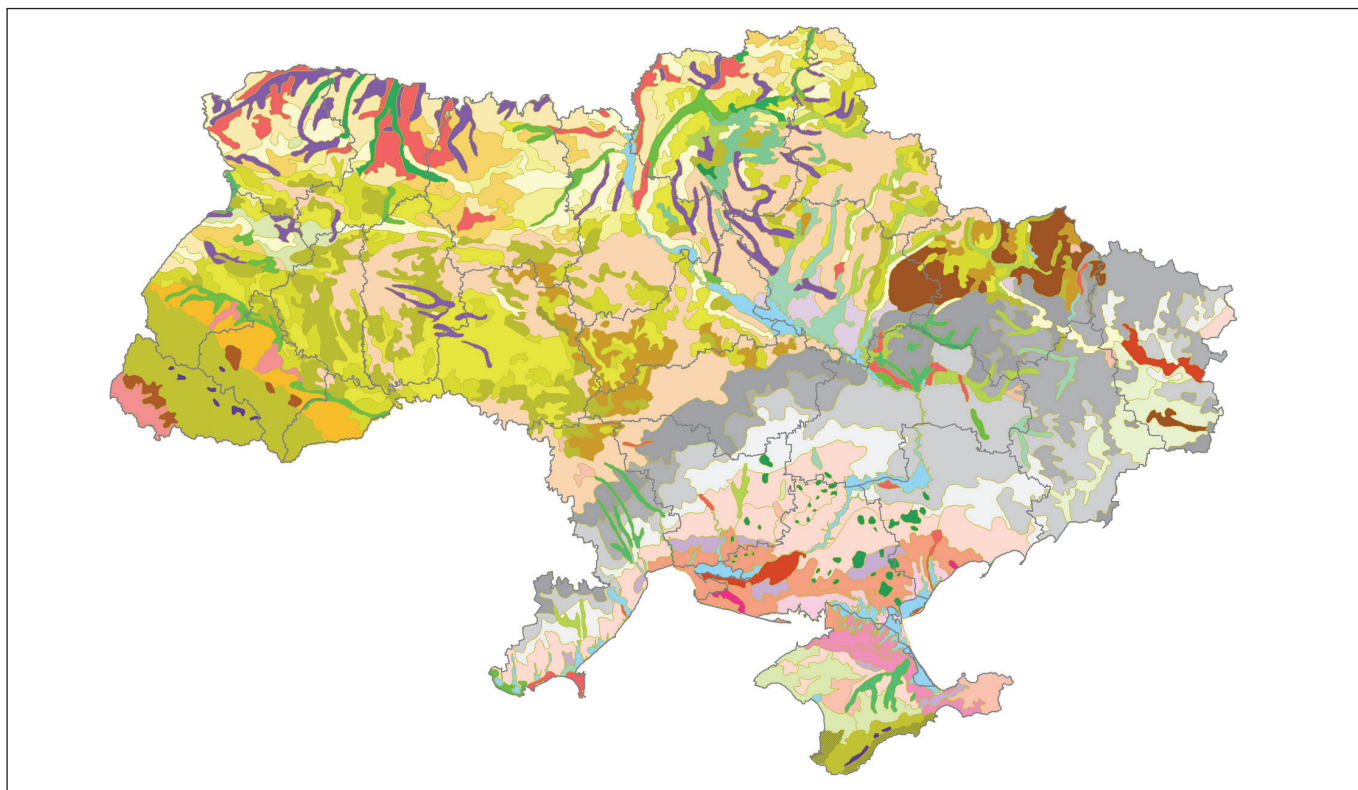


Рисунок 6. Карта ґрунтів України, зведена до 41 типу ґрунту

Figure 6. Soil map of Ukraine, summarized into 41 soil types

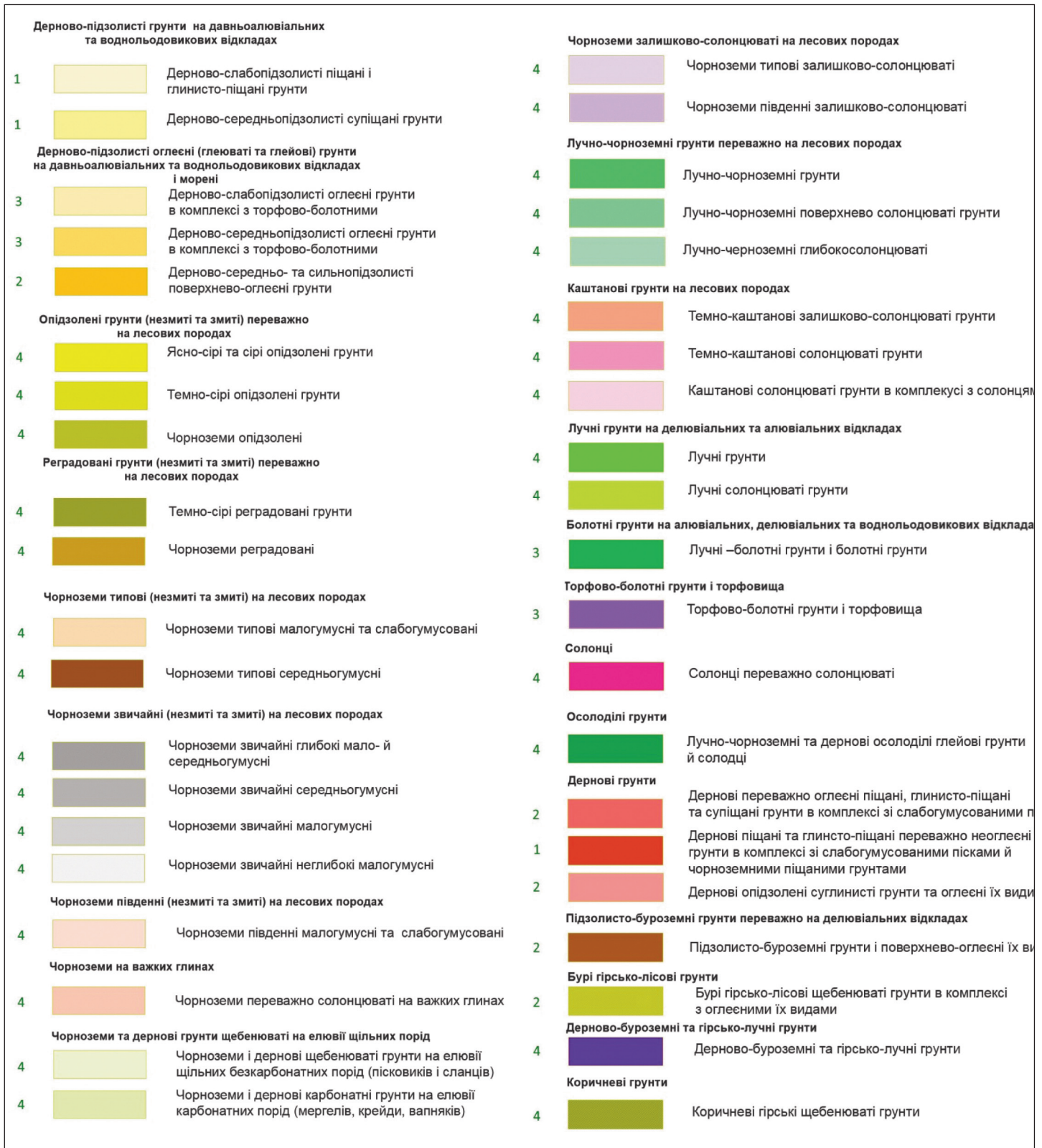


Рисунок 7. Опис типів ґрунтів, відображених на рис. 6

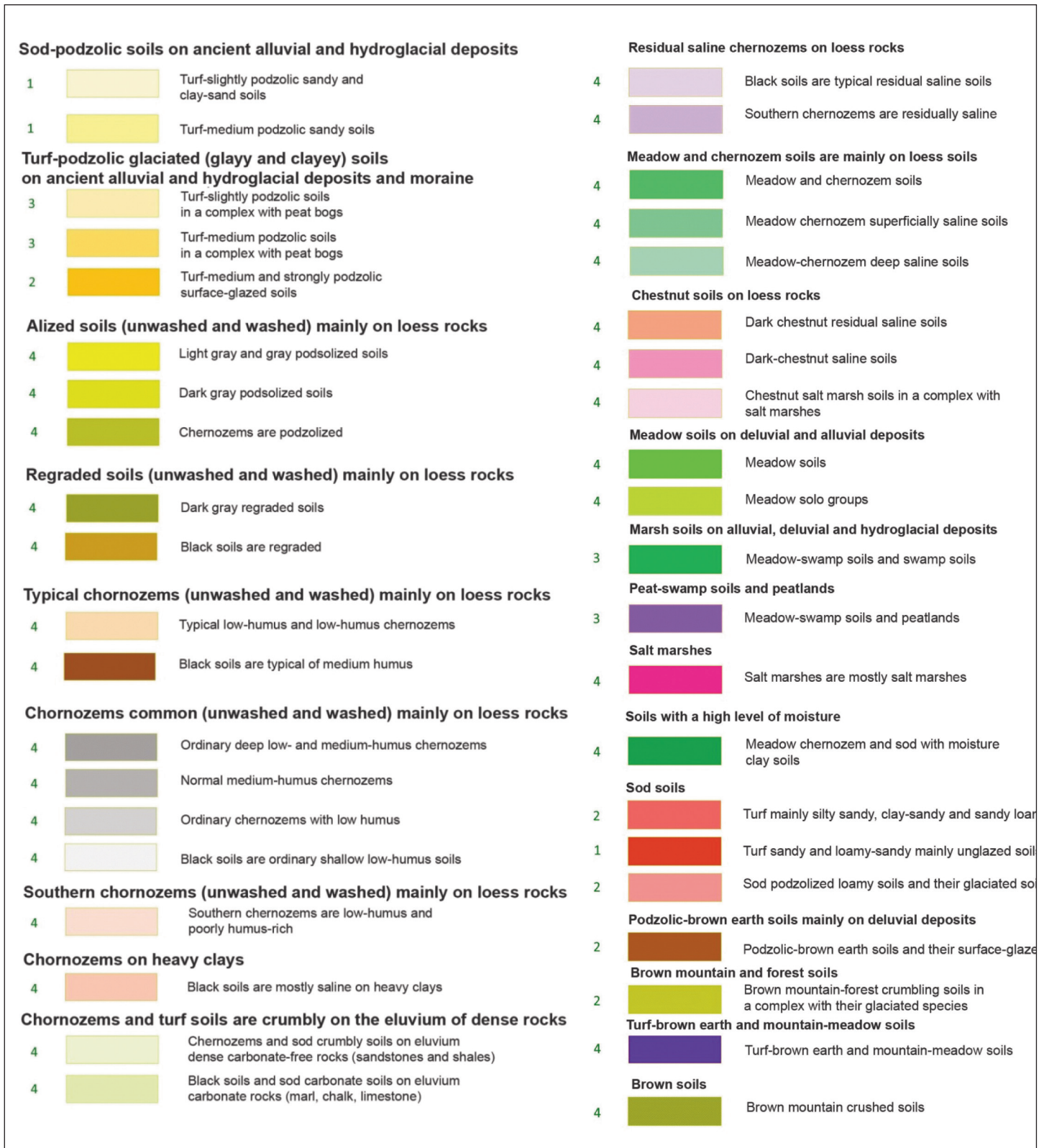


Figure 7. Description of soil types shown in Fig. 6

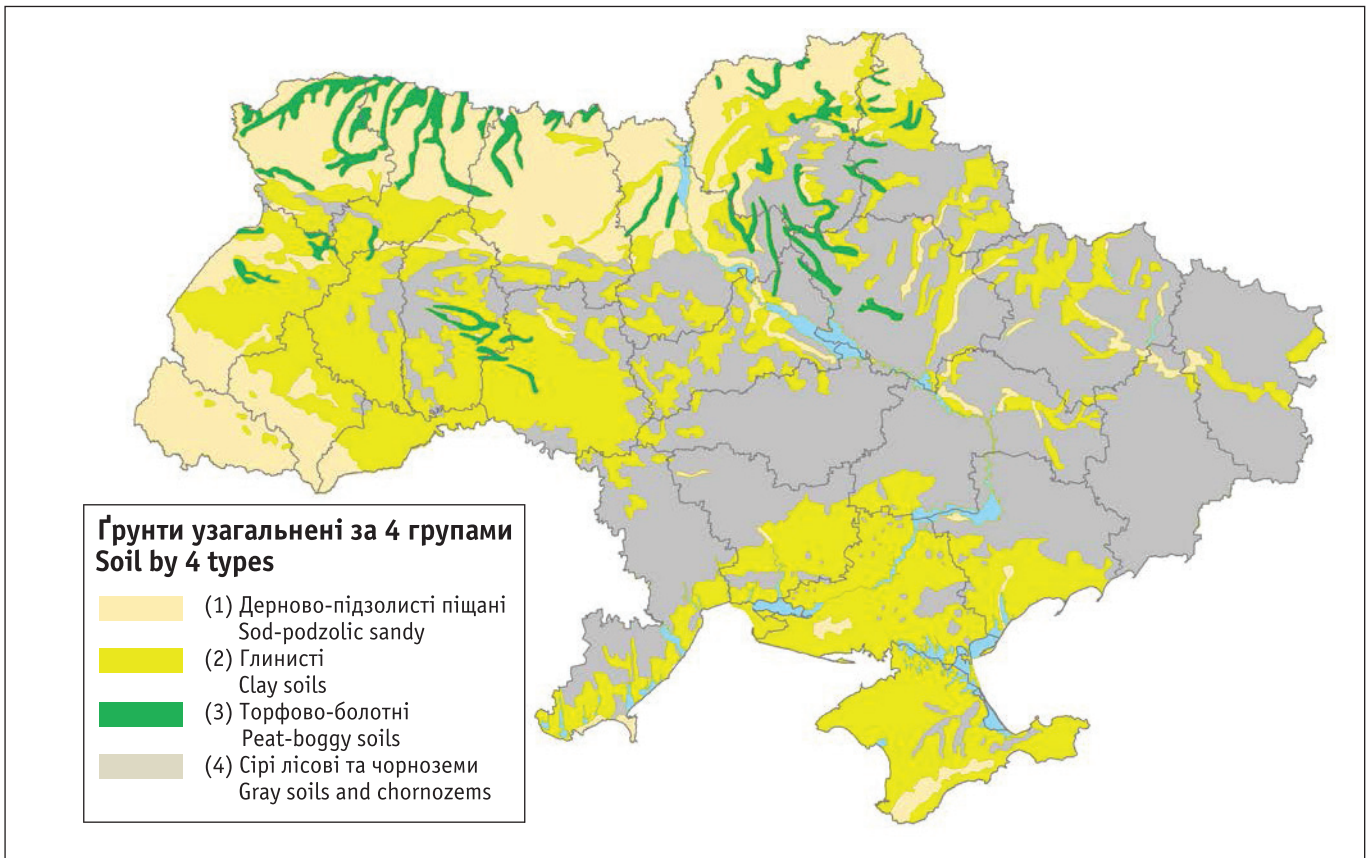


Рисунок 8. Карта ґрунтів України, об'єднаних в 4 групи

Figure 8. Map of soil types in Ukraine categorized into 4 groups

Реконструкція доз внутрішнього опромінення у населених пунктах, де ЛВЛ-вимірювання та вимірювання питомої активності ^{137}Cs у молоці не проводились

Якщо в НП результати ЛВЛ- та молочного моніторингу взагалі відсутні, або вони недостатні для побудови апроксимаційних функцій $q_{ad,j}(t)$ або $c_j^{mil}(t)$, для оцінки доз внутрішнього опромінення використовується апроксимаційне значення надходження ^{137}Cs в організм дорослого мешканця.

Якщо в районі R є хоча б 10 населених пунктів, у яких за допомогою формул (8)–(13) вдалося розрахувати $Q_{ad,j}^T$, то кумулятивне річне надходження ^{137}Cs з раціоном харчування до організму дорослої людини у T -му році у J -му НП можна оцінити за співвідношенням:

$$\hat{Q}_{ad,J}^T = \sigma_{Cs,J}^{86} \cdot \frac{1}{N_R^T} \cdot \sum_{j \in R} \frac{Q_{ad,j}^T}{\sigma_{Cs,j}^{86}} \quad (18)$$

У протилежному випадку для кожного року T з інтервалу 1987–2013 років будується лінійна регресійна модель, що пов'язує величини надходження ^{137}Cs у організм $Q_{ad,j}^T$, отримані за результатами ЛВЛ-вимірювань, нормованих на щільність випадень ^{137}Cs на ґрунті у 1986 році, з чотирма групами ґрунтів на тери-

Reconstruction of internal doses in settlements where WBC measurements and measurements of ^{137}Cs activity in milk were not performed

If WBC and milk monitoring was not conducted in the settlement or the number of measurements was insufficient to derive the approximation functions $q_{ad,j}(t)$ or $c_j^{mil}(t)$, then the approximation value of ^{137}Cs intake into the body was used to estimate internal doses in an adult resident.

If there are at least 10 settlements in the district R where $Q_{ad,j}^T$ was calculated using Equations (8)–(13), then the annual ^{137}Cs intake with the diet to the adults in J -th settlement in year T was calculated as:

Otherwise, for each year T in 1987–2013, a linear regression model was used to estimate the ^{137}Cs intake, $Q_{ad,j}^T$, derived from the results of WBC measurements and normalized to the ^{137}Cs deposition density in the settlement, based on four soil types in the settlement vicinity. For this purpose,

торії буферної зони населеного пункту. Для побудови регресії використовується множина ЛВЛ-вимірювань, виконаних серед усіх жителів України старше 7 років.

Річне надходження ^{137}Cs в організм дорослого мешканця j -го НП розраховується таким чином:

$$Q_{ad,j}^T = \sigma_{Cs,j}^{1986} \left(k_1^T \cdot p_{j,1} + k_2^T \cdot p_{j,2} + k_3^T \cdot p_{j,3} + k_4^T \cdot p_{j,4} \right) \quad (19)$$

де $p_{j,1}, p_{j,2}, p_{j,3}, p_{j,4}$ – частки чотирьох груп ґрунтів (рис. 8) у буферній зоні j -го НП, б/р;

$k_1^T, k_2^T, k_3^T, k_4^T$ – коефіцієнти, визначені у результаті регресійного аналізу для кожної з чотирьох груп ґрунтів у рік T , Бк на $\text{кБк}\cdot\text{м}^{-2}$.

Внутрішнє опромінення дітей та підлітків після 1986 року

Параметр Rla після 1986 р. розраховується як усереднене за всі роки післяаварійного періоду відносне (міжвікове) надходження ^{137}Cs до організму. Для районів з достатньою кількістю ЛВЛ-вимірювань у кожній віковій групі визначалось районне значення Rla . Для інших районів використовувалось середнє значення по області. Через недостатню кількість ЛВЛ-вимірювань серед немовлят, вікові групи <1 року та 1–2 роки були об'єднані (позначається як 0–2 роки).

Параметр Rla оцінюється у два етапи. Спочатку він розраховується за кожний окремий рік періоду 1986–2023 років. Після цього отримані щорічні параметри усереднюються за весь період:

$$RI_{a,R}^T = \frac{1}{N_R^T} \cdot \sum_{j \in R} \frac{\bar{q}_{a,j}^T}{\bar{q}_{ad,j}^T} = \frac{1}{N_R^T} \cdot \sum_{j \in R} \frac{\bar{U}_{a,j}^T \cdot \lambda_{a,Cs}^{int}}{\bar{U}_{ad,j}^T \cdot \lambda_{ad,Cs}^{int}} \quad (20)$$

$$RI_a = \frac{1}{N_R} \cdot \sum_T RI_{a,R}^T \quad (21)$$

де N_R^T – кількість НП у районі (області) R , для яких було розраховано НП-специфічне відносне надходження ^{137}Cs у році T , б/р;

$\bar{U}_{a,j}^T$ та $\bar{U}_{ad,j}^T$ – середні значення вмісту ^{137}Cs в організмі за результатами ЛВЛ-вимірювань у T -й рік у j -му НП у дітей/підлітків віку a та у дорослих відповідно, Бк;

$\lambda_{a,Cs}^{int}$ та $\lambda_{ad,Cs}^{int}$ – константи напіввиведення радіоцезію з організму дітей/підлітків віку a та дорослих відповідно, доба $^{-1}$;

N_R – кількість років, за які усереднюються дані у районі (області) R (з 1987 по 2013 р.).

the results of WBC measurements performed among all residents of Ukraine older than 7 years were used.

The annual ^{137}Cs intake for an adult resident of the j -th settlement was calculated as follows:

where $p_{j,1}, p_{j,2}, p_{j,3}, p_{j,4}$ – fraction of four soil types (Fig. 8) in the vicinity of the j -th settlement, unitless;

$k_1^T, k_2^T, k_3^T, k_4^T$ – coefficients determined by the regression analysis for each of the four soil types in year T , Bq per $\text{кБк}\cdot\text{м}^{-2}$.

Internal exposure of children and adolescents after 1986

The parameter Rla after 1986 was estimated as the average for all years of the post-accident period of the relative ^{137}Cs intake. For the districts with a sufficient number of WBC measurements in each age group, the district Rla -value was determined. For other districts, the average oblast-specific value was used. Due to the insufficient number of WBC measurements among infants, the age groups <1 year and 1–2 years were combined and denoted as 0–2 years.

The parameter Rla was estimated in two steps. First, it was calculated for each individual year in 1986–2023. Then, the obtained annual parameters were averaged over the entire period:

where N_R^T – number of settlements in the district (oblast) R for which the settlement-specific relative ^{137}Cs intake in year T was calculated;

$\bar{U}_{a,j}^T$ and $\bar{U}_{ad,j}^T$ – average ^{137}Cs content in the body according to the results of WBC measurements performed in the year T in the j -th settlement in children or adolescents of age a and in adults, respectively, Bq;

$\lambda_{a,Cs}^{int}$ and $\lambda_{ad,Cs}^{int}$ – half-life of radiocesium in the body of children or adolescents of age a and adults, respectively, d^{-1} ;

N_R – number of years for which data are averaged in the district (oblast) R from 1987 to 2013.

Таблиця 6

Усереднені значення відносного надходження радіоцезію з раціоном (RIa) за 1987–2013 роки для різних вікових груп

Table 6

Averaged values of the relative intake of radiocesium with the diet in 1987–2013 for different age groups (RIa)

Область / Oblast	Район / District	1–2 p/y		3–7 p/y		8–12 p/y		13–17 p/y	
		N	RI	N	RI	N	RI	N	RI
Житомирська	Коростенський / Korostenskyi	278	2,29	2224	1,80	4681	1,44	5052	1,15
	місто Коростень / Korosten city	737	2,28	4072	1,28	5834	1,15	6564	0,84
	Лугинський / Luhynskyi	761	1,53	3797	0,88	6026	0,67	5092	0,72
	Народицький / Naroditskyi	340	0,87	3258	0,66	6506	0,74	6890	0,83
	Овруцький / Ovrutskyi	771	1,43	6306	0,88	11214	1,01	13861	0,71
	місто Овруч / Ovruch town	84	0,92	3873	0,49	10238	0,53	6403	0,82
	Олевський / Olevskyi	646	1,52	4625	1,15	7446	0,94	6529	0,93
	Ємільчинський / Emilchynskyi	221	2,51	1480	1,77	4096	1,40	3874	1,10
	Малинський / Malynskyi	218	2,13	1278	1,20	2455	0,97	2109	0,88
Новоград-Волинський / Novohrad-Volynskyi	31	1,63	195	1,00	426	0,81	314	0,90	
Житомирська область, всього / Zhytomyrska oblast, total		4109	1,74	31256	1,17	59255	0,98	57105	0,90
Київська	Вишгородський / Vyshhorodskyi	52	2,42	626	1,82	2184	1,07	2100	0,92
	Іванківський / Ivankivskyi	807	3,65	4169	1,84	9287	1,10	9833	0,82
	Поліський / Poliskyi	310	1,39	2792	0,69	4517	0,71	3425	0,65
Київська область, всього / Kyivska oblast, total		1307	1,86	11245	1,23	28387	1,07	27036	0,99
Рівненська	Дубровицький / Dubrovytskyi	146	1,37	3177	1,01	4207	0,67	12120	0,98
	місто Дубровиця / Dubrovytsia town	290	2,20	997	0,87	8991	1,13	3350	0,84
	Рокитнівський / Rokytnivskyi	362	2,15	4608	0,96	15960	0,85	16646	0,83
	Сарненський / Sarnenskyi	161	1,50	2020	1,00	7656	0,93	8373	0,81
	Володимирецький / Volodymyretskeyi	151	2,40	1707	0,86	8202	0,97	8155	0,68
	Зарічненський / Zarichnenskyi	191	1,34	3441	0,80	11753	0,73	11221	0,77
Рівненська область, всього / Rivnenska oblast, total		1307	1,76	16184	0,86	60228	0,89	66074	0,77
Чернігівська	Козелецький / Kozeletskyi	31	2,08	261	0,94	1162	0,75	1068	0,87
	Ріпкинський / Ripkynskyi	14	1,20	174	1,21	363	1,03	350	0,91
	Семенівський / Semenivskyi	14	0,99	269	0,96	548	0,84	536	0,67
	Чернігівський / Chernihivskyi	23	2,18	297	0,96	793	0,89	906	0,77
Чернігівська область, всього / Chernihivska oblast, total		86	1,53	1128	1,08	3279	0,90	3249	1,20

У табл. 6 представлено значення параметра *RIa*, розраховані для різних вікових груп дітей та підлітків чотирьох областей.

Table 6 presents the *RIa*-values estimated for different age groups of children and adolescents in the four oblasts.

Оцінка дози внутрішнього опромінення після 2013 року

Після 2013 року широкомасштабний еколого-дозиметричний моніторинг об'єктів довкілля та тіла людини в Україні вже не проводився. За даними дозиметричної паспортизації 2011–2013 років у більшості НП річна паспортна доза не перевищувала встановлений законом ліміт для населення 1 мЗв [28].

Зважаючи на вищесказане, дозу внутрішнього опромінення від ¹³⁷Cs у рік *T* після 2013 року можна приблизно оцінити як поправлену на радіоактивний розпад середню дозу за останні три роки, у яких ще проводився еколого-дозиметричний моніторинг:

Assessment of internal dose after 2013

After 2013, large-scale environmental and dosimetric cow's milk and WBC monitoring ceased in Ukraine. According to the data of dosimetric certification in 2011–2013, the annual dose in most of the settlements did not exceed the legal limit of 1 mSv [28].

Therefore, the internal dose from ¹³⁷Cs intake in year *T* after 2013 was roughly estimated as the average dose corrected for radioactive decay for the last three years, in which environmental and dosimetric monitoring was still performed:

$$D_{a,j}^{int,T} = \frac{1}{3} (D_{a,j}^{int,2011} + D_{a,j}^{int,2012} + D_{a,j}^{int,2013}) \cdot \exp(-\lambda_{Cs7} \cdot \Delta T \cdot 365) \quad (22)$$

де $D_{a,j}^{int,2011}$, $D_{a,j}^{int,2012}$ та $D_{a,j}^{int,2013}$ – річні дози внутрішнього опромінення від ^{137}Cs представника вікової групи a у j -му НП у 2011, 2012 та 2013 роках відповідно, Зв;

λ_{Cs7} – стала радіоактивного розпаду радіонукліда ^{137}Cs , доба $^{-1}$;

ΔT – кількість років між 2012 роком і роком T , наприклад: $\Delta T=2$ при $T=2014$.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Реконструкція доз внутрішнього опромінення для жителів населених пунктів з відсутнім ЛВЛ-моніторингом і наявним молочним моніторингом

Для населених пунктів України з відсутніми ЛВЛ-вимірюваннями, але з наявністю даних щодо питомої активності ^{137}Cs в молоці, було виконана реконструкція річних значень молочного еквівалента ME_j^T за формулою (14) в період 1987–2013 років. Для цього було виконане моделювання залежності динаміки молочного еквівалента від типу ґрунту (таке моделювання можливе лише для територій, охоплених як молочним, так і ЛВЛ-моніторингом) з подальшим поширенням отриманих даних на території без ЛВЛ-вимірювань, але з наявним молочним моніторингом.

Для знаходження залежності молочного еквівалента від типу ґрунту в околиці населеного пункту, використовувалась множинна лінійна регресія із застосуванням методу найменших квадратів. Регресійний аналіз виконувався в програмному середовищі Matlab. Вхідними даними для регресійного аналізу були частки чотирьох груп ґрунтів у буферній зоні j -го НП [позначені як $p_{j,1}$, $p_{j,2}$, $p_{j,3}$, $p_{j,4}$ у рівнянні (16)] та величини індивідуальних молочних еквівалентів $IME_{j,i}^T$ [див. формулу (15)] жителів j -го НП, які в T -му році проходили ЛВЛ-вимірювання. Регресія будувалась для максимально можливого набору населених пунктів України, жителі яких проходили ЛВЛ-вимірювання в T -му році та для яких була інформація щодо питомої активності ^{137}Cs цезію в коров'ячому молоці з домашніх господарств у цей рік.

В ході проведення регресійного аналізу було ухвалено рішення виключити із загального масиву даних Північно-Західний регіон України з таких причин:

- 1) поєднання торфово-болотних і дерново-підзолистих ґрунтів з великою кількістю лісів та боліт;
- 2) практично повна відсутність чорноземів;
- 3) незначна присутність групи глинистих ґрунтів;
- 4) ґрунти, що потрапили в групу піщаних (група 1), з точки зору коефіцієнтів переходу цезію в продукти

where $D_{a,j}^{int,2011}$, $D_{a,j}^{int,2012}$ and $D_{a,j}^{int,2013}$ – annual internal doses from ^{137}Cs intake of a representative of age group a in the j -th settlement in 2011, 2012 and 2013, respectively, Sv;

λ_{Cs7} – radioactive decay rate of ^{137}Cs , d $^{-1}$;

ΔT – number of years between 2012 and year T , for example: $\Delta T=2$ at $T=2014$.

RESULTS AND DISCUSSION

Reconstruction of internal doses for residents of settlements without WBC monitoring and available cow's milk monitoring

For the settlements of Ukraine where WBC measurements were not done, but measurements of the ^{137}Cs activity concentration in cow's milk were available, the annual milk equivalent, ME_j^T , for the period 1987–2013 was reconstructed using Equation (14). We modeled the dependence of milk equivalent dynamics from soil type (such modeling is possible only for areas covered by both milk and WBC monitoring), followed by the extension of the data to areas without WBC measurements but with available milk monitoring.

To estimate the dependence of milk equivalent on soil type in the vicinity of the settlement, multiple linear regression using the least squares method was used. The regression analysis was performed in the Matlab software environment. The input data for the regression analysis were the fractions of the four soil types in the vicinity of the j -th settlement, denoted as $p_{j,1}$, $p_{j,2}$, $p_{j,3}$, $p_{j,4}$ in Equation (16), and the values of individual milk equivalents, $IME_{j,i}^T$ (see Equation (15)) of the residents of the j -th settlement who underwent WBC measurements in year T . The regression was obtained for the maximum possible number of settlements in Ukraine, whose residents underwent WBC measurements in year T and for which information on the ^{137}Cs activity concentration in milk from privately owned cows was available that year.

In the course of the regression analysis, it was decided to exclude the Northwestern region of Ukraine from the data set for the following reasons:

- 1) combination of clay and sod-podzolic soil with a large number of forests and swamps;
- 2) almost complete absence of black soil;
- 3) insignificant presence of clay soil;

харчування поводяться близько до торфово-болотних ґрунтів (група 3) [28];

5) ґрунти, які у Північно-Західному регіоні віднесені до групи 3 (торфово-болотні), можуть суттєво відрізнятися за фізико-хімічними властивостями від торфово-болотних ґрунтів Житомирської, Чернігівської, Київської та інших областей.

Загалом до Північно-Західного регіону були віднесені, виходячи з аналізу ґрунтів, північні райони Волинської та Рівненської областей та Олевський район Житомирської області. Для вказаного регіону щорічні молочні еквіваленти були отримані усередненням усіх відповідних значень індивідуальних молочних еквівалентів (ІМЕ) окремо для кожного адміністративного району, з ігноруванням типів ґрунтів [див. формули (14)–(15)].

Також з регресійного аналізу були виключені дані щодо колишніх Чорнобильського, Поліського та Іванківського районів Київської області, розташованих у ближній зоні ЧАЕС. З одного боку, кількість ЛВЛ-вимірювань у цих районах достатня для побудови щорічних дозових матриць, які базувались би виключно на даних ЛВЛ, а з іншого – у зв'язку з інтенсивними контрзаходами у ближній зоні ЧАЕС дані щодо забрудненості молока та ЛВЛ-вимірювань у цих районах не є типовими і не повинні поширюватися на решту території.

Значні невизначеності коефіцієнтів регресії для торфово-болотних ґрунтів (група 3) демонструють, що кількість ІМЕ для осіб, які проживали на таких ґрунтах, є недостатньою для якісного аналізу. Для вирішення проблеми було проаналізовано співвідношення величин ІМЕ в населених пунктах з домінуванням ґрунтів найбільш поширеної групи 1 до ІМЕ у населених пунктах з домінуванням ґрунтів групи 3 (рис. 9). Недостатня статистика вимірювань для групи 3 не дала можливості надійно оцінити часову динаміку цього співвідношення, але аналіз показав, що молочний еквівалент в НП з домінуванням ґрунтів групи 1 в середньому вчетверо перевищує молочний еквівалент в НП з домінуванням ґрунтів групи 3. Тому це співвідношення було використано для всього часового діапазону з 1987 по 2013 рік.

Аналогічний аналіз, виконаний для НП з домінуванням ґрунтів групи 2 або групи 4, розташованих в південній частині Київської області та в сусідній Черкаській області (рис. 9), показав відсутність значущої відмінності в середніх значеннях ІМЕ для цих груп ґрунтів. Для збільшення статистичної потужності вони були об'єднані в єдину групу перед проведенням фінального регресійного аналізу.

4) soils in the sandy group (group 1) behave similarly to peat-bog soils (group 3) in terms of cesium transfer coefficients to food [28];

5) soils that are classified as Group 3 (peat-bog) in this region may differ significantly in physical and chemical properties from peat-bog soils in Zhytomyrska, Chernihivska, Kyivska, and other Oblasts.

In general, the Northwestern region included, based on the soil analysis, the northern districts of Volynska and Rivneska oblasts and Olevskiy district of Zhytomyrska oblast. For these districts, annual milk equivalents were obtained by averaging all corresponding values of individual milk equivalents (IMEs) for each administrative district without taking into account soil types (see Equations (14)–(15)).

Also, data for the former Chornobylskiy, Poliskiy and Ivankivkyi districts of the Kyivska Oblast near Chornobyl Nuclear Power Plant (ChNPP) were excluded from the regression analysis. Although the number of WBC measurements in these districts was sufficient to obtain annual dose matrices based solely on WBC data, due to intensive countermeasures in the ChNPP vicinity, data on milk contamination and WBC measurements in these districts are atypical and should not be extrapolated to other areas.

Obtained significant uncertainties in the regression coefficients for peat-bog soils (group 3) demonstrated that the number of IMEs for people living on such soils was insufficient for a qualitative analysis. To solve this problem, we analyzed the ratio of IME values in settlements dominated by soils of the most common group 1 to IMEs in settlements dominated by soil types of group 3 (Fig. 9). Insufficient measurement statistics for settlements with soil types of group 3 did not allow to reliably assess the time-dependence of this ratio. However, the analysis showed that the milk equivalent in settlements with a predominance of soil types of group 1 was on average four times higher than that in the settlements with a predominance of soil types of group 3. Therefore, this ratio was used for the entire time period from 1987 to 2013.

A similar analysis carried out for the settlements with a predominance of soils of group 2 or group 4, located in the southern part of Kyivska Oblast and in the neighboring Cherkaska Oblast (Fig. 9), did not reveal a significant difference in the average values of IME for these soil groups. Therefore, to increase the statistical power, they were combined into a single group before the final regression analysis.

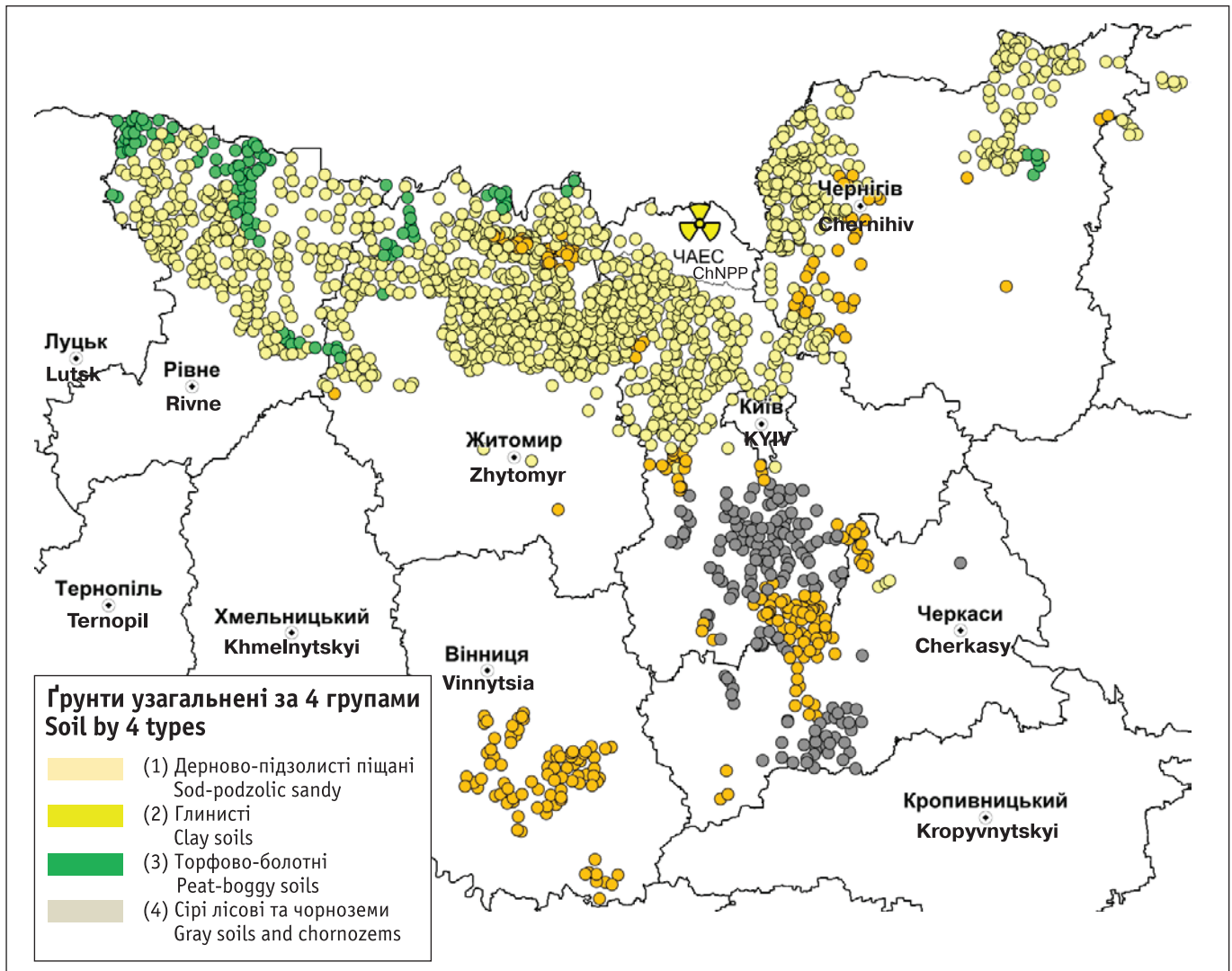


Рисунок 9. Розподіл населених пунктів, охопленим ЛВЛ-вимірюваннями за типами ґрунтів
Figure 9. Distribution of settlements covered by WBC measurements on soil types

На рис. 10 наведені щорічні значення молочного еквівалента залежно від характеристики ґрунту, які прийняті для подальшої реконструкції доз внутрішнього опромінення для жителів населених пунктів з відсутнім ЛВЛ-моніторингом і наявним молочним моніторингом. Рисунок демонструє, що молочний еквівалент суттєво відрізняється залежно від характеристик ґрунтів в околиці населеного пункту. Найнижчий молочний еквівалент спостерігається для торфово-болотних ґрунтів (група 3), характерних для північних районів Житомирської та Чернігівської областей (рис. 8), а найвищий молочний еквівалент визначено для глинистих та чорноземних ґрунтів (групи 2 та 4), характерних для центральної України (рис. 8). У роботі [28] показано, що цезієвий молочний еквівалент обернено пропорційний до коефіцієнта переходу «ґрунт-молоко» у відповідному НП. В населених пунктах з високим коефіцієнтом переходу радіонукліда ^{137}Cs з ґрунту в молоко, що характерно для торфово-болотних ґрунтів,

Fig. 10 shows the annual values of milk equivalent depending on soil types that were used for reconstruction of internal doses for residents of settlements with no WBC monitoring and available cow's milk monitoring. The figure shows that the milk equivalent differs significantly depending on the soil types in the vicinity of the settlement. The lowest milk equivalent was observed for peat-boggy soils (group 3) that are predominant in the northern districts in Zhytomyrska and Chernihivska Oblasts (Fig. 8), and the highest milk equivalent was found for clay and chernozem soils (groups 2 and 4), that are predominant in central Ukraine (Fig. 8). The milk equivalent is inversely proportional to the ^{137}Cs soil-to-milk transfer coefficient in the corresponding settlements [28]. In settlements with a high ^{137}Cs soil-to-milk transfer coefficient, which is typical for peat-bog soils, low milk

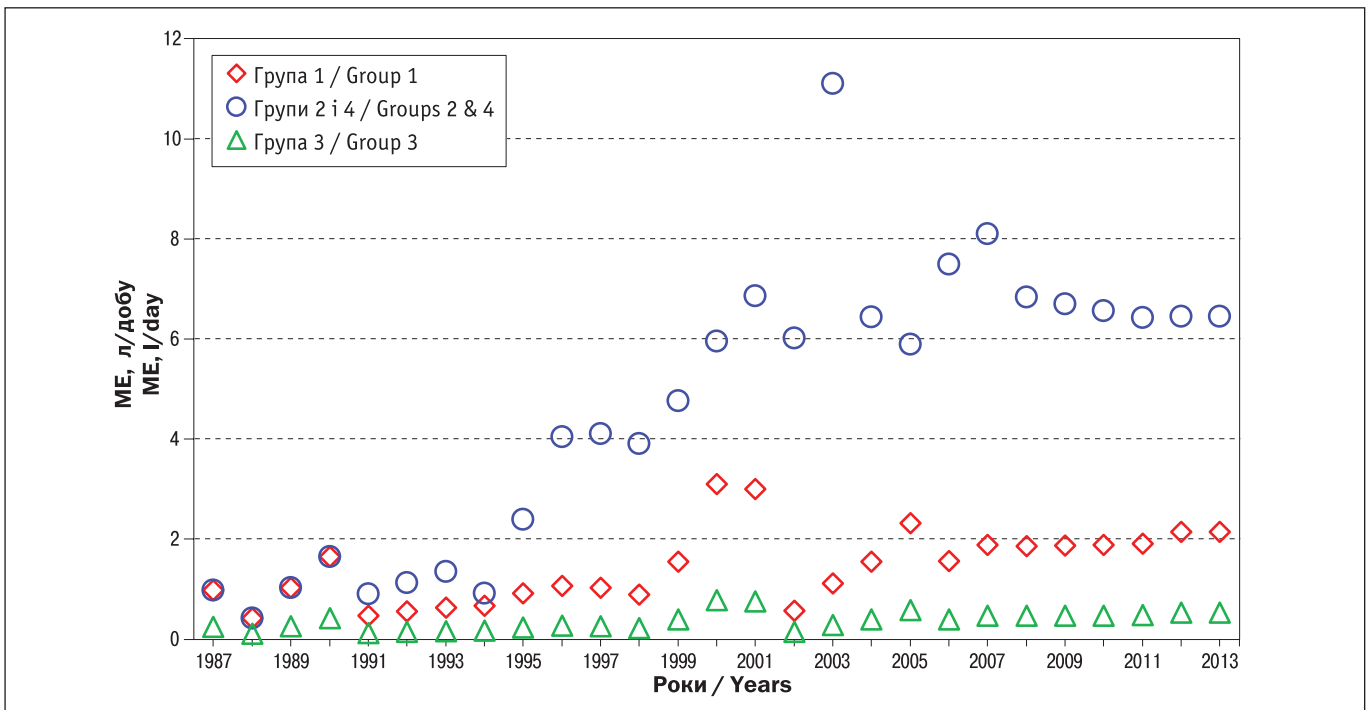


Рисунок 10. Динаміка молочного еквіваленту для ґрунтів з різних груп

Figure 10. Dynamics of milk equivalent for different soil types groups

спостерігається як правило низький молочний еквівалент і, навпаки, — високому молочному еквіваленту, що характерно для чорноземних та глинистих ґрунтів, відповідають НП з низьким коефіцієнтом переходу «ґрунт-молоко». Чим вищий молочний еквівалент, тим менше радіонуклідів ^{137}Cs потрапляє до організму людини власне з молоком і тим меншим є внесок молочного шляху у дозу внутрішнього опромінення. Оскільки за статистичними даними останніх років переважна більшість населення споживає в середньому не більше 1 літра молока та молочних продуктів на день [29], то для НП, у яких цезієвий молочний еквівалент перевищує 2 л на добу, молочний шлях опромінення не є основним. Тобто у НП з високим молочним еквівалентом більшість радіонуклідів ^{137}Cs надходить не з молоком (яке є відносно чистим), а з іншими продуктами харчування, наприклад, з лісовими грибами, ягодами або дичиною тощо.

Результати аналізу (рис. 10) дозволяють оцінити молочний еквівалент для довільного населеного пункту з відомим складом ґрунтів та довільного року. В той же час локальні особливості ґрунтів, навіть в рамках однієї групи, а також особливості локального харчування, контрзаходів і т. ін. можуть вносити певні корективи. Тому було висунуто гіпотезу, що локальні відхилення молочного еквівалента від теоретичного значення в рамках одного адміністративного району приблизно однакові і можуть бути скоректовані коригувальним фактором $k_R^{\Delta T}$ [див. формулу (17)].

equivalent is usually observed, and, conversely, high milk equivalent, which is typical for chernozem and clay soils, corresponds to the areas with a low ^{137}Cs soil-to-milk transfer coefficient. The higher the milk equivalent, the lower the ^{137}Cs intake with milk and the smaller the contribution of the milk pathway to the internal dose. Since, according to recent statistics, the vast majority of the population consumes on average no more than 1 L of milk and dairy products per day [29], the milk pathway is not the main one for settlements with a cesium milk equivalent exceeding 2 L·d⁻¹. In other words, in the case of a high milk equivalent, most ^{137}Cs was ingested not with milk (which is relatively low contaminated), but with other foodstuffs, e.g., wild mushrooms, berries or game.

The results of the analysis (Fig. 10) allowed to estimate the milk equivalent for an arbitrary settlement with a known soil composition and an arbitrary year. At the same time, local soil types, even within the same soil type group, as well as local nutrition, countermeasures, etc., could make certain adjustments. Therefore, it was assumed that local deviations of milk equivalent from the theoretical value within one administrative district are approximately the same and can be corrected by the correction factor $k_R^{\Delta T}$ (see Equation (17)).

Реконструкція доз внутрішнього опромінення для жителів населених пунктів з відсутніми молочним та ЛВЛ-моніторингом

Основна частина території України не була охоплена ні ЛВЛ-моніторингом (табл. 3, рис. 9), ні молочним моніторингом. В той же час відновлення доз внутрішнього опромінення для мешканців цієї частини території України є важливим з точки зору проведення радіоепідеміологічних досліджень, що проводяться в Україні [11–13]. Тому було прийнято рішення відновлювати щорічні дози внутрішнього опромінення для цієї частини території, виходячи з величин радіоактивних випадінь у 1986 році та типів ґрунтів, які визначають особливості переходу радіонуклідів цезію в продукти харчування. Для цього на основі індивідуальних ЛВЛ-вимірів були розраховані питомі індивідуальні дози внутрішнього опромінення (дози опромінення, нормовані на одиницю випадінь ^{137}Cs у 1986 році). Понад 800 тисяч таких доз, розрахованих для осіб віком старше 7 років, були використані для визначення річних питомих доз для кожної з 4 груп ґрунтів і поширення отриманих даних на території без вимірювань. Залежність питомої дози від типу ґрунту визначалась для кожного року окремо за допомогою множинної лінійної регресії із застосуванням методу найменших квадратів. Вхідними даними для регресійного аналізу були усереднені величини індивідуальних питомих доз жителів тих населених пунктів, для яких є не менше 10 вимірів ЛВЛ у певний рік, та частки чотирьох груп ґрунтів у буферних зонах (околицях) цих населених пунктів [див. формули (6) та (19)]. При цьому групи 2 і 4 об'єднувались в одну групу ґрунтів перед проведенням регресійного аналізу для досягнення достатньої статистичної потужності. Населені пункти Північно-Західного регіону України виключались з аналізу, для них щорічні середньорайонні дози були отримані усередненням [див. формули (6) та (18)] з ігноруванням типів ґрунтів. Населені пункти колишніх Чорнобильського, Поліського та Іванківського районів, у яких в різні роки проводились інтенсивні контрзаходи (ближня зона ЧАЕС), також виключались з аналізу.

На рис. 11 показано динаміку питомих річних доз внутрішнього опромінення від характеристик ґрунту та 95 % довірчі інтервали, отримані в ході регресійного аналізу. Порівняння відносних похибок питомих доз (рис. 11) з похибками ЛВЛ-вимірювань [30] демонструє, що внесок інструментальної похибки ЛВЛ-вимірювання в похибку дози опромінення не є суттєвим.

Reconstruction of internal radiation doses for residents of settlements without milk and WBC monitoring

The main part of the territory of Ukraine was not covered by either WBC monitoring (Table 3, Fig. 9) or milk monitoring. However, the assessment of internal doses for residents of these areas was important for radiation-epidemiological studies conducted in Ukraine [11–13]. Therefore, to reconstruct annual internal doses for these territories, the ^{137}Cs deposition density in 1986 and soil types that determine the peculiarities of the ^{137}Cs transfer into food were used. For this purpose, individual internal doses normalized to ^{137}Cs deposition density in 1986 were calculated on the basis of individual WBC measurements. More than 800 thousand doses calculated for persons over the age of 7 y were used to determine annual doses specific for each of the 4 soil groups and to extend the obtained data to the areas where WBC measurements were not carried out. The dependence of the specific dose on soil type was determined for each year separately using multiple linear regression with the least squares method. The input data for the regression analysis were the averaged values of individual specific doses of residents of settlements, where at least 10 WBC measurements were done in a given year, and the fractions of the four soil groups in the vicinities of these settlements (see Equations (6) and (19)). Settlements with a predominance of soil types of groups 2 and 4 were combined into one soil group before the regression analysis to achieve sufficient statistical power. As mentioned above, settlements in the Northwestern region of Ukraine were excluded from the analysis; for them, average annual district-specific doses were obtained by averaging (see Equations (6) and (18)), without taking into account soil types. Settlements of the former Chornobylskyi, Poliskyi and Ivankivkyi districts, where intensive countermeasures were taken in different years (near ChNPP zone), were also excluded from the analysis.

Fig. 11 shows the dynamics of annual internal doses normalized to ^{137}Cs deposition density in 1986 as a function of soil characteristics and 95% confidence intervals obtained in the regression analysis. Comparison of the relative errors of specific doses (Fig. 11) with the errors of WBC measurements [30] shows that the contribution of the instrumental error of WBC measurements to the error of the radiation dose is not significant.

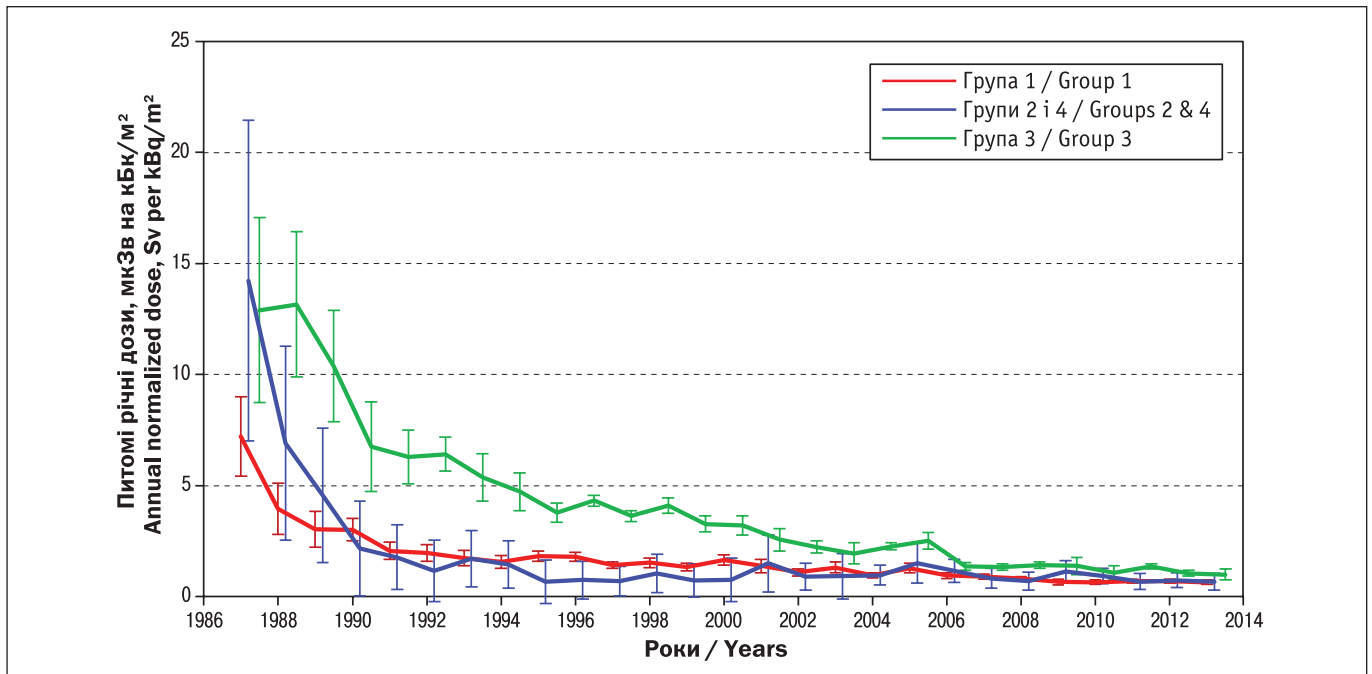


Рисунок 11. Динаміка питомих річних доз внутрішнього опромінення з 95 % довірчим інтервалом для ґрунтів, що належать до різних груп

Figure 11. Dynamics of annual internal normalized doses with 95% confidence interval for residents of settlements with a predominance of different soil type groups

Графіки на рис. 11 демонструють, що питоми дози внутрішнього опромінення, які отримують мешканці населених пунктів, розташованих на торфво-болотних ґрунтах (група 3), загалом є вищими за дози в інших НП України. Це пов'язано в першу чергу з високим коефіцієнтом переходу ^{137}Cs з торфво-болотних ґрунтів у лугові трави і далі в молоко домашніх тварин. Крім того, населені пункти з торфво-болотними ґрунтами розташовані переважно в зоні українського Полісся. Тому, нарівні з молоком, для цих НП лісові ягоди та гриби також роблять суттєвий внесок у дозу опромінення [31].

На рис. 12 представлені усереднені річні питоми дози внутрішнього опромінення, розраховані для мешканців Овруцького району різними методами:

- ◆ – при розрахунку доз опромінення використовувались результати ЛВЛ-моніторингу і формули (8)–(10);
- – при розрахунку доз опромінення результати ЛВЛ-моніторингу не використовувались, але використовувались дані молочного моніторингу і формули (11)–(17);
- ▲ – при розрахунку доз опромінення не використовувались ні результати ЛВЛ-моніторингу, ні дані молочного моніторингу; дози розраховувались з застосуванням формули (6) та регресійної моделі (19).

Середньорайонні річні питоми дози внутрішнього опромінення, розраховані для мешканців Овруцького району, розраховані різними методами, демон-

Fig. 11 demonstrates that internal doses received by residents of settlements located on peat-bog soils (group 3) were generally higher than those in other Ukrainian settlements. This is primarily due to the high ^{137}Cs soil-to-milk transfer coefficient from peat-bog soils to meadow grasses and then to cow's milk. In addition, settlements with peat-bog soils are located mainly in the Ukrainian Polissya region. Therefore, along with milk, forest berries and mushrooms also make a significant contribution to the radiation dose for these settlements [31].

Fig. 12 shows the average district-specific annual internal doses normalized to ^{137}Cs deposition density in 1986 calculated for residents of the Ovrutskyi district using different methodologies:

- ◆ – use the results of WBC monitoring and Equations (8)–(10);
- – the results of WBC monitoring were not used, but milk monitoring data and Equations (11)–(17) were used;
- ▲ – neither the results of WBC monitoring nor milk monitoring data were used; doses were calculated using the Equation (6) and the regression model (19).

The average district-specific annual internal normalized doses calculated for residents of the Ovrutskyi district, calculated by different meth-

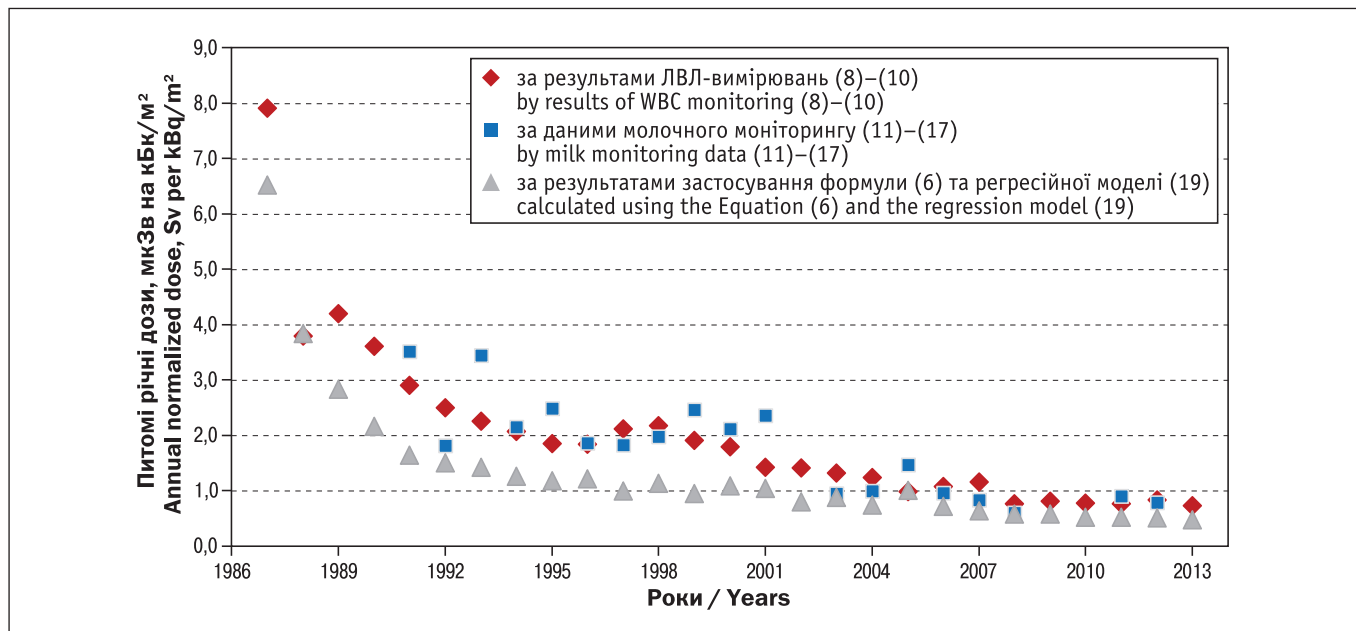


Рисунок 12. Динаміка усереднених питомих річних доз внутрішнього опромінення, розрахованих різними методами для мешканців Овруцького району

Figure 12. Average district-specific annual internal doses calculated for residents of the Ovrutskyi district using different methodologies

струють схожу часову динаміку (рис. 12). Дози опромінення, розраховані за результатами ЛВЛ-моніторингу, близькі до доз, розрахованих за даними молочного моніторингу. Узгодження доз, розрахованих різними методами, означає, що молочний еквівалент був розрахований для Овруцького району за формулами (14)–(17) досить точно. Дози опромінення, розраховані без урахування результатів молочного та ЛВЛ-моніторингу за формулами (6) та (19), загалом нижчі від доз, розрахованих безпосередньо за результатами ЛВЛ-вимірювань. Це може вказувати на відмінність характеристик ґрунтів в Овруцькому районі від характеристик «усереднених» ґрунтів відповідних груп. Інша можлива причина відмінності доз може бути пов'язана з особливостями протирадіаційних контрзаходів в Овруцькому районі.

ВИСНОВКИ

У роботі обґрунтовано нову методологію розрахунку річних доз внутрішнього опромінення мешканців населених пунктів України, що зазнали радіоактивного забруднення в результаті аварії на ЧАЕС та не були охоплені ЛВЛ-моніторингом. Методологія базується на даних вимірювань питомої активності ^{137}Cs у молоці приватних господарств, що проводились в Україні з 1987 по 2013 рік, а у разі відсутності таких вимірювань у населеному пункті, розроблена у роботі методологія передбачає використання

ods, show similar temporal dynamics (Fig. 12). The doses calculated based on the results of WBC monitoring are close to the doses calculated based on milk monitoring data. The agreement between the doses calculated using different methodologies means that the milk equivalent was calculated for the Ovrutskyi district using Equations (14)–(17) quite accurately. The doses calculated without taking into account the results of milk and WBC monitoring using Equations (6) and (19) are generally lower than the doses calculated directly from the results of WBC measurements. This may indicate a difference in soil characteristics in the Ovrutskyi district from the characteristics of the «average» soils of the respective groups of soil types. Another possible reason for the difference in doses may be related to the peculiarities of radiation countermeasures in the Ovrutskyi district.

CONCLUSIONS

The paper justified a new methodology for calculation of doses to residents of Ukrainian settlements that were contaminated as a result of the Chernobyl accident and were not covered by WBC monitoring. The methodology is based on the results of measurements of ^{137}Cs activity concentration in cow's milk from privately own farms conducted in Ukraine from 1987 to 2013. In the absence of milk monitoring in a settlement, the methodology developed in this paper involves the use of a linear regression

лінійної регресійної моделі, що пов'язує величину інкорпорованого ^{137}Cs (отриманого за результатами ЛВЛ-вимірювань у інших населених пунктах України) з чотирма групами ґрунтів у буферній зоні НП. Дози внутрішнього опромінення, розраховані за новою методологією для мешканців Овруцького району, узгоджуються з дозами, розрахованими безпосередньо за результатами ЛВЛ-вимірювань.

Фінансування

Робота виконувалась за фінансової підтримки Національної академії медичних наук України (шифр НДР 625, № держреєстрації 0122U001204; шифр НДР 626, № держреєстрації 0122U001208). Проведення екологічного та дозиметричного моніторингу на радіоактивно забруднених територіях України було профінансовано Урядом України в рамках загальнодозиметричної паспортизації населених пунктів України, які зазнали радіоактивного забруднення після Чорнобильської катастрофи. Валідація модельних розрахунків фінансувалася дослідницькою програмою Відділення епідеміології раку та генетики Національного інституту раку США (НИН, DHHS) через партнерську угоду № P004 між Українським науково-технологічним центром та Національним інститутом раку США.

Дотримання етичних стандартів

Автори заявляють, що ця робота була виконана за відсутності будь-яких особистих, професійних або фінансових відносин, які потенційно можуть розглядатися як конфлікт інтересів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про правовий режим території, що зазнала радіоактивного забруднення внаслідок Чорнобильської катастрофи : Закон України від 27 лютого 1991 р. N 791a-XII. *Відомості Верховної Ради УРСР*. 1991, № 16, С. 198: веб-сайт. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/791a-12> (дата звернення 30.10.2024).
2. Про статус і соціальний захист громадян, які постраждали внаслідок Чорнобильської катастрофи : Закон України від 28 лютого 1991 р. N 796-XII. *Відомості Верховної Ради УРСР*. 1991, № 16, С. 200: веб-сайт. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/796-12#Text> (дата звернення 30.10.2024).
3. Про затвердження Положення про організацію і функціонування Державного реєстру України осіб, які постраждали внаслідок Чорнобильської катастрофи : Постанова Кабінету Міністрів України від 09.06.1997 № 571. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/%20571-97-%D0%BF.%202018#Text> (дата звернення 30.10.2024).
4. Про захист людини від впливу іонізуючого випромінювання : Закон України N 15/98-ВР. *Відомості Верховної Ради України*. 1998,

model that relates the value of incorporated ^{137}Cs obtained from WBC measurements in other settlements of Ukraine to four soil groups in the buffer zone of the settlement. Internal doses calculated using the new methodology for residents of the Ovrutskyi district showed agreement with the doses calculated using the results of WBC measurements.

Funding

The work was carried out with the financial support of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine (code 625, state registration number 0122U001204; code 626, state registration number 0122U001208). The environmental and dosimetric monitoring in the radioactively contaminated areas of Ukraine was funded by the Government of Ukraine as part of the general dose certification of Ukrainian settlements that were contaminated after the Chernobyl accident. The validation of model calculations was funded by the Intramural Research Program, Division of Cancer Epidemiology and Genetics, National Cancer Institute, National Institutes of Health (NCI, NIH, USA) through the partnership agreement No. P004 between the Science and Technology Center of Ukraine and the National Cancer Institute.

Compliance with ethical standards

The authors declare that this work was performed in the absence of any personal, professional, or financial relationships that could potentially be considered a conflict of interest.

REFERENCES

1. [On legal status of the areas radioactively contaminated by the Chernobyl disaster]. The Law of Ukraine No. 791a-XII (February 27, 1991). *Bulletin of the Verhovna Rada of the USSR*. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/791a-12> (access date: 08.11.24). Ukrainian.
2. [About the status and social protection of citizens affected due to the Chernobyl disaster]. The Law of Ukraine No. 796-XII (February 28, 1991). *Bulletin of the Verhovna Rada of the USSR*. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/796-12#Text> (access date: 30.10.2024). Ukrainian.
3. [On the approval of the Regulation on the organization and activity of the Ukrainian State Register of persons affected due to the Chernobyl disaster]. Decree of the Cabinet of Ministries of Ukraine from 09.06.1997 No. 571. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/%20571-97-%D0%BF.%202018#Text> (access date: 30.10.2024). Ukrainian
4. [On the protection of humans from the effects of ionizing radiation]. The Law of Ukraine No. 15/98-VR (edition of 17.09.23). URL:

- № 22, С. 115. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/15/98-%D0%B2%D1%80#Text> (дата звернення 30.10.2024).
5. Про додаткові заходи з відродження територій, що зазнали радіоактивного забруднення внаслідок Чорнобильської катастрофи, із соціального захисту постраждалих осіб, безпечного поводження з радіоактивними відходами : Указ Президента України № 196/2018 від 05.07.2018. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/196/2018#Text> (дата звернення 30.10.2024).
 6. Узагальнені результати реконструкції індивідуалізованих доз суб'єктів Державного Реєстру України осіб, які постраждали внаслідок Чорнобильської катастрофи / І. А. Ліхтарьов та ін. *Проблеми радіаційної медицини та радіобіології*. 2015. Вип. 20. С. 104-126. URL: https://radiationproblems.org.ua/20_2015_ru_s104.html (дата звернення 30.10.2024).
 7. Реконструкція індивідуалізованих доз суб'єктів Державного реєстру України осіб, які постраждали внаслідок Чорнобильської катастрофи, що проживають в Коростенському районі Житомирської області / О. М. Іванова та ін. *Проблеми радіаційної медицини та радіобіології*. 2017. Вип. 22. С. 126-146. URL: https://radiationproblems.org.ua/22_2017_ua_s126.html (дата звернення 30.10.2024).
 8. Результати ЛВЛ-вимірювань, проведених на радіоактивно забруднених територіях України у 1986-2014 рр. (Ревізія та аналіз)/ В. В. Василенко та ін. *Проблеми радіаційної медицини та радіобіології*. 2018. Вип. 23. С. 120-138. doi: 10.33145/2304-8336-2018-23-120-138.
 9. Відновлення, верифікація та аналіз результатів ЛВЛ-вимірювань 1986 р., що внесені до електронної бази у 2019-2021 рр. / М. С. Курята та ін. *Проблеми радіаційної медицини та радіобіології*. 2021. Вип. 26. С. 199-218. doi: 10.33145/2304-8336-2021-26-199-218.
 10. Breast cancer risk in Ukrainian women exposed to Chernobyl fallout while pregnant or lactating: standardized incidence ratio analysis, 1998 to 2016 / V. Vij et al. *Eur. J. Epidemiol.* 2022. Vol. 37, no. 11. P. 1195-1200. doi: 10.1007/s10654-022-00913-1.
 11. Genomic characterization of cervical lymph node metastases in papillary thyroid carcinoma following the Chernobyl accident / L. M. Morton et al. *Nat. Commun.* 2024. Vol.15, no. 5053. doi: 10.1038/s41467-024-49292-z.
 12. Breast cancer incidence in the regions of Belarus and Ukraine most contaminated by the Chernobyl accident: 1978 to 2016 / L. Zupunski et al. *Int. J. Cancer.* 2021. Vol. 148, no. 8, P. 1839-1849. doi: 10.1002/ijc.33346.
 13. Radiation risk analysis of neuropsychiatric disorders in Ukrainian Chernobyl catastrophe liquidators / K. N. Loganovsky et al. *Front. Psychiatry.* 2020. Vol. 11, no. 553420. doi: 10.3389/fpsy.2020.553420.
 14. Prevalence of thyroid nodules in residents of Ukraine exposed as children or adolescents to Iodine-131 from the Chernobyl accident / E. K. Cahoon et al. *Thyroid.* 2024. Vol. 34, no. 7. P. 890-898. doi: 10.1089/thy.2023.0654.
 - <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/15/98-%D0%B2%D1%80> (access date: 08.11.24). Ukrainian.
 5. [About additional measures for recovery of the territories which were radioactively contaminated due to Chernobyl catastrophe, for social protection of affected persons, safe management with radioactive waste]. Decree of the President of Ukraine No. 196/2018 (2018 July 5). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/196/2018> (access date: 13.11.24). Ukrainian.
 6. Likhhtarov IA, Kovgan LM, Masiuk SV, Ivanova OM, Chepurny MI, Boyko ZN, et al. Generalized results of individualized exposure doses reconstruction for the subjects of Ukrainian State Register of persons affected due to Chernobyl accident. *Probl Radiac Med Radiobiol.* 2015;20:104-126. URL: https://radiationproblems.org.ua/20_2015_ru_s104.html. (access date: 03.11.24).
 7. Ivanova OM, Masiuk SV, Boiko ZN, Chepurny MI, Gerasymenko VB, Fedosenko GV, et al. 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. *Probl Radiac Med Radiobiol.* 2017;22:126-146. URL: https://radiationproblems.org.ua/22_2017_ua_s126.html. (access date: 03.11.24).
 8. Vasylenko W, Masiuk SV, Ivanova OM, Pikta VO, Boiko ZN, Chepurny MI, et al. Results of WBC measurements were made at radioactively contaminated territories of Ukraine in 1986-2014 (revision and analysis). *Probl Radiac Med Radiobiol.* 2018;23: 120-138. doi: 10.33145/2304-8336-2018-23-120-138.
 9. Kuriata MS, Vasylenko W, Ivanova OM, Kramarenko MS, Lytvynets LO, Morozov W, et al. Reconstruction, verification and analysis of results of WBC measurements dated 1986 that were inputted to electronic database in 2019-2021. *Probl Radiac Med Radiobiol.* 2021;26:199-218. doi: 10.33145/2304-8336-2021-26-199-218.
 10. Vij V, Shpak V, Zamotayeva G, Lapikura O, Ryzhov A, Gorokh E, et al. Breast cancer risk in Ukrainian women exposed to Chernobyl fallout while pregnant or lactating: standardized incidence ratio analysis, 1998 to 2016. *Eur J Epidemiol.* 2022;37(11):1195-1200. doi: 10.1007/s10654-022-00913-1.
 11. Morton LM, Lee OW, Karyadi DM, Bogdanova TI, Stewart C, Hartley SW, et al. Genomic characterization of cervical lymph node metastases in papillary thyroid carcinoma following the Chernobyl accident. *Nat Commun.* 2024;15(1):5053. doi: 10.1038/s41467-024-49292-z.
 12. Zupunski L, Yaumenenka A, Ryzhov A, Veyalkin I, Drozdovitch V, Masiuk S, et al. Breast cancer incidence in the regions of Belarus and Ukraine most contaminated by the Chernobyl accident: 1978 to 2016. *Int J Cancer.* 2021;148(8):1839-1849. doi: 10.1002/ijc.33346.
 13. Loganovsky KN, Masiuk SV, Buzunov VA, Marazziti D, Voychulene YS. Radiation Risk Analysis of Neuropsychiatric Disorders in Ukrainian Chernobyl Catastrophe Liquidators. *Front Psychiatry.* 2020;11: 553420. doi: 10.3389/fpsy.2020.553420.
 14. Cahoon EK, Grimm E, Mabuchi K, Mai JZ, Zhang R, Drozdovitch V, et al. Prevalence of thyroid nodules in residents of Ukraine exposed

15. Основні принципи та досвід проведення комплексної дозиметричної паспортизації населених пунктів України / І. А. Ліхтарьов та ін. *Проблеми радіаційної медицини та радіобіології*. 2015. Вип. 20. С. 75-103. URL: https://radiationproblems.org.ua/20_2015_ru_s75.html (дата звернення 30.10.2024).
16. Проблемы безопасности атомной энергетики. Уроки Чернобыля: монография / под ред. Б. С. Пристера. Чернобыль: Институт проблем безопасности АЭС, 2016. 356 с.
17. Ковган Л. М. Еколого-дозиметричні моделі опромінювання населення у разі глобальної радіаційної аварії (за досвідом Чорнобильської катастрофи): дис. ... д-ра техн. наук: Київ, 2005. 271 с.
18. Likhtarev I. A., Kovgan L. N., Vavilov S. E. 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 Phys.* 1996. Vol. 70, no. 3. P. 297-317. doi: 10.1097/00004032-199603000-00001.
19. Likhtarev I. A., Kovgan L. N., Vavilov S. E. Internal exposure from the ingestion of foods contaminated by ¹³⁷Cs after the Chernobyl accident. Report 2. Ingestion doses of the rural population of Ukraine up to 12 y after the accident (1986-1997). *Health Phys.* 2000. Vol. 79, no. 4. P. 341-357. doi: 10.1097/00004032-199603000-00001.
20. ICRP Publication 119. Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60. *Ann. ICRP.* 2012. Vol. 41. 212 p. doi: 10.1016/j.icrp.2012.06.038.
21. A consistent radionuclide vector after the Chernobyl accident / K. Muck et al. *Health Phys.* 2002. Vol. 82, no. 2. P. 141-156. doi: 10.1097/00004032-200202000-00002.
22. Іванова О. М., Масюк С. В., Ковган Л. М. Методика реконструкції індивідуалізованих доз опромінення осіб, що мешкають на радіоактивно забруднених територіях України. *Проблеми радіаційної медицини та радіобіології*. 2018. Вип. 23. С. 167-187. doi: 10.33145/2304-8336-2018-23-164-187.
23. Іванова О. М. Розробка системи реконструкції доз опромінення суб'єктів з Державного реєстру України осіб, які постраждали внаслідок Чорнобильської катастрофи: дис. ... канд. біол. наук: Київ, 2019. 184 с. URL: <https://uacademic.info.ua/document/0419U005314>.
24. ICRP Publication 67. Age-Dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 2. Ingestion Dose Coefficients. *Ann. ICRP.* 1993. Vol. 23, no. 3/4. 166 p.
25. Kovgan L., Likhtarev I. General external and internal exposure of the population of Ukraine during 15 years after Chernobyl accident and the prognosis of the risks. *Int. J. Radiat. Med.* 2002. Vol. 4, no. 1-4. P. 79-98.
26. Ґрунти України. URL: <https://geomap.land.kiev.ua/soil.html> (дата звернення 03.11.24).
27. Історія розвитку науки про ґрунти та картографування ґрунтів України за матеріалами фонду Сектору картографічних видань as children or adolescents to Iodine-131 from the Chernobyl accident. *Thyroid.* 2024;34(7):890-898. doi: 10.1089/thy.2023.0654. Epub 2024.
15. Likhtarov IA, Kovgan LM, Masiuk SV, Ivanova OM, Chepurny MI, Boyko ZN, et al. Basic principles and practices of integrated dosimetric passportization of the settlements in Ukraine. *Probl Radiac Med Radiobiol.* 2015;20:75-103. URL: https://radiationproblems.org.ua/20_2015_ru_s75.html (access date: 03.11.24).
16. Pryster BS, editor. [Nuclear power safety problems. Lessons from Chernobyl]. Kyiv: National Academy of Sciences of Ukraine. Chernobyl: Institute of NPP Safety Problems; 2016. 356 p. Ukrainian.
17. Kovgan LM. [Ecological and dosimetric models of population exposure in case of a global radiation accident (based on the experience of the Chernobyl accident)] [dissertation]. Kyiv; 2005. 271 p. Ukrainian.
18. Likhtarev IA, Kovgan LN, Vavilov SE. 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 Phys.* 1996;70(3):297-317. doi: 10.1097/00004032-199603000-00001.
19. Likhtarev IA, Kovgan LN, Vavilov SE. Internal exposure from the ingestion of foods contaminated by ¹³⁷Cs after the Chernobyl accident. Report 2. Ingestion doses of the rural population of Ukraine up to 12 y after the accident (1986-1997). *Health Phys.* 2000;79(4):341-357. doi: 10.1097/00004032-199603000-00001.
20. ICRP Publication 119. Compendium of dose coefficients based on ICRP Publication 60. *Ann ICRP.* 2012;41:1-212.
21. Muck K, Prohl G, Likhtarev I, Kovgan L, Meckbach R, Golikov V. A consistent radionuclide vector after the Chernobyl accident. *Health Phys.* 2002;82(2):141-56. doi: 10.1097/00004032-200202000-00002
22. Ivanova OM, Kovgan LM, Masiuk SV. Methodology of reconstruction of individualized exposure doses for persons residing at radioactively contaminated territories of Ukraine. *Probl Radiac Med Radiobiol.* 2018;23:167-187. doi: 10.33145/23048336201823164187.
23. Ivanova OM. [Development of an exposure doses reconstruction system for subjects from the State Register of Ukraine of persons, affected due to Chernobyl accident] [abstract of a Ph.D. thesis]. Kyiv: State institution «National Research Center for Radiation Medicine of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine»; 2016. 25 p. Ukrainian. URL: <https://uacademic.info.ua/document/0419U005314> (access date: 03.11.24).
24. ICRP Publication 67. Age Dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 2. Ingestion Dose Coefficients. *Ann ICRP.* 1993;23(3/4):1-166.
25. Kovgan LN, Lykhtarev IA. General external and internal exposure of the population of Ukraine 15 years after the Chernobyl accident and risk forecast. *Int J Rad Med.* 2002;4(1-4):79-98.
26. [Soils of Ukraine]. URL: <https://geomap.land.kiev.ua/soil.html> (access date: 03.11.24). Ukrainian.
27. Melnychuk W, Sagetdinova NV, Rubleva VA [History of the development of soil science and soil mapping of Ukraine based on the mate-

- НБУВ. / В. В. Мельничук, Н. В. Сагетдінова, В. А. Рубльова. Національна бібліотека України ім. В. І. Вернадського. URL: <http://nbuv.gov.ua/node/5792> (дата звернення 03.11.24).
28. Щодо методики оцінки паспортних доз населених пунктів України, які зазнали радіоактивного забруднення в результаті аварії на ЧАЕС / Д. А. Базика та ін. *Проблеми радіаційної медицини та радіобіології*. 2023. Вип. 28. С. 110-142. doi: 10.33145/2304-8336-2023-28-110-142.
29. Баланси та споживання основних продуктів харчування населенням України, 2020. Державна служба статистики України / за ред. О. Прокопенко. Київ, 2021. 59 с.
30. Radiation risk estimation: Based on measurement errors models / S. Masiuk et al. Berlin : De Gruyter, 2017. ISBN 978-3-11-044180-2.
31. Основні чинники формування внутрішнього опромінення населення радіоактивно забруднених територій на поточному етапі аварії на ЧАЕС (на прикладі Київської області) / В. В. Василенко та ін. *Проблеми радіаційної медицини та радіобіології*. 2015. Вип. 20. С. 147-156. URL: https://www.radiationproblems.org.ua/20_2015_ua_s75.html (дата звернення 30.10.2024).
28. Bazyka DA, Sushko VO, Ivanova OM, Vasylenko W, Bilonyk AB, Fedosenko GV, et al. On the methodology of passport doses calculation for Ukrainian settlements radioactively contaminated due to the Chernobyl NPP accident. *Probl Radiac Med Radiobiol*. 2023;28:110-142. doi: 10.33145/2304-8336-2023-28-110-142.
29. Prokopenko O, editor. [Balances and consumption of basic food products by the population of Ukraine, 2020. State Statistics Service of Ukraine]. Kyiv; 2021. 59 p. Ukrainian.
30. Masiuk S., Kukush A., Shklyar S., Chepurny M., Likhtarov I. Radiation risk estimation: Based on measurement errors models. Berlin: De Gruyter; 2017. 238 p. ISBN 978-3-11-044180-2.
31. Vasylenko W, Nechaev SY, Tsigankov MY, Ratia GG, Berkovskyy VB, Pikta VO, et al. Main internal dose forming factors for inhabitants of contaminated regions at current phase of the Chernobyl nuclear power plant accident (Kyiv region as an example). *Probl Radiac Med Radiobiol*. 2015;20:147-156. URL: https://www.radiationproblems.org.ua/20_2015_ua_s75.html (access date: 03.11.24).

ІНФОРМАЦІЯ ПРО АВТОРІВ

Іванова Ольга Миколаївна, кандидат біологічних наук, старший науковий співробітник лабораторії радіологічного захисту, Інститут радіаційної гігієни та епідеміології ННЦРМГО, м. Київ, Україна

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3652-0836>

Чепурний Микола Іванович, науковий співробітник лабораторії радіологічного захисту, Інститут радіаційної гігієни та епідеміології ННЦРМГО, м. Київ, Україна

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9852-0669>

Масюк Сергій Володимирович, кандидат фізико-математичних наук, завідувач лабораторії радіологічного захисту відділу дозиметрії та радіаційної гігієни, Інститут радіаційної гігієни та епідеміології ННЦРМГО, м. Київ, Україна

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5123-9674>

Василенко Валентина Володимирівна, кандидат технічних наук, завідувач лабораторії лічильників випромінювання людини відділу дозиметрії і радіаційної гігієни, Інститут радіаційної гігієни та епідеміології ННЦРМГО, м. Київ, Україна

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0270-2738>

Курятя Микола Сергійович, науковий співробітник лабораторії лічильників випромінювання людини відділу дозиметрії і радіаційної гігієни, Інститут радіаційної гігієни та епідеміології ННЦРМГО, м. Київ, Україна

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5435-4291>

Будерацька Валентина Борисівна, науковий співробітник лабораторії радіологічного захисту, Інститут радіаційної гігієни та епідеміології ННЦРМГО, м. Київ, Україна

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2120-4275>

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Olha M. Ivanova, Candidate of Biological Sciences, Senior Research of the Radiological Protection Laboratory, Institute of Radiation Hygiene and Epidemiology, NRCRMHO, Kyiv, Ukraine

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3652-0836>

Mykola I. Chepurny, Researcher of the Radiological Protection Laboratory, Institute of Radiation Hygiene and Epidemiology of the National Center for Medical Research, Kyiv, NRCRMHO, Ukraine

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9852-0669>

Sergii V. Masiuk, Candidate of Science (Physics and Mathematics), Head of the Radiological Protection Laboratory, Dosimetry and Radiation Hygiene Department, Institute of Radiation Hygiene and Epidemiology, NRCRMHO, Kyiv, Ukraine

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5123-9674>

Valentyna V. Vasylenko, Candidate of Science (Engineering), Head of the Whole Body Counter Laboratory, Institute of Radiation Hygiene and Epidemiology, NRCRMHO, Kyiv, Ukraine

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0270-2738>

Mykola S. Kuriata, Research Fellow of the Whole Body Counter Laboratory, Institute of Radiation Hygiene and Epidemiology, NRCRMHO, Kyiv, Ukraine

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5435-4291>

Valentyna B. Buderatska, Researcher of the Radiological Protection Laboratory, Institute of Radiation Hygiene and Epidemiology, NRCRMHO, Kyiv, Ukraine

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2120-4275>

Бойко Зульфiра Набуллівна, старший науковий співробітник лабораторії радіологічного захисту, Інститут радіаційної гігієни та епідеміології ННЦРМГО, м. Київ, Україна
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7144-5574>

Білоник Андрій Богданович, завідувач лабораторії радіаційної гігієни та моніторингу відділу дозиметрії і радіаційної гігієни, Інститут радіаційної гігієни та епідеміології ННЦРМГО, м. Київ, Україна

Федосенко Галина Василівна, кандидат біологічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник лабораторії радіологічного захисту, Інститут радіаційної гігієни та епідеміології ННЦРМГО, м. Київ, Україна

Морозов Віктор Віталійович, молодший науковий співробітник лабораторії лічильників випромінювання людини відділу дозиметрії і радіаційної гігієни, Інститут радіаційної гігієни та епідеміології ННЦРМГО, м. Київ, Україна
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0006-3665-0947>

Горбачов Сергій Григорович, молодший науковий співробітник лабораторії радіаційної гігієни та моніторингу, Інститут радіаційної гігієни та епідеміології ННЦРМГО, м. Київ, Україна

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8561-2804>
Жадан Наталія Станіславівна, молодший науковий співробітник лабораторії радіологічного захисту, Інститут радіаційної гігієни та епідеміології ННЦРМГО, м. Київ, Україна

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-6776-9482>
Терещенко Сергій Олексійович, в. о. директора ДУ «Український центр інформаційних технологій та Національного реєстру» Міністерства охорони здоров'я України, м. Київ, Україна

Губіна Ірина Георгіївна, аналітик операційного та прикладного програмного забезпечення ДУ «Український центр інформаційних технологій та Національного реєстру» Міністерства охорони здоров'я України, м. Київ, Україна

Дроздович Володимир В'ячеславович, кандидат технічних наук, наук. співр. відділу епідеміології раку та генетики, Національний інститут раку, НІЗ, Бетезда, Меріленд, США
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7952-379X>

Zulfira N. Boiko, Senior Researcher of the Radiological Protection Laboratory, Institute of Radiation Hygiene and Epidemiology, NRCRMHO, Kyiv, Ukraine
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7144-5574>

Andrii B. Bilonyk, Head of the Laboratory of Radiation Hygiene and Monitoring, Institute of Radiation Hygiene and Epidemiology, NRCRMHO, Kyiv, Ukraine

Halyna V. Fedosenko, Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Leading Researcher of the Radiological Protection Laboratory, Institute of Radiation Hygiene and Epidemiology, NRCRMHO, Kyiv, Ukraine

Viktor V. Morozov, Junior Researcher of the Whole Body Counter Laboratory, Institute of Radiation Hygiene and Epidemiology, NRCRMHO, Kyiv, Ukraine
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0006-3665-0947>

Serhii H. Horbachov, Junior Researcher of the Laboratory of Radiation Hygiene and Monitoring, Institute of Radiation Hygiene and Epidemiology, NRCRMHO, Kyiv, Ukraine

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8561-2804>
Natalia S. Zhadan, Junior Researcher of the Radiological Protection Laboratory, Institute of Radiation Hygiene and Epidemiology, NRCRMHO, Kyiv, Ukraine

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-6776-9482>
Serhii O. Tereshchenko, Acting Director, Ukrainian Centre of Information Technologies and National Registry of the Ministry of Health of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Iryna G. Hubina, Operational and Application Software Analyst, Ukrainian Centre of Information Technologies and National Registry of the Ministry of Health of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Vladimir V. Drozdovitch, Ph.D., Staff Scientist, Division of Cancer Epidemiology and Genetics, National Cancer Institute, NIH, Bethesda, MD, USA

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7952-379X>

Стаття надійшла до редакції 12.11.2024

Received: 12.11.2024