

УДК 614.876:613.648

С. В. Масюк¹✉, М. І. Чепурний¹, В. Б. Будерацька¹, О. М. Іванова¹, З. Н. Бойко¹,
Н. С. Жадан¹, Г. В. Чорновол¹, М. Ю. Болгов², В. М. Шпак², М. Д. Тронько², Т. І. Богданова²,
Д. Кар'яді³, В. Відж³, Е. К. Кахун³, С. Дж. Чанок³, Л. М. Мортон³, В. Дроздович³

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

²Інститут ендокринології та обміну речовин ім. В.П. Комісаренка Національної академії медичних наук України, м. Київ, вул. Вишгородська, 69, 04114

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

ІНДИВІДУАЛЬНІ ОЦІНКИ ДОЗ ОПРОМІНЕННЯ ЩИТОПОДІБНОЇ ЗАЛОЗИ УЧАСНИКІВ ГЕНОМНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ФОЛІКУЛЯРНИХ КАРЦИНОМ ТА АДЕНОМ, ЗАРЕЄСТРОВАНИХ У ЧОРНОБИЛЬСЬКОМУ БАНКУ ТКАНИН

Мета: оцінка доз опромінення щитоподібної залози (ЩЗ) для осіб з Чорнобильського банку тканин (СТВ), які є учасниками дослідження геномного ландшафту фолікулярних карцином та фолікулярних аденом ЩЗ, з використанням оновленої методології розрахунку дози, що враховує індивідуальні дані щодо проживання та харчування опроміненої особи, зібрані шляхом дозиметричного інтерв'ю.

Матеріали та методи. У статті представлені оцінки доз опромінення ЩЗ для 140 осіб, зареєстрованих у СТВ, з морфологічно верифікованим діагнозом «фолікулярна аденома» або «фолікулярна карцинома щитоподібної залози». Дози опромінення ЩЗ від надходження ¹³¹I були розраховані для цих осіб з використанням суттєво оновленої системи реконструкції доз опромінення щитоподібної залози жителів України 2020 року (TDU20), а також інформації щодо проживання та особливостей харчування після Чорнобильської аварії, зібраної шляхом персональних інтерв'ю з тими особами, щодо яких раніше така інформація не збиралася. Крім того, дози опромінення ЩЗ були оцінені для таких додаткових (мінорних) шляхів опромінення: (а) внутрішнє опромінення від надходження короткоіснуючих радіонуклідів ¹³²Te+¹³²I та ¹³³I інгаляційно та перорально; (б) зовнішнє опромінення від радіонуклідів, що осіли на ґрунті; та (в) внутрішнє опромінення від радіоізотопів цезію (¹³⁴Cs та ¹³⁷Cs).

Результати. Середня доза опромінення ЩЗ від усіх шляхів опромінення становить 445 мГр, тоді як медіанна доза складає 71 мГр. Діапазон доз опромінення ЩЗ є досить широким серед учасників дослідження: від 0,23 мГр до 14 Гр. Надходження ¹³¹I до організму людини було основним шляхом опромінення ЩЗ; його медіанний внесок у дозу опромінення ЩЗ становить 92 %. Серед опитаних у дослідженні осіб дози опромінення ЩЗ від надходження ¹³¹I, розраховані за допомогою TDU20 з урахуванням результатів персонального дозиметричного інтерв'ю, були нижчими, ніж дози, при розрахунку яких результати інтерв'ю не враховувались: 105 мГр проти 150 мГр для середньої дози та 46 мГр проти 98 мГр для медіанної дози відповідно. Невизначеності доз від надходження ¹³¹I оцінювалися геометричним стандартним відхиленням, розрахованим для розподілу 1000 стохастичних індивідуальних доз. В результаті геометричне стандартне відхилення варіювало від 1,3 до 6,1 із загальним середнім арифметичним 3,1 та медіаною 3,3 для всіх учасників дослідження.

Висновки. Це дослідження чітко показало, що використання індивідуальної інформації щодо проживання та харчування у післяаварійний період для оцінки доз опромінення ЩЗ осіб, які пройшли персональні дозиметричні інтерв'ю, мало помітний вплив на величину дози опромінення ЩЗ. Під час проведення наукових досліджень, спрямованих на вивчення впливу дози опромінення ЩЗ на ключові демографічні, клінічні, патологічні та молекулярно-генетичні показники, важливо проводити персональні дозиметричні інтерв'ю для збору даних про історію проживання та харчування учасників дослідження для отримання набагато точніших оцінок індивідуальних доз опромінення ЩЗ.

Ключові слова: Чорнобильський банк тканин; Чорнобиль; доза опромінення; щитоподібна залоза; дозиметрична анкета.

Проблеми радіаційної медицини та радіобіології. 2025. Вип. 30. С. 186–217. doi: 10.33145/2304-8336-2025-30-186-217

S. V. Masiuk¹✉, M. I. Chepurny¹, V. B. Buderatska¹, O. M. Ivanova¹, Z. N. Boiko¹, N. S. Zhadan¹, H. V. Chornovol¹, M. Yu. Bolgov², V. M. Shpak², M. D. Tronko², T. I. Bogdanova², D. Karyadi³, V. Vij³, E. K. Cahoon³, S. J. Chanock³, L. M. Morton³, V. Drozdovitch³

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

²State Institution «V.P. Komisarenko Institute of Endocrinology and Metabolism of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine», 69 Vyshhorodska St., Kyiv 04114, Ukraine

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

INDIVIDUAL THYROID DOSE ESTIMATES FOR THE GENOMIC STUDY OF FOLLICULAR CARCINOMAS AND ADENOMAS IN PARTICIPANTS OF THE CHORNOBYL TISSUE BANK

Objective. Assessment of thyroid doses among participants of the Chornobyl Tissue Bank (CTB) enrolled in the study of the genomic landscape of thyroid follicular carcinomas and follicular adenomas, using updated methodologies and data on residential history and dietary patterns collected during the study through personal dosimetry interviews.

Materials and methods. This study presents an assessment of thyroid doses in 140 participants of the Chornobyl Tissue Bank (CTB) with pathologically confirmed diagnoses of follicular adenoma and follicular thyroid carcinoma. Thyroid doses from ¹³¹I intake were estimated using the substantially revised 'Thyroid Dosimetry System 2020 for Ukraine' (TDU20). In addition, the data on residential and dietary history have been obtained through personal interviews with 85 individuals for whom dosimetry-related data were limited. Radiation doses to the thyroid were also estimated for the following minor exposure pathways: (a) intake of short-lived radionuclides (¹³²Te+¹³²I and ¹³³I) via inhalation and ingestion; (b) external irradiation from radionuclides deposited on the ground; and (c) ingestion of ¹³⁴Cs and ¹³⁷Cs with contaminated foodstuffs.

Results. The arithmetic mean of thyroid doses estimated in this study from all exposure pathways combined was 445 mGy, while the median dose was 71 mGy. Among study participants, a broad range of thyroid doses was observed, from 0.23 mGy to 14 Gy. The major exposure pathway was ¹³¹I intake, which accounted for a median contribution of 92 % to the thyroid dose. Among individuals who were interviewed in the study, thyroid doses from ¹³¹I intake that were calculated using TDU20 and individual questionnaire data were lower than doses that did not include the interview data: 105 mGy vs. 150 mGy for the arithmetic mean and 46 mGy vs. 98 mGy for the median, respectively. Uncertainties in dose estimates from ¹³¹I intake were characterized using the geometric standard deviation of 1,000 individual stochastic dose realizations. As a result, the geometric standard deviation ranged from 1.3 to 6.1, with an overall arithmetic mean of 3.1 and a median of 3.3 across all study participants.

Conclusions. This study demonstrated that the use of individual questionnaire data in dose assessment for participants who completed personal dosimetric interviews had an impact on the estimated thyroid doses. In conducting specialized studies aimed at identifying potential associations between thyroid dose and key demographic, clinical, pathological, and molecular-genetic indicators, it is valuable to carry out personal dosimetric interviews to obtain detailed residential and dietary histories of study participants. Incorporating such information allows for more realistic individual dose estimates.

Key words: Chornobyl Tissue Bank, Chernobyl, radiation dose, thyroid, dosimetry interview.

Problems of Radiation Medicine and Radiobiology. 2025;30:186-217. doi: 10.33145/2304-8336-2025-30-186-217

ВСТУП

Аварія, що сталася 26 квітня 1986 року на Чорнобильській атомній електростанції, спричинила викид в атмосферу близько $1,8 \times 10^{18}$ Бк одного з найбільш радіологічно значущих радіоізотопів йоду — ¹³¹I. Наслідком аварії на Чорнобильській АЕС для насе-

INTRODUCTION

The accident at the Chornobyl (Chernobyl) nuclear power plant in Ukraine on 26 April 1986 resulted in the release of approximately 1.8×10^{18} Bq of iodine-131 (¹³¹I), one of the most radiologically significant radioiodine isotopes. Among the

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

лення, пов'язаним з впливом ^{131}I на щитоподібну залозу (ЩЗ) в дитячому та підлітковому віці, стало збільшення ризику раку ЩЗ та інших захворювань ЩЗ [1]. Науковий інтерес до вивчення молекулярної структури та геномного профілю радіаційно-асоційованого раку ЩЗ зумовив створення Чорнобильського банку тканин (СТВ), що містить біологічні зразки ЩЗ пацієнтів, у яких було виявлено рак ЩЗ [2]. На даний час у СТВ зберігаються біологічні зразки ЩЗ понад 3500 осіб, які зазнали впливу ^{131}I внаслідок Чорнобильських випадіннь, і понад 800 зразків ЩЗ осіб, які народилися після 31 березня 1987 року та не зазнали впливу радіоактивного йоду.

На перших порах дози опромінення ЩЗ зареєстрованих у СТВ осіб (тобто осіб, біологічні зразки ЩЗ яких зберігаються у СТВ) від надходження ^{131}I розраховувалися за допомогою методології реконструкції доз ЩЗ від 2010 року (TD10) [3]. Ця методологія була суттєво змінена у 2020 році (TDU20). Зміни стосувалися реконструкції вимірювань радіоактивності ^{131}I у ЩЗ [4, 5], визначення маси ЩЗ залежно від віку та статі мешканців радіоактивно забруднених територій [6] та переоцінки щільності випадіннь ^{131}I на ґрунт за допомогою метеорологічної моделі високої роздільної здатності [7]. Крім того, у новій методиці TDU20 було враховано внесок від короткоіснуючих радіонуклідів $^{132}\text{Te} + ^{132}\text{I}$ та ^{133}I , що надходили до організму людини інгаляційним і пероральним шляхами, в дозу опромінення ЩЗ. Хоча особи, народжені після 31 березня 1987 року, не зазнали впливу ^{131}I , вони зазнали впливу довгоіснуючих джерел іонізуючого опромінення під час проживання на радіоактивно забруднених територіях: зовнішнього опромінення від радіонуклідів, що осіли на ґрунті, та внутрішнього опромінення від надходження радіонуклідів ^{134}Cs та ^{137}Cs з продуктами харчування місцевого виробництва.

Національний інститут раку (США) у співпраці з Інститутом ендокринології та метаболізму імені В. П. Комісаренка (Київ, Україна) проводить серію досліджень з молекулярної та геномної характеристики раку ЩЗ [8–10]. Попереднє дослідження 197 опромінених осіб, зареєстрованих у СТВ з патологічно підтвердженим папілярним раком ЩЗ, показало, що при оцінці дози важливо врахувати індивідуальні дані про історію проживання та харчування, а також прийому препаратів стабільного йоду, які були зібрані за допомогою особистих інтерв'ю з учасниками дослідження [11]. Використання інформації з індивідуальних анкет зумовило більш реалістичні оцінки індивідуальних доз, ніж без урахування ре-

general population, the primary health consequence of the Chernobyl accident was an increased risk of thyroid cancer and other thyroid diseases associated with childhood and adolescent exposure of the thyroid gland to ^{131}I [1]. To address the scientific interest in elucidating the molecular biology and genomic characteristics of radiation-related thyroid cancer, the Chernobyl Tissue Bank (CTB) was established, comprising a wide range of biological samples from patients with thyroid malignancies [2]. To date, the CTB has collected biospecimens from more than 3,500 individuals exposed to ^{131}I from Chernobyl fallout. It also includes samples from over 800 thyroid cancer cases diagnosed in individuals born after 31 March 1987, who were unexposed to ^{131}I but affected by long-lived radionuclides of Chernobyl origin.

Thyroid doses from ^{131}I intake among CTB participants were first estimated using the Thyroid Dosimetry 2010 system (TD10) [3]. This approach was later revised into the Thyroid Dosimetry 2020 system for Ukraine (TDU20), which incorporated revised measurements of ^{131}I thyroid activity [4, 5], updated age- and sex-specific thyroid mass values [6], and improved estimates of ^{131}I ground deposition in Ukraine based on a high-resolution meteorological model [7]. The revised methodology also accounted for exposure from short-lived radionuclides ($^{132}\text{Te} + ^{132}\text{I}$ and ^{133}I) through inhalation and ingestion. Although individuals born after 31 March 1987 were not exposed to ^{131}I , they were still affected by long-lived sources of radiation in contaminated settlements, including external irradiation from ground-deposited radionuclides and ingestion of ^{134}Cs and ^{137}Cs with locally produced food.

The National Cancer Institute (USA), in collaboration with the State Institution «V.P. Komisarenko Institute of Endocrinology and Metabolism of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine» (IEM, Kyiv, Ukraine), has been conducting a series of studies on the molecular and genomic characterization of thyroid cancer [8–10]. A previous study of 197 exposed individuals from the CTB with pathologically confirmed papillary thyroid cancer showed the benefits of incorporating individual data on residence and diet history and stable iodine administration, which were collected using personal interviews with the study participants, into dose assessment [11]. The use of individual questionnaire data resulted in more realistic individual dose estimates than without including those interviews. The

зультатів цих інтерв'ю. У цій статті описується дозиметрична частина нещодавно розпочатого дослідження з аналізу геномного ландшафту фолікулярних карцином та аденом ЩЗ серед 140 осіб з СТБ.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Оцінка доз опромінення щитоподібної залози зареєстрованих у СТБ осіб та включених до дослідження геномного ландшафту фолікулярних карцином та фолікулярних аденом ЩЗ з використанням оновленої методології реконструкції доз та зібраної за допомогою особистих дозиметричних інтерв'ю інформації щодо проживання та харчування після Чорнобильської аварії.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

Досліджувана популяція

Особи з СТБ з опроміненою внаслідок Чорнобильської аварії ЩЗ, були розподілені на 5 дозиметричних груп за критерієм наявності вимірювань радіоактивності у ЩЗ та іншої інформації, необхідної для розрахунку доз опромінення ЩЗ [3]:

- До групи 1 входять члени українсько-американського когортного дослідження, опромінені у дитинстві або у підлітковому віці, в яких було виміряно активність ^{131}I у ЩЗ у травні–червні 1986 року, та з якими було проведено персональне дозиметричне інтерв'ю для збору даних щодо проживання та харчування.
- Група 2 складається з осіб, у яких було виміряно активність ^{131}I у травні–червні 1986 року, але з якими не було проведено персональне дозиметричне інтерв'ю.
- Група 3 містить осіб, які не мали вимірів активності ^{131}I у ЩЗ, та серед яких не проводились персональні дозиметричні опитування. Ця група поділена на три підгрупи, про що детально описано нижче у підрозділі «Дозиметрична група 3».
- Група 4 складається з осіб, які народилися між 26 квітня 1986 року та 31 березня 1987 року і, отже, зазнали впливу ^{131}I внутрішньоутробно. Деякі з них є членами української когорти осіб, які зазнали впливу ^{131}I внутрішньоутробно.
- До групи 5 входять особи, які народилися після 31 березня 1987 року і, отже, їхня ЩЗ не була опромінена ^{131}I , проте вони зазнали впливу від довгоіснуючих джерел опромінення.

У таблиці 1 наведено розподіл 140 учасників дослідження за вищенаведеними групами, включно з 113 особами, що належать до 2, 3, 4 та 5-ї груп та з якими персональні дозиметричні інтерв'ю вперше проводились у ході даного дослідження.

present paper describes dosimetric support for a recently initiated project analyzing the genomic landscape of thyroid follicular carcinomas and adenomas among 140 individuals from the CTB.

STUDY OBJECTIVE

Assessment of thyroid doses among participants of the CTB enrolled in the study of the genomic landscape of thyroid follicular carcinomas and follicular adenomas, using updated methodologies and data on residential history and dietary patterns collected during the study through personal dosimetry interviews.

MATERIAL AND METHODS

Study population

With respect to ^{131}I exposure from Chornobyl fallout, CTB participants were classified into the following groups according to the type of dosimetry information available [3]:

- Group 1 includes members of the Ukrainian–American cohort who were exposed during childhood or adolescence, had their ^{131}I thyroid activity measured in May–June 1986, and completed a personal dosimetry interview providing detailed residential and dietary history.
- Group 2 consists of individuals with measured ^{131}I thyroid activity in May–June 1986, but without a personal dosimetry interview.
- Group 3 includes individuals lacking both measured ^{131}I thyroid activity and personal dosimetry interview data. This group is further divided into three subgroups (see subsection «CTB dosimetry group 3» for details).
- Group 4 includes individuals born between 26 April 1986 and 31 March 1987, who were exposed to ^{131}I in utero. Some of these participants are members of the Ukrainian cohort of persons exposed in utero.
- Group 5 consists of individuals born after 31 March 1987, who were not exposed to ^{131}I but were subject to long-lived sources of radiation exposure.

Table 1 presents the distribution of the 140 study participants across the CTB dosimetry groups, including a subset of 113 individuals from groups 2, 3, 4, and 5 for whom personal dosimetry interview data were not available before present study.

Таблиця 1
Розподіл 140 учасників дослідження за дозиметричними групами

Table 1
Distribution of 140 study participants by Chernobyl Tissue Bank (CTB) dosimetry group

Дозиметрична група	Опис	Кількість учасників дослідження	
		Загальна	Без дозиметричного інтерв'ю
CTB dosimetry group	Description	Total	Without dosimetry interview data before present study
1	Учасники українсько-американського когортного дослідження осіб, які зазнали опромінення у віці 0–18 років; у всіх членів когорти було виміряно активність ¹³¹ I у щитоподібній залозі та взято дозиметричне інтерв'ю Ukrainian–American cohort of individuals exposed at age 0–18 y with measured ¹³¹ I thyroid activity and personal dosimetry interview data	25	0
2	Особи з виміряною активністю ¹³¹ I у щитоподібній залозі, але без дозиметричного інтерв'ю Individuals with measured ¹³¹ I thyroid activity but no personal dosimetry interview data	1	1
3	Особи без виміряної активності ¹³¹ I у щитоподібній залозі та без дозиметричного інтерв'ю Individuals without measured ¹³¹ I thyroid activity and no personal dosimetry interview data	89	89
4	Особи, опромінені радіонуклідом ¹³¹ I внутрішньоутробно Individuals who were exposed to ¹³¹ I <i>in utero</i>	6*	4
5	Особи, які народилися після 31 березня 1987 року і, отже, не зазнали впливу ¹³¹ I Individuals who were born after 31 March 1987 and, therefore, were not exposed to ¹³¹ I	19	19
Всього		140	113

Примітка. *Включно з двома особами з українсько-американського когортного дослідження осіб, які зазнали опромінення радіонуклідом ¹³¹I внутрішньоутробно та які пройшли дозиметричне інтерв'ювання
Note. *Including two individuals from the Ukrainian cohort of individuals exposed *in utero* for whom personal dosimetry interview data were available

Шляхи опромінення

Дози на ЩЗ учасників дослідження були розраховані для таких шляхів опромінення:

- Надходження ¹³¹I через вдихання радіоактивно забрудненого повітря та/або споживання харчових продуктів, таких як молоко (коров'яче та/або козине), молочні продукти та листові овочі в період з 26 квітня по 14 липня 1986 року, коли ¹³¹I за рахунок радіоактивного розпаду знизився до рівня 0,1 % від початкової кількості, осадженої на підстильну поверхню;
- Надходження ¹³²Te+¹³²I та ¹³³I шляхом вдихання забрудненого повітря та/або вживання молока, молочних продуктів і листових овочів протягом періоду часу від моменту аварії до повного розпаду короткоіснуючих радіоізотопів йоду та телуру;
- Зовнішнє опромінення з моменту аварії до моменту встановлення діагнозу від усіх радіонуклідів, що осіли на ґрунт внаслідок Чорнобильської аварії;
- Надходження ¹³⁴Cs та ¹³⁷Cs з моменту аварії до моменту встановлення діагнозу з місцевими продуктами харчування (молоко, молочні продукти, коренеплоди, м'ясо), а також з грибами, лісовими ягодами та дичиною.

Exposure pathways

Thyroid doses for the study participants were calculated for the following exposure pathways:

- Intake of ¹³¹I via inhalation of contaminated air and/or consumption of foodstuffs such as cow's and/or goat milk, milk products and leafy vegetables during the time period from the time of the accident (26 April 1986) until 14 July 1986 when ¹³¹I decayed to a negligible level of 0.1 % of the initial deposition.
- Intake of ¹³²Te+¹³²I and ¹³³I via inhalation of contaminated air and/or consumption of foodstuffs such as cow's and/or goat milk, milk products and leafy vegetables during the time period from the time of the accident until complete decay of short-lived radioiodine and radiotellurium isotopes.
- External irradiation from radionuclides deposited on the ground from the time of the accident until the time of the diagnosis.
- Ingestion intake of ¹⁴Cs and ¹³⁷Cs with locally produced food (milk, dairy products, root vegetables, meat) as well as mushrooms, wild berries and forest game from the time of the accident until the time of the diagnosis.

Індивідуальний анамнез проживання та харчування

У дослідженні розглядається 113 осіб зі 140 (80,7 % від загальної кількості), які належать до дозиметричних груп 2 ($n=1$), 3 ($n=89$), 4 ($n=4$) і 5 ($n=19$) та щодо яких раніше не збиралася інформація про проживання та харчування (табл. 1). Оскільки в СТБ міститься лише обмежена персональна інформація щодо проживання особи, тобто лише місце її проживання на момент аварії та/або на момент операції на ЩЗ, існувало занепокоєння, що простий перерахунок доз опромінення ЩЗ з використанням оновленої методології, але без результатів персонального дозиметричного інтерв'ю, не спричинить покращення оцінок доз опромінення ЩЗ цих осіб. Тому було розроблено спеціальну дозиметричну анкету і проведено збір даних про індивідуальний анамнез проживання та харчування цих 113 осіб шляхом персонального опитування.

На рис. 1 показано блок-схему відбору учасників дослідження. Адресу та іншу контактну інформацію цих осіб було отримано з різних джерел, в тому числі з клінічної бази даних ІЕМ, де міститься інформація про адресу на момент аварії на Чорнобильській АЕС, від голів територіальних громад та з соціальних мереж. В результаті вдалося зв'язатися зі 102 (90,3 %) особами для проведення особистого дозиметричного інтерв'ю. Усім учасникам було надіслано лист-запрошення з поясненням мети особистого дозиметричного інтерв'ю, очікуваним обсягом витраченого часу у разі їхньої згоди на участь у дослідженні, а також запевненнями щодо конфіденційності опитування та гарантією оплати за витрачений ними час. Потенційного учасника дослідження попросили зателефонувати, щоб домовитися про інтерв'ю. Тим, хто не відгукнувся на лист, було зателефоновано для підтвердження участі в дослідженні або

Individual residence and diet history

This study includes a subset of 113 of 140 CTB participants (80.7 %) from dosimetry groups 2 ($n=1$), 3 ($n=89$), 4 ($n=4$), and 5 ($n=19$), for whom only limited information was available in the CTB, e.g., place of residence at the time of the accident (ATA) or at thyroid surgery (Table 1). Since the CTB contains only limited personal information about the person's residence, i.e. only the place of residence at the time of the accident and/or at the time of thyroid surgery, there was a concern that simply recalculating thyroid radiation doses using the updated methodology, but without the results of a personal dosimetric interview, would not improve the estimates of thyroid radiation doses for these individuals. Therefore, a special dosimetric questionnaire was developed and data on the individual residential and dietary history of these 113 individuals were collected through personal interviews.

Figure 1 presents the flow chart of study participant enrollment. The last known address and contact information were traced using multiple sources, including the Laboratory of Morphology of the Endocrine System at IEM, the IEM clinical database, blood forms containing addresses at the time of the Chornobyl accident and a possible change of surname of the CTB participant, medical facilities, and social networks. As a result, 102 individuals (90.3 %) were successfully located and contacted. Invitation letters described the purpose of the dosimetry interview, expected time commitment, confi-

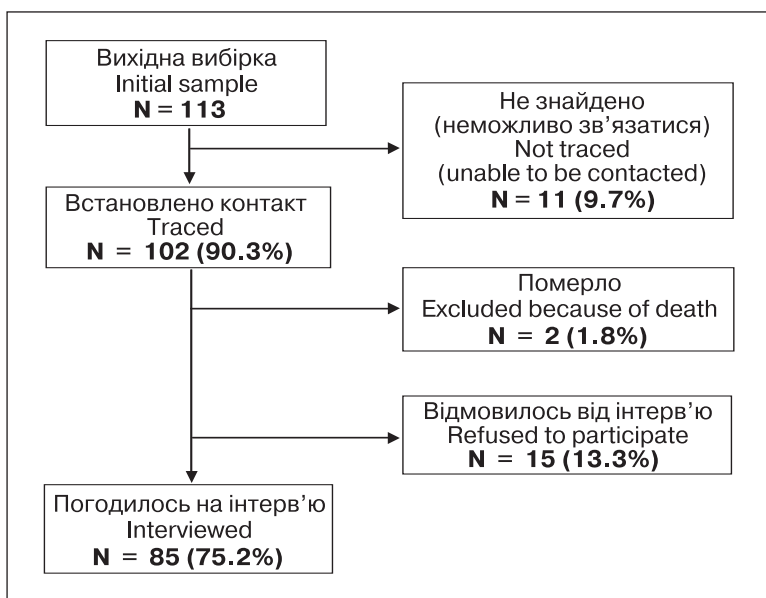


Рисунок 1. Блок-схема набору учасників дослідження

Figure 1. Flow chart of the study participants' enrollment

з'ясування причини відмови. Загалом 85 (75,2 %) осіб погодились на інтерв'ю (рис. 1). Сімнадцять осіб не було опитано: дві особи померли (1,8 %), а ще 15 (13,3 %) відмовились від участі в дослідженні.

Персональні дозиметричні інтерв'ю проводилися з 28 березня 2024 року по 7 лютого 2025 року. Інтерв'юєрами були дозиметристи, які пройшли спеціальну підготовку та мають досвід проведення інтерв'ю у членів українсько-американського когортного дослідження — опромінених у 1986 році дітей та підлітків, а також осіб, які зазнали опромінення внутрішньоутробно. В основі анкети, що використовувалась у даному дослідженні, лежала дозиметрична анкета, яка раніше використовувалась в українсько-американському когортному дослідженні дітей та підлітків, опромінених у 1986 році [12], або осіб, які зазнали опромінення внутрішньоутробно [13].

Анкети містили питання про прізвище, ім'я, по батькові та дату народження особи, місце проживання на момент інтерв'ю, а також питання щодо: (а) детальної історії проживання особи або її матері (для тих, хто був опромінений внутрішньоутробно та/або перебував на грудному вигодовуванні); (б) походження молока, молочних продуктів і листових овочів та рівня їхнього споживання особою (або її матір'ю) у кожному зареєстрованому місці проживання; та (в) вживання йодиду калію (стабільного йоду) особою (або її матір'ю) для блокування поглинання радіоактивного ^{131}I щитоподібною залозою в період з 26 квітня по 14 липня 1986 року. Анкета також містила питання про історію змін місця проживання у період між 15 липня 1986 року та датою встановлення діагнозу раку ЩЗ, і споживання місцевих продуктів харчування (молоко, молочні продукти, коренеплоди, м'ясо), а також грибів, лісових ягід та дичини.

Реконструкція доз опромінення щитоподібної залози від надходження ^{131}I

Індивідуальні дози опромінення ЩЗ від надходження ^{131}I до зареєстрованих у СТБ осіб були вперше розраховані за допомогою методології реконструкції доз ЩЗ від 2010 року (TD10) [3], ці дози в подальшому називатимуться дозами СТБД10. Дози опромінення ЩЗ осіб з СТБ, перераховані з використанням оновленої методології реконструкції доз TDU20, будуть позначатися СТБД25. Методологія розрахунку доз опромінення ЩЗ зареєстрованих у СТБ осіб відрізняється для кожної дозиметричної групи і описана нижче.

Дозиметрична група 1

Як зазначалося вище, дозиметрична група 1 складається із членів українсько-американського когорт-

дентальності assurance as well as a modest payment to compensate their time. Non-respondents were followed by telephone. In total, 85 individuals (75.2 %) completed the interview (Fig. 1), while 17 could not be interviewed due to death ($n = 2$, 1.8 %) or refusal ($n = 15$, 13.3 %).

Personal dosimetry interviews were conducted between 28 March 2024 and 7 February 2025. The interviews were conducted by trained dosimetrists who had received special training and experience in interviewing subjects of the Ukrainian-American cohort study of children and adolescents irradiated in 1986, as well as individuals exposed *in utero*. The questionnaire used in this study was based on a dosimetric questionnaire previously used in the Ukrainian-American cohort study of children and adolescents irradiated in 1986 [12] or individuals exposed *in utero* [13].

The questionnaire collected information on name, date of birth, and current address, as well as detailed data related to the period between 26 April and 14 July 1986, including: (i) residential history of the participant and, for those exposed *in utero* or during breastfeeding, of the mother; (ii) origin and consumption rates of milk, dairy products, and leafy vegetables at each reported residence; and (iii) intake of stable iodine to block thyroidal uptake of ^{131}I . Additional questions covered residential history from 15 July 1986 until thyroid cancer diagnosis, along with consumption of locally produced foodstuffs (milk, dairy products, root vegetables, meat), mushrooms, wild berries, and forest game.

Reconstruction of thyroid radiation doses from ^{131}I intake

Individual thyroid doses from ^{131}I intake for Ukrainian CTB subjects were previously estimated using the thyroid dose reconstruction methodology of 2010 (Thyroid Dosimetry 2010 system — TD10) [3], hereafter CTBD10. Recalculation with the revised Thyroid Dosimetry 2020 system for Ukraine (TDU20) yielded the CTBD25 dose set. Approaches to calculate CTBD25 doses for each CTB dosimetry group are described in the sections below.

CTB dosimetry group 1

As previously noted, the CTB dosimetry group 1 comprises participants of the Ukrainian—Ame-

ного дослідження осіб, які зазнали опромінення в дитинстві або підлітковому віці та в яких розвинувся рак ЩЗ. У всіх цих осіб було виміряно активність ^{131}I у ЩЗ у травні—червні 1986 року. Індивідуальні дані про історію проживання, споживання молока, молочних продуктів та листових овочів, а також про прийом стабільного йоду були зібрані у всіх членів когорти шляхом особистого дозиметричного інтерв'ювання, проведеного у 2001—2006 роках. Індивідуальні дози опромінення ЩЗ для представників цієї групи були оцінені на основі результатів вимірювання активності ^{131}I у ЩЗ та анамнезу проживання і харчування після Чорнобильської аварії.

Для кожного суб'єкта дослідження k розраховувалось дві дози: (а) *модельна* доза опромінення ЩЗ, D_k^{model} , що базується на активності ^{131}I у ЩЗ, $Q_k^{model}(t)$, розрахованій для будь-якого часу t після аварії з використанням екологічних та біокінетичних моделей; та (б) *виміряна* доза опромінення ЩЗ, D_k^{meas} , що базується на активності ^{131}I щитоподібної залози, виміряній у момент часу t_m після аварії, Q_k^{meas,t_m} . *Виміряна* доза опромінення ЩЗ, яка використовувалася в епідеміологічному аналізі, є надійнішою, ніж *модельна*, оскільки вона базується на індивідуальному вимірюванні активності ^{131}I щитоподібної залози. *Модельна* доза опромінення ЩЗ (мГр) для особи k розраховувалась за формулою:

$$D_k^{model} = \frac{k_u \cdot e_{th,k}^{I-131}}{M_k} \cdot \int_0^T Q_k^{model}(t) dt \quad (1)$$

де $k_u = 13,84$ коефіцієнт, що утворюється внаслідок приведення одиниць вимірювання до системи СІ (Бк кБк $^{-1}$ г кг $^{-1}$ Дж МеВ $^{-1}$ с д $^{-1}$ мГр Гр $^{-1}$); M_k — маса ЩЗ, що відповідає статі та віку особи k (г) [6]; $e_{th,k}^{I-131}$ — середня енергія, яка поглинається ЩЗ на один розпад ^{131}I у ЩЗ, що відповідає віку особи k [14] (МеВ); $Q_k^{model}(t)$ — це динаміка модельної активності ^{131}I у ЩЗ особи k в момент часу t (кБк); $T = 80$ діб верхня межа інтегрування (від 26 квітня 1986 року ($t = 0$) до 14 липня 1986 року).

Для розрахунку дози на основі вимірювань *модельну* активність ^{131}I у ЩЗ у момент вимірювання t_m , $Q_k^{model}(t_m)$, було замінено у рівнянні (1) на виміряну активність, Q_k^{meas,t_m} , з використанням так званого коефіцієнта калібрування $SF_k = Q_k^{meas,t_m} / Q_k^{model}(t_m)$. Якщо коефіцієнт калібрування дорівнює одиниці, то це означає, що теоретичне значення активності ^{131}I у ЩЗ в момент часу t_m збігається з результатом вимірювання.

ican cohort who were exposed to radiation during childhood or adolescence and subsequently developed thyroid cancer. Thyroid ^{131}I activity was measured in all of these individuals in May—June 1986. Detailed information on residential history, consumption of milk, dairy products, and leafy vegetables, as well as on the administration of stable iodine, was obtained for all cohort members through personal interviews conducted between 2001 and 2006. Their individual thyroid doses were then estimated on the basis of thyroid ^{131}I activity measurements and on their responses to questionnaires.

For each study subject k , two doses were calculated: (i) a ‘*model-based*’ thyroid dose, D_k^{model} , based on the ^{131}I thyroid activity, $Q_k^{model}(t)$, that was calculated for any time t after the accident using ecological and biokinetic models taking into account personal dosimetry questionnaire; and (ii) a ‘*measurement-based*’ thyroid dose, D_k^{meas} , based on the ^{131}I thyroid activity measured at time t_m after the accident, Q_k^{meas,t_m} . The *measurement-based* thyroid dose, which has been used in epidemiological analysis, is more reliable than the *model-based* thyroid dose, because it is based on an individual measurement of ^{131}I thyroid activity. The *model-based* thyroid dose (mGy) for individual k was calculated as:

where $k_u = 13.84$ is a unit conversion factor (Bq кБк $^{-1}$ g kg $^{-1}$ J MeV $^{-1}$ s d $^{-1}$ mGy Gy $^{-1}$); is the thyroid mass that corresponds to sex and age of individual k (g) [6]; $e_{th,k}^{I-131}$ is the mean energy absorbed in the thyroid gland per decay of ^{131}I in the thyroid that corresponds to age of individual k [14] (MeV); $Q_k^{model}(t)$ is the variation of the *model-based* activity of ^{131}I in the thyroid of individual k with time t (kBq); $T = 80$ d is the upper limit of integration from ATA on 26 April 1986 ($t = 0$) until 14 July 1986.

To calculate the *measurement-based* dose, the *model-based* ^{131}I thyroid activity at time of measurement t_m , $Q_k^{model}(t_m)$, was replaced in Eq. (1) with the measured activity, Q_k^{meas,t_m} , using the so-called ‘scaling factor’ $SF_k = Q_k^{meas,t_m} / Q_k^{model}(t_m)$. The scaling factor accounts for all steps in thyroid dose estimation, including ecological and biokinetic modeling and questionnaire data. A SF_k — value of 1.0 indicates a perfect agreement between the *model-based* and *measurement-based* doses.

Вважається, що теоретична динаміка функції $Q_k^{model}(t)$ є релевантною, тому коефіцієнт калібрування, розрахований для часу t_m , є сталим для будь-якого часу після аварії. За цих умов *виміряна* доза опромінення ЩЗ (D_k^{meas} , Гр) розраховується як:

$$D_k^{meas} = \frac{Q_k^{meas, t_m}}{Q_k^{model}(t_m)} \cdot D_k^{model} = SF_k \cdot D_k^{model} \quad (2)$$

Детальний опис дозиметричної моделі, що використовувалась для розрахунку доз опромінення щитоподібної залози членів українсько-американського когортного дослідження, можна знайти в [15].

Дозиметрична група 2

Методика розрахунку доз опромінення ЩЗ для цієї групи по суті не відрізнялась від описаної вище групи 1. Однак, на відміну від групи 1, персональні дозиметричні інтерв'ю для осіб цієї групи не проводились. Тому для розрахунку доз опромінення ЩЗ були зроблені такі припущення: (а) місце проживання особи (на момент аварії або на момент операції), зареєстроване в СТБ, вважалось місцем її постійного проживання з 26 квітня по 14 липня 1986 року; (б) для розрахунку добового надходження ^{131}I та динаміки модельної активності ^{131}I у щитоподібній залозі $Q_k^{model}(t)$ у рівнянні (1) використовувалися референтні показники споживання молока та листових овочів особою залежно від її віку та статі [15]; та (в) вважалось, що особа не приймала препаратів стабільного йоду для блокування поглинання ^{131}I щитоподібною залозою.

Дозиметрична група 3

Дози опромінення ЩЗ для осіб з цієї групи розраховувались за методологією TDU20, точність якої залежить від інтенсивності тиреодозиметричного моніторингу в населеному пункті, у якому проживала особа в перші місяці після аварії. Усі населені пункти України поділяються на три рівні залежно від кількості вимірювань активності ^{131}I у мешканців даного населеного пункту у 1986 році. [5]:

► До першого рівня належать 835 населених пунктів Вінницької, Житомирської, Київської та Чернігівської областей,¹ де вимірювання активності ^{131}I у ЩЗ, що проводилися у травні та червні 1986 року, мали місце щонайменше серед 10 мешканців даного населеного пункту (дозиметрична підгрупа 3.1).

► До другого рівня належать 690 населених пунктів, де вимірювання ЩЗ або не проводилися вза-

It was held that the temporal variation of $Q_k^{model}(t)$ is correctly represented, so that the adjustment at time t_m is also valid for any other time after the accident. Under those conditions, the *measurement-based* thyroid dose (D_k^{meas} , Gy) was calculated as:

A detailed description of the dose reconstruction model and its parameters used to calculate thyroid doses for members of the Ukrainian-American cohort can be found elsewhere [15].

CTB dosimetry group 2

The approach for this group followed the same general methodology as described above; however, personal dosimetry interview data were unavailable. Therefore, the following assumptions were applied: (i) the residence recorded in the CTB – either at the time of the accident (ATA) or at the time of thyroid surgery – was assumed to represent the permanent residence during 26 April – 14 July 1986; (ii) estimation of daily ^{131}I intake and the *model-based* thyroid activity of individual k at time t , $Q_k^{model}(t)$, (Eq. 1), was based on reference age- and sex-specific consumption rates of milk and leafy vegetables [15]; and (iii) was no administration of stable iodine to block thyroid uptake of ^{131}I .

CTB dosimetry group 3

The thyroid doses for individuals in this group were estimated using TDU20, which allows calculating thyroid radiation doses, the accuracy of which depends on the intensity of thyroid dosimetric monitoring in the locality where the individual lived in the first months after the accident. All localities in Ukraine are divided into three levels depending on the number of ^{131}I activity measurements among residents of this locality in 1986. [5]:

► The first level included 835 settlements of Vinnytsia, Zhytomyr, Kyiv, and Chernihiv Oblasts¹ where measurements of ^{131}I thyroid activity were performed in May and June 1986 among at least 10 residents in each settlement (CTB dosimetry subgroup 3.1).

► The second level included 690 settlements where thyroid measurements were not performed or the

¹Область – це найбільша адміністративна одиниця в Україні, типовий розмір якої становить 10 000–30 000 км², а населення становить 1,0–1,5 мільйона осіб. Кожна область у 1986 році поділялась приблизно на 20 районів.

¹An oblast is the largest administrative unit in Ukraine with a typical size of 10,000–30,000 km² and a population of 1.0–1.5 million persons. In 1986, each oblast was sub-divided into about 20 districts.

галі, або кількість виміряних осіб була меншою 10, але такі вимірювання проводилися щонайменше у п'яти інших населених пунктах даного адміністративного району¹ (дозиметрична підгрупа 3.2).

► Третій рівень включає 28 828 населених пунктів, розташованих у тих районах, де вимірювання ЩЗ не проводилися або де кількість вимірювань була недостатньою. До цього рівня належать населені пункти, які не були включені до першого та другого рівнів (дозиметрична підгрупа 3.3).

Отже, модельна доза опромінення щитоподібної залози D_k^{model} для особи k розраховувалась за допомогою рівняння (1). Для тих осіб, для яких персональні дозиметричні інтерв'ю не проводились, використовувалися ті ж припущення щодо місця проживання, особливостей харчування та вживання препаратів стабільного йоду, що й для дозиметричної групи 2. Для розрахунку дози опромінення ЩЗ особи статі « s », що належить до вікової групи « a » та проживала в j -му населеному пункті, модельна доза коригувалась за допомогою залежного від віку, статі та населеного пункту калібрувального коефіцієнта, який розраховувався за формулою:

$$SF_{a,s,j} = D_{a,s,j}^l / D_{a,s,j}^{model} \quad (3)$$

де $D_{a,s,j}^l$ — середня доза опромінення ЩЗ особи вікової групи « a », статі « s » з j -го населеного пункту, що належить до l -го рівня (першого, другого або третього), як це описано вище та в [5]; а $D_{a,s,j}^{model}$ — модельна доза опромінення ЩЗ особи тієї ж вікової групи і статі, що проживає в тому ж населеному пункті.

Якщо з особою не проводилось персональне дозиметричне інтерв'ю, доза опромінення ЩЗ збігалася з дозою розрахованою у [5]. Однак для осіб, які пройшли персональні дозиметричні інтерв'ю, дози відрізнялися від доз розрахованих у [5], оскільки була відома індивідуальна інформація про місце проживання, раціон харчування та вживання препаратів стабільного йоду.

Дозиметрична група 4

Для осіб, які зазнали опромінення внутрішньоутробно, розглядалось два періоди внутрішнього опромінення ЩЗ радіонуклідом ^{131}I : (а) пренатальне опромінення ЩЗ плоду внаслідок надходження ^{131}I до організму матері з 26 квітня по 14 липня 1986 року та (б) постнатальне опромінення дитини (для народжених до 14 липня 1986 року). Оцінка пренатальної до-

number of measured individuals was less than 10, but such measurements were performed in at least five other settlements in a given district,¹ which is an administrative sub-region of an oblast (CTB dosimetry subgroup 3.2).

► The third level included 28,828 settlements located in those districts where thyroid measurements had not been performed, or where the number of measurements was insufficient. This level includes settlements that were not included in the first and second level (CTB dosimetry subgroup 3.3).

In brief, the *model-based* thyroid dose, D_k^{model} , for individual k was calculated using Eq. 1. For individuals for whom personal dosimetry interviews data were not available, the same assumptions as for CTB dosimetry group 2 were used for place of residence, reference diet and stable iodine administration. To calculate the dose for an individual included in the age and gender groups « a , s » living in the j -th settlement, the *model-based* dose was adjusted using an age- sex- and settlement-specific scaling factor:

where $D_{a,s,j}^l$ is the average thyroid dose for age and gender group « a , s » for the j -th settlement of the l -th level (first, second or third) of information described above and in [5]; and $D_{a,s,j}^{model}$ is the *model-based* thyroid dose for the same age and gender group « a , s » and for the same j -th settlement.

For individuals for whom personal dosimetry interviews data were not available, thyroid doses for CTB dosimetry group 3 were assumed to be the same as those calculated in [5]. However, for individuals who underwent personal dosimetry interviews, the doses differed from those calculated in [5], since individual information on places of residence, diet and stable iodine administration was available.

CTB dosimetry group 4

For individuals exposed *in utero*, two periods of exposure of the thyroid gland from ^{131}I were considered: (i) prenatal exposure of the fetus thyroid gland from intake of ^{131}I by the mother during 26 April - 14 July 1986, and (ii) postnatal exposure of the child born before 14 July 1986. Estimation of the prenatal fetus thyroid dose from ^{131}I intake

¹За адміністративним поділом до 2020 року

¹According to administrative division in 2020

зи опромінення ЩЗ плода внаслідок надходження ^{131}I до організму матері базувалася на дозі опромінення ЩЗ матері з використанням біокінетичної моделі, рекомендованої публікацією МКРЗ 88 [16]. Для окремої особи пренатальна доза $D_{k,\text{fetus}}^{\text{model}}$ (мГр) була розрахована як сума добових доз за всі дні t_i , коли відбувалося надходження ^{131}I до організму матері. Максимальне значення t_i , позначене як t_{max} , було прийнято рівним 80 дням (кількість днів між 26 квітня та 14 липня 1986 року). Для дітей, народжених до 14 липня 1986 року, t_{max} — це кількість днів між 26 квітня 1986 року та датою народження. Доза опромінення ЩЗ плода, розрахована на основі біокінетичної моделі МКРЗ, визначалася як:

$$D_{k,\text{fetus}}^{\text{model}} = \sum_{t_i=0}^{t_{\text{max}}} \left[h_T(\tau_0 + t_i) \cdot \int_{t_i}^{t_{i+1}} q_{k,\text{mother}}(t) dt \right], \quad (4)$$

де $h_T(\tau)$ — залежна від гестаційного віку τ доза опромінення ЩЗ плода, нормована на одиницю надходження ^{131}I до організму матері (мГр · кБк $^{-1}$) [16]; τ_0 — гестаційний вік станом на 26 квітня 1986 року (доба); $q_{k,\text{mother}}(t)$ динаміка надходження ^{131}I до організму матері, розрахована за допомогою екологічної моделі [12] (кБк).

Для розрахунку «вимірної» пренатальної дози опромінення ЩЗ особи k , $D_{k,\text{fetus}}^{\text{meas}}$ (мГр), модельна доза коригувалася за допомогою калібрувального коефіцієнта матері:

$$D_{k,\text{fetus}}^{\text{meas}} = D_{k,\text{fetus}}^{\text{model}} \cdot SF_{k,\text{mother}} \quad (5)$$

де $SF_{k,\text{mother}}$ — материнський калібрувальний коефіцієнт для корекції дози дитини, опроміненої внутрішньоутробно, який, за наявності вимірювання активності ^{131}I у ЩЗ матері, визначався так, як описано у розділі «Дозиметрична група 1», а якщо вимірювання не проводилося, то так, як описано в розділі «Дозиметрична група 3» (безрозмірний).

Для осіб, народжених до 14 липня 1986 року, постнатальна доза опромінення ЩЗ від надходження ^{131}I розраховувалася так, як описано в розділі «Дозиметрична група 3». За наявності вимірювання активності ^{131}I у ЩЗ матері, отримана постнатальна доза додатково множилася на материнський калібрувальний коефіцієнт $SF_{k,\text{mother}}$. Для осіб, які перебувають на грудному вигодовуванні, концентрація активності ^{131}I у грудному молоці оцінювалася за допомогою екологічної моделі та інформації про місце проживання матері та її харчування під час грудного вигодовування. Екологічна модель та дані про раціон дитини вико-

by the mother was based on the mother's thyroid dose using the model from ICRP Publication 88 [16]. For individual k , the *model-based* prenatal dose, $D_{k,\text{fetus}}^{\text{model}}$ (mGy), was calculated as the sum of the daily doses over all days t_i when ^{131}I intake by the mother occurred. The maximum value for t_i , denoted as t_{max} , was taken to be 80 d (number of days between 26 April and 14 July 1986) or number of days between 26 April 1986 and date of birth for children born before 14 July 1986. The fetal *model-based* thyroid dose was calculated as:

where $h_T(\tau)$ is the fetal thyroid dose coefficient per unit intake of ^{131}I by the mother depending on gestational age τ (mGy · kBq $^{-1}$) (ICRP 2001); τ_0 is the gestational age ATA on 26 April 1986 (d); $q_{k,\text{mother}}(t)$ describes the variation with time of the ^{131}I intake by the mother of individual k calculated using an ecological model and personal dosimetry questionnaire [12] (kBq).

To calculate the *measurement-based* prenatal thyroid dose of individual k , $D_{k,\text{fetus}}^{\text{meas}}$ (mGy), the *model-based* dose was adjusted by the so-called 'scaling factor' for the mother:

where $SF_{k,\text{mother}}$ is the individual or settlement based unitless scaling for the mother to adjust the *model-based* dose defined depending on the availability of ^{131}I thyroid activity measured in the mother or, if measurement was not done, depending on residence in settlement belonging to one of the TDU20 levels and calculated by Eq. (3) as described above in the Section 'CTB dosimetry group 3'.

For individuals born before 14 July 1986, postnatal thyroid doses from ^{131}I intake were calculated using the same methodology as for CTB dosimetry group 3. If measurement of ^{131}I thyroid activity in the mother was done, the resulting postnatal dose was additionally multiplied by the maternal scaling factor. For breastfed infants, ^{131}I activity concentration in breast milk was estimated with the ecological model, incorporating maternal residential history and dietary data

ристовувались для оцінки динаміки надходження ^{131}I до дитини.

У це дослідження було включено три особи з українсько-американського когортного дослідження осіб, які зазнали опромінення внутрішньоутробно. Для цих осіб є доступною інформація, що отримана з персональних дозиметричних інтерв'ю. Детальний опис дозиметричних моделей, що використовуються для розрахунку доз опромінення ЩЗ, які зазнали опромінення внутрішньоутробно, можна знайти в [17].

Оцінка доз опромінення щитоподібної залози від надходження радіонуклідів $^{132}\text{Te}+^{132}\text{I}$ та ^{133}I

Ядерний реактор продукує, поряд із ^{131}I , короткоіснуючі радіонукліди йоду, які у навколишньому середовищі та організмі людини поведуться аналогічно ^{131}I , а також радіонукліди телуру, які є материнськими відносно йоду. Зокрема $^{132}\text{Te}+^{132}\text{I}$ та ^{133}I , які надходять до ЩЗ головним чином інгаляційним шляхом [18] та, меншою мірою, пероральним шляхом [19]. На початок масового тиреодозиметричного моніторингу в Україні в середині травня 1986 року активність ^{132}I та ^{133}I у ЩЗ знизилася до незначного рівня та вже практично не детектувалася. Тому дози опромінення ЩЗ внаслідок надходження $^{132}\text{Te}+^{132}\text{I}$ та ^{133}I були оцінені з використанням співвідношення радіоізотопів йоду в реакторі та динаміки осідання ^{131}I на підстильну поверхню [7, 20, 21].

Надходження ^{133}I до ЩЗ розраховувалось аналогічно надходженню ^{131}I , але з урахуванням співвідношення активностей ^{133}I та ^{131}I в реакторі 26 квітня 1986 року (1,6) і періоду радіоактивного напіврозпаду ^{133}I (20,8 год). Надходження $^{132}\text{Te}+^{132}\text{I}$ до ЩЗ розраховувалось за надходженням ^{132}Te (період напіврозпаду 78,2 год) через короткий період напіврозпаду ^{132}I (2,3 год) та їхню радіоактивну рівновагу в навколишньому середовищі. Надходження ^{132}Te до ЩЗ інгаляційним шляхом розраховувалось аналогічно до надходження ^{131}I , але з поправкою на співвідношення активностей ^{132}Te та ^{131}I у реакторі на момент аварії (1,5) та період напіврозпаду ^{132}Te . Надходження ^{132}Te до ЩЗ з коров'ячим молоком та молочними продуктами не враховувалося, оскільки коефіцієнт переходу з корму в коров'яче молоко для ^{132}Te значно нижчий, ніж, наприклад, для ^{131}I [22, 23]. Надходження ^{132}Te до ЩЗ з листовими овочами розраховувалося аналогічно до ^{131}I , але з використанням значень параметрів екологічної моделі для телуру [12].

Для розрахунку екологічної дози опромінення ЩЗ плода від надходження ^{133}I та $^{132}\text{Te}+^{132}\text{I}$ використовувалось співвідношення між дозою опромінення ЩЗ матері та плода з публікації МКРЗ 88 [16]. Екологічну постнатальну дозу опромінення ЩЗ від ^{133}I та $^{132}\text{Te}+^{132}\text{I}$

during breastfeeding, and then was used to estimate the temporal variation of the child's ^{131}I intake.

This study also included two individuals from the Ukrainian *in utero* exposure cohort for whom personal dosimetry interview data were available. Detailed descriptions of the dosimetry models used for estimating thyroid doses *in utero* are provided elsewhere [17].

Estimation of thyroid doses from intake of $^{132}\text{Te}+^{132}\text{I}$ and ^{133}I

In addition to ^{131}I , the reactor released short-lived radioiodines with environmental and biokinetic behaviors similar to ^{131}I , as well as radiotelluriums, which are the precursors of iodine. Among these, ^{132}I (the decay product of ^{132}Te) and ^{133}I contributed most to inhalation dose [18] and, to a lesser extent, to ingestion dose [19]. By mid-May 1986, when large-scale instrumental thyroid monitoring began in Ukraine, thyroid activities of ^{132}I and ^{133}I had decayed to negligible levels and thus were not measured. Consequently, thyroid doses from intake of $^{132}\text{Te}+^{132}\text{I}$ and ^{133}I were estimated using reactor-based radionuclide ratios at the time of the accident (ATA) and the temporal dynamics of ^{131}I ground deposition [7, 20, 21].

Intake of ^{133}I was estimated using the same methodology as for ^{131}I , with parameter adjustments specific to ^{133}I : the $^{133}\text{I}/^{131}\text{I}$ activity ratio in the reactor release on 26 April 1986 (1.6) and a physical half-life of 20.8 h. Intake of $^{132}\text{Te}+^{132}\text{I}$ was based on ^{132}Te (half-life: 78.2 h), given the short half-life of ^{132}I (2.3 h) and their equilibrium in the environment. Inhalation intake of ^{132}Te was calculated analogously to ^{131}I , with adjustment for the $^{132}\text{Te}/^{131}\text{I}$ activity ratio ATA of 1.5 and the radioactive decay rate of ^{132}Te . The intake of ^{132}Te via cow's milk and dairy products was not considered because its transfer from feed to cow's milk is substantially lower than that of ^{131}I [22, 23]. Intake of ^{132}Te from leafy vegetables was estimated in the same way as for ^{131}I , applying tellurium-specific parameters in the ecological model [12].

To calculate the fetal *model-based* thyroid dose from ^{133}I and $^{132}\text{Te}+^{132}\text{I}$ intake, the fetal thyroid dose coefficients from ICRP Publication 88 [16] were used. *Model-based* postnatal thyroid dose from ^{133}I and $^{132}\text{Te}+^{132}\text{I}$ were calcu-

було розраховано, як описано в [12], з використанням дозових коефіцієнтів опромінення ЩЗ новонароджених при інгаляційному та пероральному надходженні відповідних радіонуклідів [24, 25].

Виміряна доза опромінення ЩЗ від короткоіснуючих радіонуклідів йоду та телуру розраховувалась за формулою:

$$D_{k,SL}^{meas} = (D_{k,I-132}^{ecol} + D_{k,I-133}^{ecol}) \cdot SF_k, \quad (6)$$

де $D_{k,SL}^{meas}$ – виміряні дози опромінення ЩЗ особи k від $^{132}\text{Te}+^{132}\text{I}$ та ^{133}I (мГр); $D_{k,I-132}^{ecol}$ і $D_{k,I-133}^{ecol}$ – екологічні дози опромінення ЩЗ особи k внаслідок опромінення $^{132}\text{Te}+^{132}\text{I}$ та ^{133}I відповідно (мГр); SF_k – калібрувальний коефіцієнт для коригування екологічної дози (безрозмірний).

Значення калібрувальних коефіцієнтів для розрахунку доз опромінення ЩЗ від короткоіснуючих радіонуклідів йоду та телуру були такими ж, як і для ^{131}I (див. розділ «Оцінка доз опромінення щитоподібної залози від надходження ^{131}I »).

Доза зовнішнього опромінення щитоподібної залози

Підхід, який використовується для оцінки доз опромінення ЩЗ внаслідок зовнішнього опромінення радіонуклідами, що випали на ґрунт, полягає в інтегруванні динаміки потужності поглиненої дози у ЩЗ з урахуванням властивостей екранування, типових для житлової забудови населеного пункту, де проживала особа:

$$D_k^{ext} = BF_a \cdot \sum_i DF_{i,a} \cdot \int_{t_1}^{t_2} \sigma_i(t) \cdot p(t) dt \quad (7)$$

де D_k^{ext} – доза опромінення ЩЗ від зовнішнього опромінення особи k (мГр); BF_a – поведінковий фактор, який визначається за часом, проведеним особою у спорудах з різним коефіцієнтом ослаблення радіоактивності в населеному пункті (дерев'яний будинок, бетонна споруда, відкритий простір тощо) для вікової групи a , наведений у таблиці 2 згідно з [26] (безрозмірний); $DF_{i,a}$ – потужність поглиненої дози у ЩЗ, нормована на щільність випадіння i -го радіонукліда на початку аварії для вікової групи a (мГр доба⁻¹ на кБк м⁻²); $\sigma_i(t)$ – щільність осадженого i -го радіонукліда в момент часу t у даному населеному пункті (кБк м⁻²); $p(t)$ – функція ослаблення, що відображає зменшення потужності поглиненої дози внаслідок міграції радіонуклідів у ґрунті; t_1, t_2 – час, що відповідає початку та закінченню проживання в населеному пункті, починаючи від дати ава-

lated as it is described in [12] using inhalation and ingestion thyroid dose coefficients for newborns [24, 25].

The *measurement-based* thyroid dose from short-lived radioiodine and radiotellurium isotopes was calculated as:

where $D_{k,SL}^{meas}$ is the individual thyroid doses of cohort member k from ^{132}I and ^{133}I (mGy); $D_{k,I-132}^{ecol}$ and $D_{k,I-133}^{ecol}$ are the *measurement-based* thyroid doses of person k from $^{132}\text{Te}+^{132}\text{I}$ and ^{133}I (mGy); SF_k is the individual scaling factor to adjust the *model-based* dose (unitless).

The scaling factors used to calculate thyroid doses from short-lived radioiodines were assumed to be identical to those applied for ^{131}I (see section 'Estimation of thyroid doses from ^{131}I intake').

Thyroid doses from external irradiation

Thyroid doses from external irradiation from the ground-deposited radionuclides were estimated by integrating the time-dependent dose rate in air per unit deposition, with adjustments for shielding characteristics typical of the residential environment of settlement where the study subject resided:

where D_k^{ext} is the thyroid dose from external irradiation of individual k (mGy); BF_a is the behavioral factor that takes into account occupancy factors, describing the fraction of time spent by individual at locations of different types in the settlement (living house, working building, outdoors, etc.), and location factors, which are defined as the ratio of the dose rate at locations of different types in the settlement and the dose rate at an undisturbed lawn far from any buildings, for age group a given in Table 2 according to [26] (unitless); $DF_{i,a}$ is the initial absorbed dose rate in the thyroid per unit activity of i -th radionuclide in soil for age group a (mGy · d⁻¹ per kBq m⁻²); $\sigma_i(t)$ is the ground deposition density of i -th radionuclide at time t in given settlement (kBq m⁻²); $p(t)$ is the attenuation function that reflects the

Таблиця 1

Коефіцієнт ослаблення дози для сільських та міських населених пунктів і різних вікових груп, BF_a [26]

Table 1

Dose reduction factor for rural and urban settlements and different age groups, BF_a [26]

Вікова група / Age group	Коефіцієнт ослаблення дози для населеного пункту* Dose reduction factor for type of settlement*	
	сільський / rural	міський / urban
Новонароджені	0,14 (0,16)	0,08 (0,09)
1 рік	0,15 (0,18)	0,08 (0,11)
5 років	0,17 (0,21)	0,11
10 років	0,21 (0,23)	0,14
15 років	0,21 (0,23)	0,14
Дорослі	0,33 (0,40)	0,14

Примітка. *Для періодів 1986–1987 рр. та 1988–2026 рр. (у дужках)

Note. *For time periods of 1986–1987 and 1988–2026, which is given in parentheses

рії на Чорнобильській АЕС (26 квітня 1986 року) (доба).

Для дорослих осіб потужності поглинених доз в щитоподібній залозі, нормовані на одиницю щільності випадіння радіонукліда на ґрунт від ефективного плоского джерела, розташованого на початковій глибині, $0,5 \text{ г см}^{-2}$, що враховує щільність ґрунту та початкову міграцію радіонуклідів, були взяті з [27]. Співвідношення між потужностями поглиненої дози в щитоподібній залозі для дорослих та дітей різних вікових груп були отримані з публікації МКРЗ 144 [28], вважаючи, що ці співвідношення однакові для потужності ефективною дози та поглиненої дози у ЩЗ. Вони були прийняті рівними 1,46 для новонароджених та 1,3, 1,2, 1,1 і 1,04 для дітей віком 1, 5, 10 і 15 років відповідно.

Щільність випадіння i -го радіонукліда в момент часу t розраховувалась як:

decreasing dose rate due to radionuclides migration in soil; t_1 , t_2 are times corresponding to the beginning and end of residence in the settlement, counting from the date of the Chornobyl accident (26 April 1986) (d).

The initial absorbed dose rates in the thyroid per unit deposition density of i -th radionuclide on the ground for adults from an effective plane source located at an initial depth of 0.5 g cm^{-2} , which accounted for soil roughness and initial radionuclide migration were taken from [27]. The age-dependent adjustment factors for the absorbed dose rate in the thyroid were derived from ICRP Publication 144 [28] assuming that it is of the same pattern as for the effective dose rate. They were taken to be 1.46 for newborns and 1.3, 1.2, 1.1, 1.04 for children of 1, 5, 10, 15 years old, respectively.

The deposition density of i -th radionuclide at time t was calculated as:

$$\sigma_i(t) = \sigma_{Cs137}(0) \cdot R_{i/Cs137} \cdot e^{-\lambda_{r,i} \cdot t}, \quad (8)$$

де $\sigma_{Cs137}(0)$ — щільність випадіння ^{137}Cs на 7 травня 1986 року (кБк м^{-2}); $R_{i/Cs137}$ — відношення активності i -го радіонукліда до активності ^{137}Cs у випадіннях на початку аварії [20, 21]; $\lambda_{r,i}$ — швидкість радіоактивного розпаду i -го радіонукліда (доба^{-1}).

Для радіонуклідів ^{95}Nb , ^{132}I та ^{140}La , що є продуктами розпаду ^{95}Zr , ^{132}Te та ^{140}Ba , щільність осадження була розрахована за умови радіоактивної рівноваги материнського та дочірнього радіонуклідів:

where $\sigma_{Cs137}(0)$ is the deposition density of ^{137}Cs on 7 May 1986 (kBq m^{-2}); $R_{i/Cs137}$ is the ratio of activity of i -th radionuclide in deposition to that of ^{137}Cs at the time of deposition [20, 21]; $\lambda_{r,i}$ is the radioactive decay rate of i -th radionuclide (d^{-1}).

For radionuclides ^{95}Nb , ^{132}I , and ^{140}La , that are decay products of ^{95}Zr , ^{132}Te , and ^{140}Ba , the deposition density was calculated under the condition of radioactive equilibrium of parent and daughter radionuclide:

$$\sigma_i(t) = \sigma_i(0) \cdot e^{-\lambda_{r,i} \cdot t} + \sigma_{i,p}(0) \cdot f_i \frac{\lambda_{r,i}}{\lambda_{r,i} - \lambda_{r,p}} \cdot (e^{-\lambda_{r,i} \cdot t} - e^{-\lambda_{r,p} \cdot t}), \quad (9)$$

де $\sigma_i(0)$ та $\sigma_{i,p}(0)$ — щільність випадіння i -го радіонукліда та його материнського радіонукліда на

where $\sigma_i(0)$ and $\sigma_{i,p}(0)$ are the deposition densities of i -th radionuclide and parent to i -th radionuclide at

момент випадіння відповідно (кБк м^{-2}); f_i — фракція виходу дочірнього радіонукліда (безрозмірний); $\lambda_{r,i}^p$ — швидкість радіоактивного розпаду материнського радіонукліда (доба^{-1}).

Функцію ослаблення, $p(t)$, застосовували лише для ^{134}Cs та ^{137}Cs :

$$p(t) = \begin{cases} p_1 \cdot e^{-\lambda_1 \cdot t} + p_2 \cdot e^{-\lambda_2 \cdot t} & \text{для } ^{134}\text{Cs та } ^{137}\text{Cs} \\ 1 & \text{для інших радіонуклідів} \end{cases} \quad \begin{matrix} \text{for } ^{134}\text{Cs and } ^{137}\text{Cs} \\ \text{for other radionuclides} \end{matrix} \quad (10)$$

де $p_1 = 0,4$, $p_2 = 0,6$, $\lambda_1 = 1,27 \cdot 10^{-3}$ (доба^{-1}), $\lambda_2 = 3,8 \cdot 10^{-5}$ (доба^{-1}) є параметрами функції ослаблення [20].

Для періоду після 1999 року розглядався лише радіоактивний розпад ^{137}Cs .

Дози внутрішнього опромінення щитоподібної залози від надходження радіонуклідів ^{134}Cs та ^{137}Cs

Доза внутрішнього опромінення ЩЗ від надходження ^{134}Cs та ^{137}Cs розраховувалась так:

$$D_k^{CS} = \sum_r DF_{r,a} \cdot \sigma_{Cs137} \cdot \int_{t_1}^{t_2} I_{r,a}(t) dt \quad (11)$$

де D_k^{CS} — доза опромінення ЩЗ внаслідок потрапляння до організму радіонуклідів радіоцезію (мГр); $DF_{r,a}$ — дозовий коефіцієнт внутрішнього опромінення ЩЗ особи вікової групи a для r -го радіонукліда Cs [24] (мГр Бк^{-1}); $I_{r,a}(t)$ — функція надходження r -го радіонукліда Cs з продуктами харчування до організму особи віку a , нормована до щільності випадіння ^{137}Cs (Бк доба^{-1} на кБк м^{-2}); σ_{Cs137} — щільність випадіння ^{137}Cs у населеному пункті (кБк м^{-2}).

Для оцінки функції надходження ^{134}Cs було використано початкове відношення активності ^{134}Cs до ^{137}Cs у випадіннях на початку аварії, що дорівнює 0,5:

$$I_{Cs134,a}(t) = 0.5 \cdot I_{Cs137,a}(t) \cdot e^{-(\lambda_{r,Cs134} - \lambda_{r,Cs137}) \cdot t}, \quad (12)$$

де $I_{Cs134,a}(t)$ та $I_{Cs137,a}(t)$ — нормовані функції надходження ^{134}Cs та ^{137}Cs відповідно, з раціоном для особи віку a у момент часу t після аварії (Бк доба^{-1} на кБк м^{-2}); $\lambda_{r,Cs134} = 9,21 \cdot 10^{-4}$ (д^{-1}) та $\lambda_{r,Cs137} = 6,33 \cdot 10^{-5}$ (д^{-1}) — швидкості радіоактивного розпаду ^{134}Cs та ^{137}Cs відповідно.

Методологія розрахунку функції надходження ^{137}Cs до організму людини внаслідок поверхневого забруднення рослинності (у 1986 році) базувалася на теоретичній моделі транспорту радіоцезію ланками харчового ланцюжка з подальшим коригуванням цієї моделі за результатами вимірювань інкорпорованого ^{137}Cs на лічильниках випромінювання людини (ЛВЛ),

the time of deposition, respectively (кБк м^{-2}); f_i is the daughter radionuclide production yield (unitless); $\lambda_{r,i}^p$ is the radioactive decay rate of parent to i -th radionuclide (д^{-1}).

The attenuation function, $p(t)$, was applied only for ^{134}Cs and ^{137}Cs :

where $p_1 = 0.4$, $p_2 = 0.6$, $\lambda_1 = 1.27 \cdot 10^{-3}$ (д^{-1}), $\lambda_2 = 3.8 \cdot 10^{-5}$ (д^{-1}) are the parameters of the attenuation function [20].

For the period after 1999, only the radioactive decay of ^{137}Cs was considered.

Thyroid doses from ingestion of ^{134}Cs and ^{137}Cs

The thyroid dose from ^{134}Cs and ^{137}Cs ingestion was calculated as:

where D_k^{CS} is the thyroid dose due ingestion of radio-caesium isotopes of individual k belongs to age group a (mGy); $DF_{r,a}$ is the thyroid ingestion dose coefficient of r -th Cs isotope for an individual from age group a [24] (mGy Bq^{-1}); $I_{r,a}(t)$ is the intake function of r -th Cs isotope with foodstuffs for an individual of age a normalized to ^{137}Cs deposition density (Bq д^{-1} per кБк м^{-2}); σ_{Cs137} is the ^{137}Cs deposition density in the settlement of residence (кБк м^{-2}).

An initial activity ratio of ^{134}Cs to ^{137}Cs of 0.5 was used to estimate the normalized ^{134}Cs intake function:

where $I_{Cs134,a}(t)$ and $I_{Cs137,a}(t)$ are the normalized intake functions of ^{134}Cs and ^{137}Cs , respectively, with diet for an individual of age a at time t after the accident (Bq д^{-1} per кБк м^{-2}); $\lambda_{r,Cs134} = 9.21 \cdot 10^{-4}$ (д^{-1}) and $\lambda_{r,Cs137} = 6.33 \cdot 10^{-5}$ (д^{-1}) are the radioactive decay rates of ^{134}Cs and ^{137}Cs , respectively.

The methodology for calculating intake function from surface contamination of vegetation in 1986 was based on a theoretical model of radio-caesium transfer through the food chain, adjusted using whole-body counter (WBC) measurements carried out between 15 July and 31 December 1986. For root uptake beginning in 1987 and

проведених у період з 15 липня по 31 грудня 1986 року. Для кореневого надходження, що почалося з 1987 року, використовувалася еколого-дозиметрична модель з параметрами, що визначалися видами, якістю та повноцінністю молочного та ЛВЛ-моніторингу, який проводився на радіоактивно забруднених територіях у 1987–2013 роках. За відсутності ЛВЛ-вимірювань, динаміка надходження ^{137}Cs до організму людини оцінювалася з урахуванням рівнів забруднення ґрунту та молока в населеному пункті проживання, а також специфіки транспорту цезію у навколишньому середовищі. Детальний опис еколого-дозиметричної моделі, що використовується для розрахунку доз опромінення ЩЗ від потрапляння до організму радіонуклідів цезію представлено в [29].

Оцінка невизначеностей дозових оцінок

Невизначеності (похибки) індивідуальних дозових оцінок опромінення ЩЗ оцінювалася лише для дози, отриманої шляхом внутрішнього опромінення ЩЗ радіонуклідом ^{131}I , який був головним шляхом опромінення ЩЗ більшості учасників дослідження. Невизначеність доз, отриманих іншими шляхами опромінення, такими як опромінення від надходження короткоіснуючих радіонуклідів $^{132}\text{Te}+^{132}\text{I}$ та ^{133}I , зовнішнє опромінення і внутрішнє опромінення від ^{134}Cs та ^{137}Cs , у цьому дослідженні не розглядалася.

Для оцінки невизначеностей доз опромінення було використано метод Монте-Карло. Класичні та берксонівські похибки оцінювалися окремо, оскільки їхній вплив на оцінки радіаційно-пов'язаного ризику раку ЩЗ внаслідок внутрішнього опромінення радіонуклідом ^{131}I значно відрізнявся [30, 31]. Було розраховано 1000 індивідуальних стохастичних доз опромінення ЩЗ для кожної особи. Реалізації доз опромінення особи k (від $D_{1,k}$ до $D_{1000,k}$) представляють 1000 *індивідуальних стохастичних* доз опромінення ЩЗ цієї особи. Середнє арифметичне розподілу 1000 *індивідуальних стохастичних* доз опромінення ЩЗ надалі називається дозою опромінення ЩЗ цієї особи. Детальний опис параметрів еколого-дозиметричної моделі з розділенням джерел класичних та берксонівських похибок представлено у роботах [12, 15, 17].

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Дози опромінення щитоподібної залози

У таблиці 3 наведено дози опромінення ЩЗ від різних шляхів опромінення, реконструйовані для учасників дослідження. Середнє арифметичне значення доз опромінення ЩЗ від надходження ^{131}I , розраховане для всіх учасників дослідження, за винятком дозиметричної групи 5, становить 470 мГр, медіана – 91 мГр, а максимальне зна-

later, an ecological dosimetric model was applied, with the parameters determined by the type, quality, and completeness of cow's milk and WBC monitoring conducted in contaminated territories between 1987 and 2013. In the absence of WBC measurements, intake function was estimated using environmental characteristics, including soil type, levels of soil and milk contamination, and milk equivalent. A detailed description of the model used to calculate thyroid doses from ingestion of Cs isotopes is provided elsewhere [29].

Assessment of uncertainties in doses

Uncertainty in individual estimates of thyroid doses were assessed for doses due to ^{131}I intake only, which was the predominant exposure of the thyroid for most study participants. Other exposure pathways, such as intake of short-lived $^{132}\text{Te}+^{132}\text{I}$ and ^{133}I , external irradiation and ingestion of ^{134}Cs and ^{137}Cs , were not considered in this study.

To assess dose uncertainties, a Monte Carlo method was used to calculate 1,000 individual stochastic doses from ^{131}I intake for each studied individual. The classical and Berkson types of errors were evaluated separately because their influences on estimates of radiation-related risk of thyroid cancer following exposure to ^{131}I were considerably different [30, 31]. Dose realizations for person k (from $D_{1,k}$ to $D_{1000,k}$) represent 1,000 *individual stochastic* thyroid doses of this individual. The arithmetic means of 1,000 *individual stochastic* thyroid doses is called hereinafter as 'thyroid dose' of this individual. A detailed description of model parameters with separation of the sources of classical and Berkson-type errors for dose reconstruction models used to calculate doses for individuals belonging to different CTB dosimetry groups can be found elsewhere [12, 15, 17].

RESULTS AND DISCUSSION

Thyroid dose estimates

Table 3 summarizes the reconstructed thyroid doses from different exposure pathways. For study participants, excluding CTB dosimetry group 5, the arithmetic mean thyroid dose from ^{131}I intake was 470 mGy, with a median of 91 mGy and a maximum of nearly 13.3 Gy. Estimated doses

Таблиця 3

Дози опромінення щитоподібної залози учасників дослідження від різних шляхів опромінення

Table 3

Thyroid doses from different exposure pathways reconstructed for study participants

Шлях експозиції / Exposure pathway	Кількість осіб Number of persons	Доза на щитоподібну залозу (мГр) / Thyroid dose (mGy)		
		AM $\pm$ SD*	Медіана / Median	Діапазон / Range
Надходження ^{131}I / Intake of ^{131}I	121**	470 $\pm$ 1 390	91	0 – 13 280
Надходження $^{132}\text{Te}+^{132}\text{I}$ та ^{133}I / Intake of $^{133}\text{Te}+^{132}\text{I}$ and ^{133}I	121**	37 $\pm$ 109	1,2	0 – 697
Зовнішнє опромінення / External irradiation	140	2,9 $\pm$ 5,8	1,3	0,01 – 49
Надходження ^{134}Cs та ^{137}Cs / Ingestion of ^{134}Cs and ^{137}Cs	140	2,1 $\pm$ 2,0	1,5	0,1 – 14
Всього / All exposure pathway	140	445 $\pm$ 1 385	71	0,23 – 13 980

Примітки. *AM – середнє арифметичне, SD – стандартне відхилення. **Кількість осіб, за винятком дозиметричної групи 5.

Notes. *AM = arithmetic mean, SD = standard deviation. **Number of persons excluding CTB dosimetry group 5.

чення – майже 13,3 Гр. Доза опромінення ЩЗ від короткоіснуючих ізотопів йоду та телуру досягає 700 мГр, доза від зовнішнього опромінення – 49 мГр, а доза внутрішнього опромінення внаслідок надходження радіоактивного цезію не перевищує 14 мГр. Для всіх учасників дослідження середня доза від усіх шляхів опромінення ЩЗ становить 445 Гр, медіана – 71 мГр, а максимальне значення – близько 14 Гр. Потрапляння ^{131}I до організму людини є основним шляхом опромінення ЩЗ, його медіанний внесок у загальну дозу опромінення ЩЗ становить 92 %.

У таблиці 4 наведено дози опромінення ЩЗ від надходження ^{131}I до організму учасників дослідження. Як і очікувалося, найвищі середні дози були отримані особами, що відносяться до дозиметричних груп 1 (1 785 мГр) та 2 (750 мГр), оскільки у всіх цих осіб вимірювалася ак-

from short-lived iodine and tellurium isotopes reached up to 700 mGy. Individual thyroid doses from external irradiation ranged up to 49 mGy, while those from internal exposure due to cesium ingestion did not exceed 14 mGy. The mean thyroid dose from all pathways combined among all study participants was 445 mGy, with a median of 71 mGy and a maximum of nearly 14 Gy. Intake of ^{131}I represented the dominant exposure pathway, contributing a median of 92 % of the thyroid dose.

Table 4 presents thyroid doses from ^{131}I intake by CTB dosimetry group, oblast of residence ATA, and settlement type. As expected, the highest mean doses were observed in CTB dosimetry groups 1 (1,785 mGy) and 2 (750 mGy), since all

Таблиця 4

Розподіл дози опромінення щитоподібної залози від надходження ^{131}I для 121 учасника дослідження за різними параметрами

Table 4

Thyroid doses from ^{131}I intake by selected groups for 121 study participants from Chornobyl Tissue Bank (CTB) dosimetry groups 1, 2, 3, and 4

Параметр / Parameter	Кількість осіб Number of persons	Доза опромінення щитоподібної залози від надходження ¹³¹ I (мГр) ¹³¹ I thyroid dose (mGy)		
		Середнє / Mean	Медіана / Median	Діапазон / Range
Дозиметрична група / CTB dosimetry group				
➤ Група 1 / Group 1	25	1 785	945	49 – 13 280
➤ Група 2 / Group 2	1	750	750	-
➤ Група 3 / Group 3	89	125	56	0 – 1 050
➤ Група 4 / Group 4	6	62	29	0 – 230
Місце проживання на момент аварії / Place of residence ATA				
➤ Житомирська область / Zhytomyr Oblast	30	375	77	0 – 3 365
➤ Київська область / Kyiv Oblast	62	260	84	3.0 – 2 725
➤ Чернігівська область / Chernihiv Oblast	23	1 285	305	12 – 13 280
➤ Інше / Others	6	9,0	0,05	0 – 45
Тип населеного пункту / Type of settlement of residence ATA				
➤ Сільський / Rural	60	790	140	0 – 13 280
➤ Міський / Urban	61	160	54	0 – 1 350
Всього	121	470	91	0 – 13 280

тивність ^{131}I у ЩЗ і ці особи проживали на найбільш радіоактивно забруднених територіях. Найвищі дози (середнє значення становить 1 285 мГр, а медіана – 305 мГр) були отримані в Чернігівській області. Дози опромінення ЩЗ, отримані в сільських населених пунктах, були вищими, ніж у міських: 790 мГр проти 160 мГр для середнього арифметичного та 140 мГр проти 54 мГр для медіани відповідно (таблиця 4). Це можна пояснити вищим забрудненням коров'ячого молока (основного джерела надходження ^{131}I) у сільських населених пунктах порівняно з міськими. Цей ефект спостерігався і для інших популяцій, які зазнали впливу Чорнобильських випадів [15, 32].

Порівняння оновлених дозових оцінок з попередніми значеннями

На рисунках 2 і 3 порівнюються дози від надходження ^{131}I , розраховані в цьому дослідженні (CTBD25), з тими, що були оцінені раніше (CTBD10) [3].

Різниця між двома наборами доз була зумовлена головним чином двома факторами. По-перше, було проведено коригування вимірювань активності ^{131}I у ЩЗ 146 425 осіб, включаючи учасників даного дослідження з дозиметричних груп 1, 2 та 4 [4]. По-друге, застосування дозиметричної системи TDU20 у поєднанні з індивідуальними даними про проживання та анамнез харчування, зібраними в даному дослідженні, для розрахунку доз опромінення ЩЗ учасників дослідження з дозиметричних груп 2, 3 та 4 [5].

individuals in these groups had measured ^{131}I thyroid activity, and measurements were conducted in the most contaminated areas. The highest regional doses were recorded in Chernihiv Oblast, with a mean of 1,285 mGy and a median of 305 mGy. Thyroid doses were also higher in rural compared to urban settlements: arithmetic means of 790 mGy vs. 160 mGy, and medians of 140 mGy vs. 54 mGy, respectively (Table 4). This difference reflects the higher contamination of cow's milk, a major source of ^{131}I intake, in rural areas and is consistent with findings from other Chernobyl-exposed populations [15, 32].

Comparison of revised thyroid doses with previous estimates

Figures 2 and 3 compare thyroid doses from ^{131}I intake estimated in this study (CTBD25) with those previously reported (CTBD10) in [3].

The difference between the two dose sets was mainly caused by two factors. First, a revision of ^{131}I thyroid activity measurements in 146,425 individuals, including CTB participants from dosimetry groups 1, 2, and 4, was undertaken to correct for improper measurement geometry and to establish accurate calibration coefficients for unchecked thyroid detectors [4]. Second, the application of the TDU20 system, combined with individual residence and dietary history data collected in the

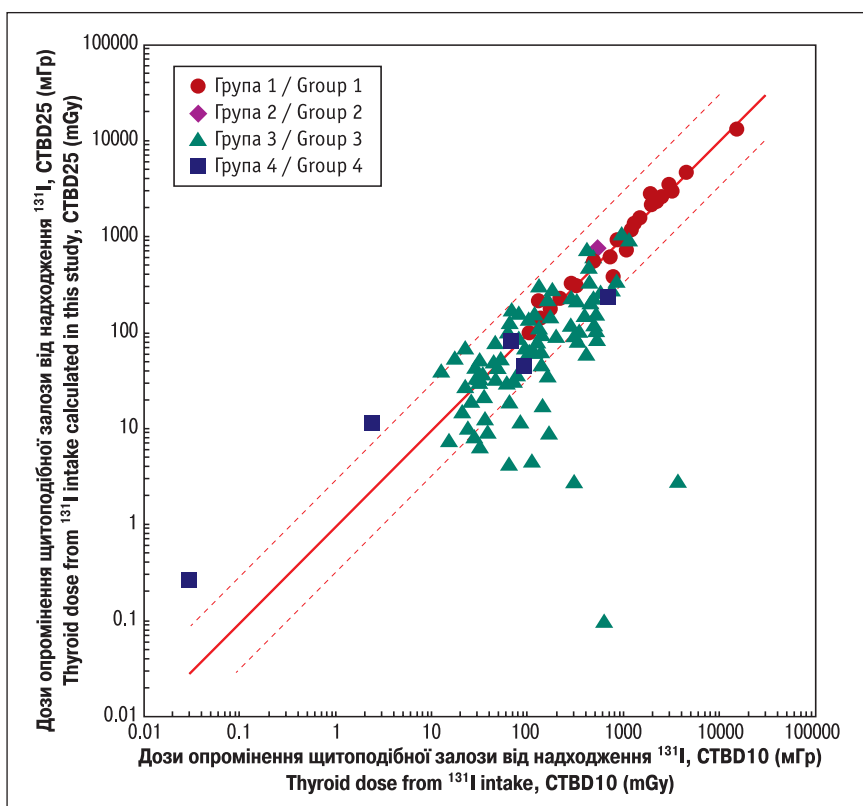


Рисунок 2. Порівняння середніх арифметичних значень 1000 індивідуальних стохастичних доз опромінення щитоподібної залози від надходження ^{131}I , розрахованих за методологіями CTBD25 та CTBD10 у логарифмічній шкалі. Суцільна лінія вказує на узгодженість між дозами, а пунктирні лінії вказують на різницю в 3 рази.

Figure 2. Comparison of the arithmetic means of 1,000 individual stochastic thyroid doses from ^{131}I intake, CTBD25 vs. CTBD10, logarithmic scale for the entire dose range. Solid line indicates agreement between doses, while dashed lines indicate a factor of 3 difference.

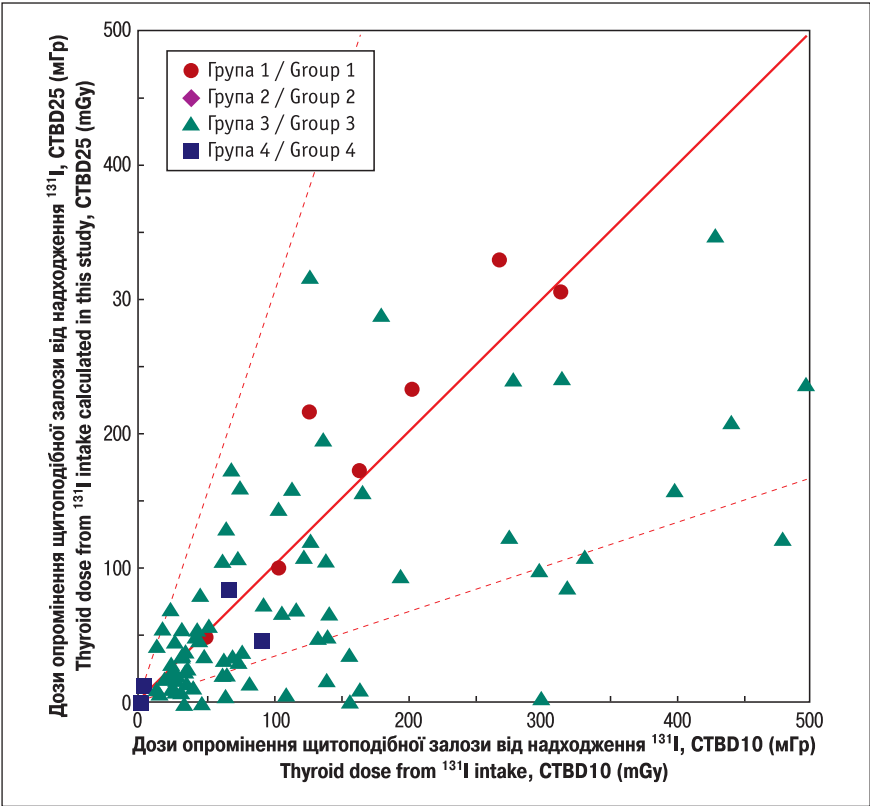


Рисунок 3. Порівняння середніх арифметичних значень 1000 індивідуальних стохастичних доз опромінення щитоподібної залози від надходження ¹³¹I, розрахованих за методологіями CTBD25 та CTBD10, у лінійній шкалі (для доз менше 500 мГр). Суцільна лінія вказує на узгодженість між дозами, а пунктирні лінії вказують на різницю в 3 рази.

Figure 3. Comparison of the arithmetic means of 1,000 individual stochastic thyroid doses from ¹³¹I intake, CTBD25 vs. CTBD10, linear scale for doses less than 500 mGy. Solid line indicates agreement between doses, while dashed lines indicate a factor of 3 difference.

У таблиці 5 порівнюються середні та медіанні значення доз, розрахованих за методологіями CTBD25 та CTBD10, для різних дозиметричних груп. Середнє арифметичне доз, оцінене за методологією CTBD25 для всіх учасників дослідження, зменшилося приблизно на 15 % порівняно з попередніми оцінками за методологією CTBD10 (470 мГр проти 605 мГр), тоді як медіана зменшилася майже на 35 % (91 мГр проти 135 мГр). Найбільше зменшення дози (приблизно вдвічі) спостерігалось серед осіб з 3-ї дозиметричної групи, які вперше пройшли дозиметричне опитування у даному дослід-

present study, to calculate doses for CTB participants from dosimetry groups 2, 3, and 4 [5].

Table 5 compares the mean and median values of the CTBD25 and CTBD10 dose estimates by CTB dosimetry group. For the entire study population, the arithmetic mean of CTBD25 doses was approximately 15 % lower than that of CTBD10 (470 mGy vs. 550 mGy), while the overall median was nearly 35 % lower (91 mGy vs. 135 mGy). The largest reduction, about a two-fold decrease, was observed among individuals from CTB dosimetry group 3, who previously lacked individual questionnaire data.

Таблиця 5

Порівняння доз опромінення щитоподібної залози від надходження ¹³¹I для 121 учасника дослідження, розрахованих за методологіями CTBD25 та CTBD10 для різних дозиметричних груп

Table 5

Comparison of thyroid doses from ¹³¹I intake by Chornobyl Tissue Bank (CTB) dosimetry group, CTBD25 vs. CTBD10

Дозиметрична група CTB dosimetry group	Кількість осіб Number of persons	Доза опромінення щитоподібної залози від надходження ¹³¹ I (мГр) Thyroid dose from ¹³¹ I intake (mGy)					
		Середнє / Mean			Медіана / Median		
		CTBD25	CTBD10	CTBD25/ CTBD10	CTBD25	CTBD10	CTBD25/ CTBD10
1	25	1 785	1 780	1,0	945	1 035	0,91
2	1	750	530	1,4	750	530	1,4
3	89	125	235	0,53	56	105	0,53
4	6	62	135	0,46	29	34	0,85
Всього	121	470	550	0,85	91	135	0,67

женні. Детальне порівняння доз для цієї групи представлено в наступному розділі.

Вплив історії проживання та харчування на оцінки дози опромінення щитоподібної залози

У таблиці 6 наведено статистику анамнезу проживання та харчування учасників дослідження, що використовується для розрахунку доз опромінення ЩЗ від надходження ^{131}I для 68 осіб, які були опитані в цьому дослідженні (17 опитаних осіб з дозиметричної групи 5 тут не розглядаються, оскільки не були опромінені ^{131}I):

► CTBD25_{No} дози розраховані за допомогою методології TDU20 без урахування даних індивідуальної анкети. Натомість вважалося, що особа постійно про-

A detailed comparison of doses for this group is presented in the following section.

Impact of individual questionnaire data on thyroid dose estimates

Table 6 shows the descriptive statistics for individual behavior and dietary data used to calculate the following thyroid doses from ^{131}I intake for 68 individuals who were interviewed in the present study (17 interviewed individuals from CTB dosimetry group 5 are not considered in this subsection since they were not exposed to ^{131}I):

► CTBD25_{No} doses that were calculated using TDU20 without individual questionnaire data. The following behavior and dietary data were used:

Таблиця 6

Статистика анамнезу проживання та харчування учасників дослідження, що використовується для розрахунку доз опромінення ЩЗ від надходження ^{131}I за методологіями CTBD25_{No} та CTBD25_{Qx}

Table 6

Descriptive statistics for individual behavior and dietary data used to calculate CTBD25_{No} and CTBD25_{Qx} doses from ^{131}I intake

Дані про переїзди та дієту учасників дослідження Behavior and dietary data	Використовується для розрахунку доз Used in calculation of doses	
	CTBD25 _{No}	CTBD25 _{Qx}
Історія проживання / History of residence		
► Відсоток осіб, які повідомили про 1 переїзд Percentage of study participants who reported 1 relocation	0 %	35,3 %
► Відсоток осіб, які повідомили про 2 переїзди Percentage of study participants who reported 2 relocations	0 %	8,8 %
Відсоток осіб, що були на грудному вигодовуванні / Percentage of breastfed study participants	11,8 %	10,3 %
Споживання молока від домашніх корів / Consumption of milk from privately owned cows		
► Відсоток споживачів / Percentage of consumers	88,2 %	60,3 %
► Добове споживання (л/доба) / Daily consumption (L/d)*	0,31 ± 0,20 (0,052 – 0,68)	0,28 ± 0,17 (0,03 – 0,63)
► Відсоток осіб, які змінили дієту Percentage of consumers who change milk consumption's habits	0 %	19,1 %
Споживання молока з торговельної мережі / Consumption of milk from commercial trade network		
► Відсоток споживачів / Percentage of consumers	88,2 %	36,8 %
► Добове споживання (л/доба) / Daily consumption (L/d)	0,10 ± 0,07 (0,032 – 0,22)	0,14 ± 0,07 (0,03 – 0,25)
► Відсоток осіб, які змінили дієту Percentage of consumers who change milk consumption's habits	0 %	32,4 %
Споживання молочних продуктів / Consumption of dairy products		
► Відсоток споживачів / Percentage of consumers	88,2 %	61,8 %
► Добове споживання (г/доба) / Daily consumption (g/d)	29,8 ± 8,3 (15 – 43,5)	78,5 ± 55 (7 – 259)
► Відсоток осіб, які змінили дієту Percentage of consumers who change consumption's habits	0 %	32,4 %
Споживання листових овочів / Consumption of leafy vegetables		
► Відсоток споживачів / Percentage of consumers	88,2 %	55,9 %
► Добове споживання (г/доба) / Daily consumption (g/d)	19,4 ± 9,7 (7 – 36)	22 ± 17 (1 – 63)
► Відсоток осіб, які змінили дієту Percentage of consumers who change consumption's habits	0 %	2,9 %
Відсоток учасників дослідження, які приймали препарати стабільного йоду Percentage of study participants with administration of stable iodine	0 %	2,9 %

Примітка. *Середнє арифметичне ± стандартне відхилення, діапазон споживання наведено в дужках
Note. *Arithmetic mean ± standard deviation, the range of consumption rates is given in parentheses

живає в населеному пункті (вказаному в медичній карті) та споживає молоко, молочні продукти і листові овочі на референтному рівні, характерному для її віку та статі; вважалося, що особа не приймала препарати стабільного йоду.

► Дози $CTBD25_{Qx}$, розраховані за методологією TDU20 з урахуванням даних дозиметричної анкети щодо історії проживання та харчування, а також вживання препаратів стабільного йоду.

Щодо історії проживання, то 24 з 68 осіб (35,3 % від загальної кількості) повідомили про зміну місця проживання (переїзд), тоді як 6 з 68 осіб (8,8 % від загальної кількості) повідомили про два переїзди. Згідно з анкетними даними, частка споживачів молока була нижчою, ніж припускається в TDU20: 60,3 % проти 88,2 % для коров'ячого молока з приватних господарств, та 36,8 % проти 88,2 % для молока з торгової мережі. Середнє споживання молока, про яке повідомлялося під час особистих інтерв'ю, було вищим, ніж середнє значення, прийняте в TDU20: 0,28 л/доба проти 0,31 л/доба та 0,14 л/доба проти 0,10 л/доба для домашнього коров'ячого молока, та молока з торгової мережі відповідно. Згідно з TDU20, на грудному вигодовуванні було 4 особи віком до 1 року на момент аварії, проте під час особистих інтерв'ю про грудне вигодовування цих осіб не повідомлялося. Частка осіб, які повідомили про споживання молочних продуктів та листових овочів, була нижчою, ніж припускається в TDU20: 61,8 % проти 88,2 % та 55,9 % проти 88,2 % відповідно. У TDU20 вважається, що особа без дозиметричного інтерв'ю не приймала препарати стабільного йоду для блокування поглинання радіоактивного йоду ЩЗ. Однак, двоє з 68 осіб (2,9 % від загальної кількості) повідомили, що приймали стабільний йод протягом першого місяця після аварії.

На рис. 4 порівнюються дві оцінки доз, розраховані за методиками $CTBD25_{No}$ та $CTBD25_{Qx}$, для 68 осіб з дозиметричних груп 2, 3 та 4, які були опитані. Дози $CTBD25_{Qx}$ виявилися нижчими, ніж дози $CTBD25_{No}$: 105 мГр проти 150 мГр для середнього арифметичного та 46 мГр проти 98 мГр для медіани. Подібне суттєве зниження доз опромінення ЩЗ, розрахованих з використанням даних дозиметричної анкети ($CTBD25_{Qx}$) порівняно з тими, що були розраховані без таких даних ($CTBD25_{No}$) спостерігалось в попередньому дослідженні [11].

У таблиці 7 наведено причини відмінності дози $CTBD25_{Qx}$ від дози $CTBD25_{No}$ для вибірки з 10 осіб зі значною різницею між цими двома дозами. Врахування історії проживання призвело головним чином до

permanent residence in the settlement of residence ATA and reference age- and gender-dependent consumption rates of milk, dairy products and leafy vegetables; stable iodine administration was not considered; and

► $CTBD25_{Qx}$ doses that were calculated using TDU20 and individual questionnaire data on residence and diet history and stable iodine administration.

Regarding residential history, 24 out of 68 individuals (35.3 % of the total) reported relocation from the place of residence ATA, while 6 out of 68 individuals (8.8 % of the total) reported two relocations. According to the questionnaire data, the fraction of consumers of milk was lower than that established in TDU20, 60.3 % vs. 88.2 % and 36.8 % vs. 88.2 %, for milk from privately owned cows and from commercial trade network, respectively. However, the arithmetic mean of consumption rates of milk reported during personal interviews was higher than that established in TDU20, 0.28 L · d⁻¹ vs. 0.31 L · d⁻¹ and 0.14 L · d⁻¹ vs. 0.10 L · d⁻¹, for milk from privately owned cows and from commercial trade networks, respectively. According to TDU20, breastfeeding was assumed for all 4 individuals aged less than 1 y ATA; however, breastfeeding of these persons was not reported during personal interviews. The fraction of individuals reporting consumption of dairy products and leafy vegetables was lower than that assigned in TDU20, 61.8 % vs. 88.2 % and 55.9 % vs. 88.2 %, respectively. TDU20 did not account for the administration of stable iodine to block the uptake of radioactive iodine by the thyroid gland. However, two out of 68 individuals (2.9 % of the total) reported having taken stable iodine during the first month after the accident.

Fig. 4 compares the two sets of doses, $CTBD25_{No}$ and $CTBD25_{Qx}$, for 68 individuals from CTB groups 2, 3, and 4 who were interviewed in the study. $CTBD25_{Qx}$ doses were found to be lower than $CTBD25_{No}$ doses, 105 mGy vs. 150 mGy for the arithmetic mean and 46 mGy vs. 98 mGy for the median, respectively. The similar substantial reduction in thyroid doses calculated using individual questionnaire data, $CTBD25_{Qx}$, compared to those calculated without questionnaire data, $CTBD25_{No}$, was observed in the previous study [11].

Table 7 summarizes the reasons for differences between $CTBD25_{Qx}$ and $CTBD25_{No}$ dose estimates for a sample of 10 individuals with notable discrepancies. Incorporation of residential history data

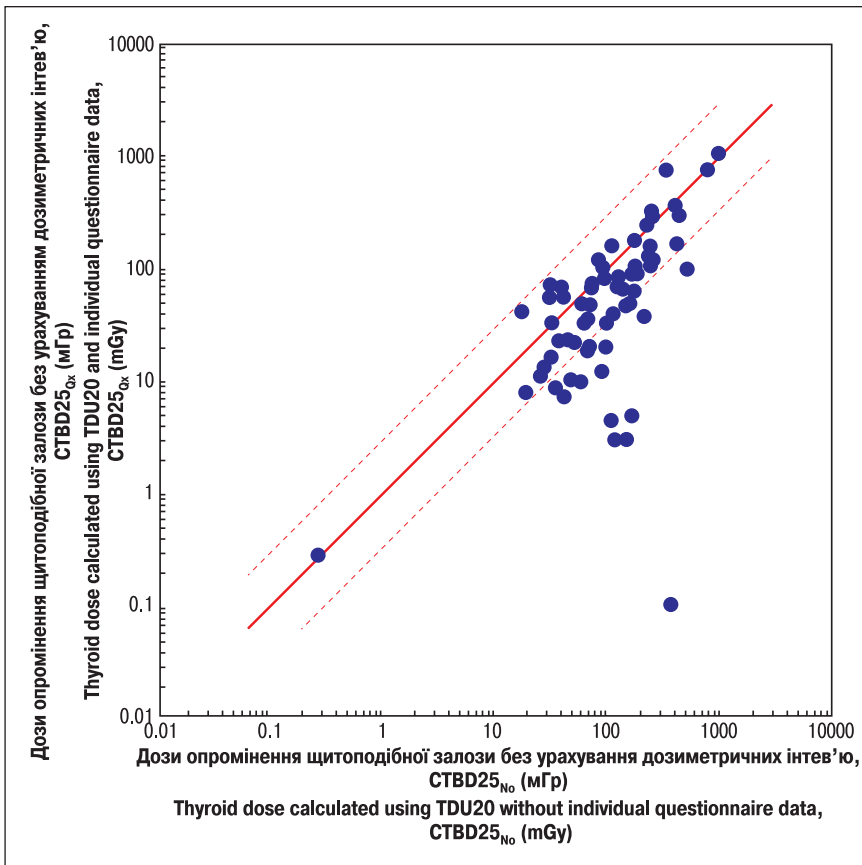


Рисунок 4. Порівняння двох наборів доз (CTBD25_{No} та CTBD25_{Qx}) для 68 осіб з дозиметричних груп 2, 3 та 4, які були опитані в дослідженні. Суцільна лінія вказує на узгодженість між дозами, а пунктирні лінії вказують на різницю в 3 рази.

Figure 4. Comparison of two sets of doses, CTBD25_{No} and CTBD25_{Qx}, for 68 individuals from CTB groups 2, 3, and 4 who were interviewed in the study. Solid line indicates agreement between doses, while dashed lines indicate a factor of 3 difference.

зменшення індивідуальної дози, оскільки з'явилася інформація (зібрана шляхом особистого інтерв'ю) щодо евакуації або переселення особи з високозабрудненого населеного пункту до низькозабрудненого або незабрудненого регіону (особи А, В, С, і F). Врахування даних анамнезу харчування призвело до збільшення або зменшення індивідуальних значень доз залежно від того, наскільки походження молока та рівня його споживання відрізнялися від тих, що використовувалися в попередній моделі реконструкції дози (особи D, E, G, H, і J). Прийом препарату стабільного йоду через два дні після аварії разом зі значно меншим споживанням молока, ніж вважалося раніше, спричинив майже 25-кратне зниження дози опромінення ЩЗ від надходження ¹³¹I.

Невизначеності доз

Для кожного учасника дослідження було розраховано набори з 1000 *індивідуальних стохастичних* доз опромінення ЩЗ від надходження ¹³¹I. Виявлено, що розподіл *індивідуальних стохастичних* доз для кожної особи є приблизно логнормальним, і геометричне стандартне відхилення (GSD) цього розподілу було використано для характеристики загальної невизначеності дози опромінення ЩЗ кожної особи. Для доз, розрахованих за методологією CTBD25, GSD коливався від 1,3 до 6,1 із середнім (арифметичним) значенням для всіх учасників дослідження 3,1 та медіаною 3,3. Як і очікувалося, най-

primarily reduced individual doses, as personal interviews revealed evacuations or relocations from highly contaminated settlements of residence ATA to less or non-contaminated areas (subjects A, B, C, and F). Inclusion of dietary history data produced both increases and decreases in dose values, depending on whether reported milk origin and consumption patterns at ATA differed from assumptions used in previous dose reconstructions (subjects D, E, G, H, and J). For subject I, reported intake of stable iodine two days after the accident combined with substantially lower milk consumption led to an almost 25-fold reduction in thyroid dose from ¹³¹I intake.

Uncertainties in doses

Sets of multiple 1,000 *individual stochastic* doses from ¹³¹I intake were calculated for each study participant. The fitted distribution of *individual stochastic* doses for each individual was found to be approximately lognormal and the geometric standard deviation (GSD) of that distribution was used to characterize the overall uncertainty for every individual studied. For CTBD25, the GSD ranged from 1.3 to 6.1 with an overall arithmetic mean of 3.1 and a median of 3.3 across all study participants. As expected, the highest

Таблиця 7
Причини розбіжності в дозі опромінення ЩЗ від надходження ¹³¹I (доза СТВД25_{оx} порівнюються з дозою СТВД25_{no}) для 10 осіб зі значною різницею між дозами

Особа	Доза опромінення щитоподібної залози від надходження ¹³¹ I (мГр)			Причина розбіжності в дозі*	Щільність забруднення ґрунту ¹³¹ I** (МБк·м ⁻²) у місці проживання на момент аварії що було використано для розрахунку		Споживання молока* та молочних продуктів (л/доба), яке було використано для розрахунку	
	СТВД25 _{no}	СТВД25 _{оx}	Різниця		СТВД25 _{no}	СТВД25 _{оx}	СТВД25 _{no}	СТВД25 _{оx}
A	518	97	-421	Місце проживання та дієта	88	88 (евакуйовано 28 квітня)	0,30	0,014
B	371	0.1	-370,9	Місце проживання	2,1	0 (перебував за межами України)	0,80**	0,80**
C	208	0	-208	Місце проживання	0,45	0 (перебував за межами України)	0,54	0,13
D	212	37	-175	Дієта	0,08	0,08	0,70	0,14
E	163	4.8	-158,2	Дієта	0,45	0,25	0,54	0,01
F	148	3.0	-145	Місце проживання	88	88 (евакуйовано 28 квітня)	0,41	0
G	238	109	129	Дієта	0,25	0,25	0,54	0,35
H	115	3.0	-112	Дієта	0,30	0,30	0,58	0
I	105	4.4	-100,6	Дієта та інше†	0,45	0,48	0,36	0,03
J	331	741	+410	Дієта	2,1	2,1	0,37	0,50

Примітки. *«Дієта» означає інформацію про історію харчування, а «Місце проживання» – про історію проживання з 26 квітня по 14 липня 1986 року, зібрану шляхом персонального дозиметричного інтерв'ю у цьому дослідженні
**Згідно з [7]

#Коров'яче молоко, якщо не зазначено інше

##Грудне молоко

†Прийом препаратів стабільного йоду 28 квітня 1986 року.

Table 7
Reasons for the changes in doses from ¹³¹I intake, CTBD25_{No} doses compared to CTBD25_{No} doses, for 10 individuals with a notable difference between the two doses

Subject	Thyroid dose from ¹³¹ I intake (mGy)		Reason for difference*	¹³¹ I ground deposition density** (MBq·m ⁻²) at residence ATA that was used to calculate			Milk# and dairy products consumption (L·d ⁻¹) ATA that was used to calculate
	CTBD25 _{No}	CTBD25 _{No} Difference		CTBD25 _{No}	CTBD25 _{No}	CTBD25 _{No}	
A	518	97 -421	Residence and diet	88	88 (evacuated on 28 April)	0,30	0,014
B	371	0.1 -370,9	Residence	2,1	0 (was outside Ukraine)	0,80##	0,80##
C	208	0 -208	Residence	0,45	0 (was outside Ukraine)	0,54	0,13
D	212	37 -175	Diet	0,08	0,08	0,70	0,14
E	163	4.8 -158,2	Diet	0,45	0,25	0,54	0,01
F	148	3.0 -145	Residence	88	88 (evacuated on 28 April)	0,41	0
G	238	109 129	Diet	0,25	0,25	0,54	0,35
H	115	3.0 -112	Diet	0,30	0,30	0,58	0
I	105	4.4 -100,6	Diet and other†	0,45	0,48	0,36	0,03
J	331	741 +410	Diet	2,1	2,1	0,37	0,50

Notes. **Diet* refers to the diet history data and 'Residence' refers to the residence history data on 28 April – 14 July 1986 that were collected during the personal dosimetry interviews conducted during this study
***According to [7]
#Cow's milk unless otherwise indicated
##Breast milk
†Stable iodine administration on 28 April 1986



вищі GSD були пов'язані з дозами, розрахованими для осіб, які не мали виміру активності ^{131}I у ЩЗ, тобто осіб, які відносяться до дозиметричних груп 3 та 4. Для цих осіб GSD коливалася від 2,6 до 6,1, середнє складає 3,5, а медіана – 3,4. Найнижчі значення GSD були пов'язані з дозами, розрахованими для 26 осіб з дозиметричних груп 1 та 2, у яких активність ^{131}I у ЩЗ була виміряна в перші місяці після аварії (середнє значення GSD становить 1,4, медіана – 1,4, діапазон значень коливається від 1,3 до 1,6). Індивідуальні значення GSD для учасників дослідження з дозиметричної групи 4 виявилися досить високими (середнє значення GSD становить 3,9, медіана – 3,8, діапазон значень коливається від 3,4 до 4,5) через те, що у розрахунок 1000 *індивідуальних стохастичних* доз ЩЗ осіб, опромінених внутрішньоутробно, додаються нові джерела невизначеності, такі як співвідношення між дозою опромінення ЩЗ матері та плоду і термін вагітності на момент аварії [17].

Переваги та обмеження дослідження

Сильною стороною цього дослідження є використання оновленої системи дозиметрії ЩЗ TDU20. Ще однією перевагою є врахування анамнезу проживання та харчування більшості учасників дослідження (112 зі 140, тобто 80 % від загальної кількості) при реконструкції доз опромінення ЩЗ.

Однак це дослідження також має певні обмеження:

1. Достовірність інформації, зібраної у 2024–2025 роках (тобто майже через 40 років після аварії) шляхом персональних дозиметричних інтерв'ю, може бути низькою через погану пам'ять респондента. Однак, як було показано в білорусько-американських дослідженнях осіб, які зазнали опромінення в дитячому та підлітковому віці, а також внутрішньоутробно, спогади учасників дослідження або їхніх матерів про історію проживання є досить надійними (відтворюваність цієї інформації становить 88–92 %), тоді як спогади про споживання молока та молочних продуктів були дещо гіршими (відтворюваність спогадів 55–80 %) [33, 34].
2. Відсутність інформації про місце проживання та раціон харчування 28 учасників дослідження, з якими не було проведено інтерв'ю (рис. 1). Оскільки для цих осіб було неможливо оцінити індивідуальні дози опромінення ЩЗ, то дози для них розраховувалися як середні дози в населеному пункті проживання (вказаному у медичній карті) для даного віку та статі. Різниця між припущеннями, що були прийняті в даному дослідженні щодо проживання та харчування (постійне місце проживання особи і середній для даного віку та статі рівень споживання молока та молокопродуктів), і «справжнім», але невідомим анамнезом про-

GSDs were associated with the doses calculated for individuals who were not measured, i.e., CTB dosimetry groups 3 and 4, where the GSD ranged from 2.6 to 6.1 with a mean of 3.5 and a median of 3.4. The lowest GSDs were associated with the CTBD25 doses from ^{131}I intake calculated for 26 individuals from CTB dosimetry groups 1 and 2 who were measured for ^{131}I thyroid activity (mean GSD=1.4, median GSD=1.4, GSD range from 1.3 to 1.6). Individual GSD-values for study participants from the CTB dosimetry group 4 were found to be rather high (mean GSD=3.9, median GSD=3.8, GSD range from 3.4 to 4.5) due to the inclusion of new sources of errors in the calculation of 1,000 *individual stochastic* doses for individuals exposed in utero, such as those for the fetal thyroid dose coefficient and gestation age ATA [17].

Strengths and limitations of the present study

The strength of the present study is the use of the revised TDU20 thyroid dosimetry system. Another strength of the study is the use of individual data of residence and diet history to calculate thyroid doses from ^{131}I intake for most study participants (112 out of 140, 80.0 % of the total). However, several limitations of this study should be acknowledged:

1. Recall bias in interview data. The reliability of information collected in 2024–2025, nearly 40 years after the accident, may be affected by memory limitations of respondents during personal dosimetry interviews. Nevertheless, prior validation in the Belarusian-American cohort of individuals exposed during childhood and adolescence and the Belarusian cohort of persons exposed in utero demonstrated that recall of residential history by participants or their mothers is generally reliable, with reproducibility of 88–92 %, while recall of milk and dairy product consumption was somewhat lower, with reproducibility of 55–80 % [33, 34].
2. Incomplete interview coverage. Residential and dietary history data were unavailable for 28 participants who were not interviewed (Fig. 1). For these individuals, thyroid doses could only be estimated as age- and sex-averaged model-based values for their settlement of residence. As demonstrated in the present study, discrepancies between assumed data (permanent residence and averaged dietary rates) and the 'true'

живання та харчування для осіб без дозиметричних інтерв'ю, може призвести до суттєвого завищення або заниження доз опромінення ЩЗ, що й було продемонстровано в даному дослідженні.

ВИСНОВКИ

У цій статті представлені покращені оцінки доз опромінення щитоподібної залози зареєстрованих у СТБ осіб, які беруть участь у поточному дослідженні геномного ландшафту фолікулярних карцином і фолікулярних аденом щитоподібної залози. Дози розраховані за оновленою методологією з урахуванням індивідуальної історії проживання та харчування. Хоча дослідження базувалось на досить обмеженій вибірці зареєстрованих у СТБ осіб (140 з приблизно 4300 або 3,3 % від загальної кількості), воно чітко показало, що використання результатів індивідуальних інтерв'ю має помітний вплив на оцінку дози опромінення щитоподібної залози, зокрема це стосується тих осіб з СТБ, які потрапили до дозиметричних груп 2, 3 та 4. Ці дозиметричні групи включають понад 90 % осіб, які наразі беруть участь у дослідженні. Тому під час проведення досліджень, спрямованих на з'ясування можливих зв'язків між дозою опромінення щитоподібної залози та важливими демографічними, клінічними, патологічними, молекулярно-генетичними показниками, необхідно проводити персональні дозиметричні інтерв'ю для збору даних про історію проживання та харчування учасників дослідження. Це дозволяє отримати більш точні оцінки індивідуальних доз, ніж без проведення такого інтерв'ювання.

Вдячність

Автори висловлюють щирі вдячності покійному Іллі Ліхтарову за внесок у розвиток дозиметрії щитоподібної залози, а також відзначають цінний внесок Андре Бувіля та Ліни Ковган у дозиметрію ЩЗ зареєстрованих у СТБ осіб.

Фінансування

Ця робота була підтримана програмою внутрішніх досліджень відділу епідеміології та генетики раку Національного інституту раку Національного інституту здоров'я США (NCI) шляхом контракту 75N91024D00012 / 75N91024F00003 між NCI та Українським науково-технологічним центром (УНТЦ) та Національною академією медичних наук України, шляхом фінансування НДР (номери державної реєстрації: № 0125U001228 та № 0125U001235).

but unknown data for these individuals without personal interviews can result in substantial over- or underestimation of model-based thyroid doses.

CONCLUSIONS

This study provides improved estimates of thyroid doses for CTB participants, obtained using revised dosimetry methodologies and individual residential and dietary histories, in support of an ongoing study of the genomic landscape of follicular thyroid carcinomas and adenomas. Although the study included a relatively small subset of Ukrainians enrolled in the CTB (140 of approximately 4,300 participants, or 3.3 %), the findings clearly demonstrate that inclusion of questionnaire data in dose assessments influenced individual thyroid dose estimates, particularly for members of dosimetry groups 2, 3, and 4. Notably, these groups comprise more than 90 % of the entire CTB. The results therefore underscore the importance of conducting personal dosimetry interviews when undertaking special studies to explore associations between thyroid dose and demographic, clinical, pathological, or molecular-genetic indicators. Such interviews enable the generation of accurate individual dose estimates compared with reconstructions that omit this information.

Acknowledgement

The authors would like to acknowledge gratefully the contributions of the late Ilya Likhtarov to the development of the thyroid dosimetry system for the CTB. They also would like to acknowledge the valuable contributions of Andre Bouville and Lionella Kovgan to the dosimetry of the CTB.

Funding

This work was supported by the Intramural Research Program of the National Institutes of Health (NIH) (USA) through contract 75N91024D00012 / 75N91024F00003 between NCI and the Science and Technology Center in Ukraine (STCU, Kyiv, Ukraine) and by the National Academy of Medical Sciences of Ukraine, state registrations #0125U001228 and #0125U001235.

Дотримання етичних стандартів

Автори заявляють, що ця робота була виконана за відсутності будь-якого особистого, професійного чи фінансового конфлікту інтересів.

Застереження

Внесок авторів з Національного інституту здоров'я США (NIH) був зроблений у рамках виконання їхніх офіційних обов'язків як федеральних співробітників NIH, відповідає політиці установи та вважається роботою уряду США. Однак результати та висновки, представлені в цій статті, належать авторам і не обов'язково відображають погляди NIH або Міністерства охорони здоров'я та соціальних служб США.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation, UNSCEAR 2008 Report. Annex D: Health effects due to radiation from the Chernobyl accident. Sales No. E.11.IX.3. New York: United Nations, 2011.
2. Chernobyl tumor bank / G. A. Thomas, E. D. Williams, D. V. Becker et al. *Thyroid*. 2020. Vol. 10, no. 12. P. 1126-7. DOI: <https://doi.org/10.1089/thy.2000.10.1126a>
3. Reconstruction of individual thyroid doses to the Ukrainian subjects enrolled in the Chernobyl Tissue Bank / I. Likhtarov, G. Thomas, L. Kovgan et al. *Radiat. Prot. Dosim.* 2013. Vol. 156. P. 4112407-4112423. DOI: <https://doi.org/10.1093/rpd/nct096>
4. Thyroid doses in Ukraine due to ^{131}I intake after the Chernobyl accident. Report I: revision of direct thyroid measurements / S. Masiuk, M. Chepurny, V. Buderatska et al. *Radiat. Environ. Biophys.* 2021. Vol. 60, no. 2. P. 267-288. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00411-021-00896-9>
5. Thyroid doses in Ukraine due to ^{131}I intake after the Chernobyl accident. Report II: dose estimates for the Ukrainian population / S. Masiuk, M. Chepurny, V. Buderatska et al. *Radiat. Environ. Biophys.* 2021. Vol. 60, no. 4. P. 591-609. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00411-021-00930-w>
6. Estimating thyroid masses for children, infants and fetuses in Ukraine exposed to ^{131}I from the Chernobyl accident / I. Likhtarov, L. Kovgan, S. Masiuk et al. *Health Phys.* 2013. Vol. 104, no. 1. P. 78-86. DOI: <https://doi.org/10.1097/HP.0b013e31826e188e>
7. Reconstruction of radioactive contamination of the territory of Ukraine by Iodine-131 in the initial period of the Chernobyl accident using the results from numerical WRF model / M. M. Talerko, T. D. Lev, V. V. Drozdovitch, S. V. Masiuk. *Probl. Radiac. Med. Radiobiol.* 2020. Vol. 25. P. 285-299. DOI: <https://doi.org/10.33145/2304-8336-2020-25-285-299>
8. Radiation-related genomic profile of papillary thyroid carcinoma after the Chernobyl accident / L. M. Morton, D. M. Karyadi, C. Stewart et al. *Science*. 2021. Vol. 372, no. 6543. P. eabg2538. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.abg2538>

Compliance with ethical standards

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

Disclaimer

The contributions of the NIH authors were made as part of their official duties as NIH federal employees, are in compliance with agency policy requirements, and are considered Works of the United States Government. However, the findings and conclusions presented in this paper are those of the authors and do not necessarily reflect the views of the NIH or the U.S. Department of Health and Human Services.

REFERENCES

1. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation, UNSCEAR 2008 Report. Annex D: Health effects due to radiation from the Chernobyl accident. Sales No. E.11.IX.3. New York: United Nations; 2011.
2. Thomas GA, Williams ED, Becker DV, Bogdanova TI, Demidchik EP, Lushnikov E, et al. Chernobyl tumor bank. *Thyroid*. 2020;10(12): 1126-1127. doi: <https://doi.org/10.1089/thy.2000.10.1126a>
3. Likhtarov I, Thomas G, Kovgan L, Masiuk S, Chepurny M, Ivanova O, et al. Reconstruction of individual thyroid doses to the Ukrainian subjects enrolled in the Chernobyl Tissue Bank. *Radiat Prot Dosim.* 2013;156(4):407-423. doi: <https://doi.org/10.1093/rpd/nct096>
4. Masiuk S, Chepurny M, Buderatska V, Kukush A, Shklyar S, Ivanova O, et al. Thyroid doses in Ukraine due to ^{131}I intake after the Chernobyl accident. Report I: revision of direct thyroid measurements. *Radiat Environ Biophys.* 2021;60(2):267-288. doi: <https://doi.org/10.1007/s00411-021-00896-9>
5. Masiuk S, Chepurny M, Buderatska V, Ivanova O, Boiko Z, Zhadan N, et al. Thyroid doses in Ukraine due to ^{131}I intake after the Chernobyl accident. Report II: dose estimates for the Ukrainian population. *Radiat Environ Biophys.* 2021;60(4):591-609. doi: <https://doi.org/10.1007/s00411-021-00930-w>
6. Likhtarov I, Kovgan L, Masiuk S, Chepurny M, Ivanova O, Gerasymenko V, et al. Estimating thyroid masses for children, infants and fetuses in Ukraine exposed to ^{131}I from the Chernobyl accident. *Health Phys.* 2013; 104(1):78-86. doi: <https://doi.org/10.1097/HP.0b013e31826e188e>
7. Talerko MM, Lev TD, Drozdovitch W, Masiuk SV. Reconstruction of radioactive contamination of the territory of Ukraine by Iodine-131 in the initial period of the Chernobyl accident using the results from numerical WRF model. *Probl Radiac Med Radiobiol.* 2020;25:285-299. doi: <https://doi.org/10.33145/2304-8336-2020-25-285-299>
8. Morton LM, Karyadi DM, Stewart C, Bogdanova TI, Dawson ET, Steinberg MK, et al. Radiation-related genomic profile of papillary thyroid carcinoma after the Chernobyl accident. *Science*.

9. Genomic characterization of cervical lymph node metastases in papillary thyroid carcinoma following the Chernobyl accident / L. M. Morton, O. W. Lee, D. M. Karyadi et al. *Nat. Commun.* 2024. Vol. 15, no. 1. P. 5053. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-024-49292-z>
10. Distinctive molecular features of radiation-induced thyroid cancers / D. M. Karyadi, T. I. Bogdanova, C. M. Milder et al. *Sci. Adv.* 2025. Vol. 11, no. 34. P. eadw7680. DOI: <https://doi.org/10.1126/sciadv.adw7680>
11. Thyroid doses for Chernobyl Tissue Bank: improved estimates based on revised methodology and individual residence and diet history / S. Masiuk, M. Chepurny, V. Buderatska et al. *Radiat. Environ. Biophys.* 2025. Vol. 64, no. 1. P. 85-98. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00411-024-01099-8>
12. Thyroid cancer study among Ukrainian children exposed to radiation after the Chernobyl accident: Improved estimates of the thyroid doses to the cohort members / I. Likhtarev, L. Kovgan, S. Masiuk et al. *Health Phys.* 2014. Vol. 106, no. 3. P. 370-396. DOI: <https://doi.org/10.1097/HP.0b013e31829f3096>
13. Estimation of the thyroid doses for Ukrainian children exposed *in utero* after the Chernobyl accident / I. Likhtarov, L. Kovgan, M. Chepurny et al. *Health Phys.* 2011. Vol. 100, no. 6. P. 583-93. DOI: <https://doi.org/10.1097/HP.0b013e3181ff391a>
14. Mowlavi A. A., Fornasier M. R., de Denaro M. Thyroid volume's influence on energy deposition from (131)I calculated by Monte Carlo (MC) simulation. *Radiol. Oncol.* 2011. Vol. 45, no. 2. P. 143-6. DOI: <https://doi.org/10.2478/v10019-011-0008-5>
15. Internal exposure to the thyroid from intake of radioiodine isotopes after the Chernobyl accident. Report I: revised doses and associated uncertainties for the Ukrainian-American cohort of persons exposed during childhood and adolescence / S. Masiuk, M. Chepurny, V. Buderatska et al. *Radiat. Res.* 2023. Vol. 199, no. 1. P. 61-73. DOI: <https://doi.org/10.1667/RADE-21-00152.1>
16. International Commission on Radiological Protection. Doses to the embryo and fetus from intakes of radionuclides by the mother. ICRP Publication 88. *Ann. ICRP.* 2001. Vol. 31, no. 1-3.
17. Assessment of internal exposure to 131I and short-lived radioiodine isotopes and associated uncertainties in the Ukrainian cohort of persons exposed *in utero* / S. Masiuk, M. Chepurny, V. Buderatska et al. *J. Radiat. Res.* 2022. Vol. 63, no. 3. P. 364-377. DOI: <https://doi.org/10.1093/jrr/rrac007>
18. Contribution of short-lived radioiodines to thyroid doses received by evacuees from the Chernobyl area estimated using early *in vivo* activity measurements / M. Balonov, G. Kaidanovsky, I. Zvonova et al. *Radiat. Prot. Dosim.* 2003. Vol. 105, no. 1-4. P. 593-99. DOI: <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a006309>
19. Individual thyroid dose estimation for a case-control study of Chernobyl-related thyroid cancer among children of Belarus-part I: ¹³¹I, short-lived radioiodines (¹³²I, ¹³³I, ¹³⁵I), and short-lived radiotelluriums (^{131m}Te and ¹³²Te) / Y. Gavrilin, V. Khrouch, S. Shinkarev et al. 2021;372(6543):eabg2538. doi: <https://doi.org/10.1126/science.abg2538>
9. 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: <https://doi.org/10.1038/s41467-024-49292-z>
10. Karyadi DM, Bogdanova TI, Milder CM, Hartley SW, Lee OW, Dean M, et al. Distinctive molecular features of radiation-induced thyroid cancers. *Sci Adv.* 2025;11(34):eadw7680. doi: <https://doi.org/10.1126/sciadv.adw7680>
11. Masiuk S, Chepurny M, Buderatska V, Ivanova O, Boiko Z, Zhadan N, et al. Thyroid doses for Chernobyl Tissue Bank: improved estimates based on revised methodology and individual residence and diet history. *Radiat Environ Biophys.* 2025;64(1):85-98. doi: <https://doi.org/10.1007/s00411-024-01099-8>
12. Likhtarev I, Kovgan L, Masiuk S, Talerko M, Chepurny M, Ivanova O, et al. Thyroid cancer study among Ukrainian children exposed to radiation after the Chernobyl accident: Improved estimates of the thyroid doses to the cohort members. *Health Phys.* 2014;106(3):370-96. doi: <https://doi.org/10.1097/HP.0b013e31829f3096>
13. Likhtarov I, Kovgan L, Chepurny M, Ivanova O, Boyko Z, Ratia G, et al. Estimation of the thyroid doses for Ukrainian children exposed *in utero* after the Chernobyl accident. *Health Phys.* 2011;100(6):583-593. doi: <https://doi.org/10.1097/HP.0b013e3181ff391a>
14. Mowlavi AA, Fornasier MR, de Denaro M. Thyroid volume's influence on energy deposition from (131)I calculated by Monte Carlo (MC) simulation. *Radiol Oncol.* 2011;45(2):143-146. doi: <https://doi.org/10.2478/v10019-011-0008-5>
15. Masiuk S, Chepurny M, Buderatska V, Ivanova O, Boiko Z, Zhadan N, et al. Internal exposure to the thyroid from intake of radioiodine isotopes after the Chernobyl accident. Report I: revised doses and associated uncertainties for the Ukrainian-American cohort of persons exposed during childhood and adolescence. *Radiat Res.* 2023; 199(1):61-73. doi: <https://doi.org/10.1667/RADE-21-00152.1>
16. International Commission on Radiological Protection. Doses to the embryo and fetus from intakes of radionuclides by the mother. ICRP Publication 88. *Ann ICRP.* 2001;31(1-3).
17. Masiuk S, Chepurny M, Buderatska V, Ivanova O, Boiko Z, Zhadan N, et al. Assessment of internal exposure to 131I and short-lived radioiodine isotopes and associated uncertainties in the Ukrainian cohort of persons exposed *in utero*. *J Radiat Res.* 2022;63(3):364-377. doi: <https://doi.org/10.1093/jrr/rrac007>
18. Balonov M, Kaidanovsky G, Zvonova I, Kovtun A, Bouville A, Luckyanov N, et al. Contribution of short-lived radioiodines to thyroid doses received by evacuees from the Chernobyl area estimated using early *in vivo* activity measurements. *Radiat Prot Dosim.* 2003;105(1-4): 593-99. doi: <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a006309>
19. Gavrilin Y, Khrouch V, Shinkarev S, Drozdovitch V, Minenko V, Shemiakina E, et al. Individual thyroid dose estimation for a case-control study of Chernobyl-related thyroid cancer among children of

- Health Phys.* 2004. Vol. 86, no. 6. P. 565-585. DOI: <https://doi.org/10.1097/00004032-200406000-00002>
20. Chernobyl accident: retrospective and prospective estimates of external dose of the population of Ukraine / I. A. Likhtarev, L. N. Kovgan, P. Jacob, L. R. Anspaugh. *Health Phys.* 2002. Vol. 82, no. 3. P. 290-303. DOI: <https://doi.org/10.1097/00004032-200203000-00002>
21. A consistent radionuclide vector after the Chernobyl accident / K. Muck, G. Prohl, I. Likhtarev et al. *Health Phys.* 2002. Vol. 82, no. 2. P. 141-156. DOI: <https://doi.org/10.1097/00004032-200202000-00002>
22. Review of Russian language studies on radionuclide behaviour in agricultural animals: part 2. Transfer to milk / S. Fesenko, B. J. Howard, N. Isamov et al. *J. Environ. Radioact.* 2007. Vol. 98, no. 1-2. P. 104-136. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2007.06.007>
23. Garner R. J. A mathematical analysis of the transfer of fission products to cows' milk. *Health Phys.* 1967. Vol. 13, no. 2. P. 205-212. DOI: <https://doi.org/10.1097/00004032-196702000-00010>
24. International Commission on Radiological Protection. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 2. Ingestion dose coefficients. ICRP Publication 67. *Ann. ICRP.* 1993. Vol. 23, no. 3-4. P. 151-154.
25. International Commission on Radiological Protection. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 4. Inhalation dose coefficients. ICRP Publication 71. *Ann. ICRP.* 1995. Vol. 25, no. 3-4. P. 178-232.
26. Ivanova O. M., Kovgan L. M., Masiuk S. V. Methodology of reconstruction of individualized exposure doses for persons residing at radioactively contaminated territories of Ukraine. *Probl. Radiac. Med. Radiobiol.* 2018. Vol. 23. P. 164-87. DOI: <https://doi.org/10.33145/2304-8336-2018-23-164-187>
27. Eckerman K. F., Ryman J. C. External exposures to radionuclides in air, water, and soil. Federal Guidance Report No 12. EPA US. Washington DC; 1993.
28. ICRP Publication 144: Dose coefficients for external exposures to environmental sources / N. Petoussi-Henss, D. Satoh, A. Endo et al. *Ann. ICRP* 2020. Vol. 49, no. 2. P. 11-145. DOI: <https://doi.org/10.1177/0146645320906277>
29. Methodology of reconstruction of internal doses from ^{137}Cs and ^{134}Cs of residents of radioactively contaminated settlements in Ukraine not covered by WBC monitoring / O. M. Ivanova, M. I. Chepurny, S. V. Masiuk et al. *Probl. Radiac. Med. Radiobiol.* 2024. Vol. 29. P. 115-151. DOI: <https://doi.org/10.33145/2304-8336-2024-29-115-151>
30. Estimation of radiation risk in presence of classical additive and Berkson multiplicative errors in exposure doses / S. V. Masiuk, S. V. Shklyar, A. G. Kukush et al. *Biostatistics* 2016. Vol. 17:422-36. DOI: <https://doi.org/10.1093/biostatistics/kxv052>
31. Radiation risk estimation: Based on measurement error models / S. V. Masiuk, A. G. Kukush, S. V. Shklyar et al. De Gruyter Series Belarus-part I: ^{131}I , short-lived radioiodines (^{132}I , ^{133}I , ^{135}I), and short-lived radiotelluriums ($^{131\text{m}}\text{Te}$ and ^{132}Te). *Health Phys.* 2004; 86(6): 565-585. doi: <https://doi.org/10.1097/00004032-200406000-00002>
20. Likhtarev IA, Kovgan LN, Jacob P, Anspaugh LR. Chernobyl accident: retrospective and prospective estimates of external dose of the population of Ukraine. *Health Phys.* 2002;82(3):290-303. doi: <https://doi.org/10.1097/00004032-200203000-00002>
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):141-156. doi: <https://doi.org/10.1097/00004032-200202000-00002>
22. Fesenko S, Howard BJ, Isamov N, Voigt G, Beresford NA, Sanzhárova N, Barnett CL. Review of Russian language studies on radionuclide behaviour in agricultural animals: part 2. Transfer to milk. *J Environ Radioact.* 2007;98(1-2):104-136. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2007.06.007>
23. Garner RJ. A mathematical analysis of the transfer of fission products to cows' milk. *Health Phys.* 1967;13(2):205-212. doi: <https://doi.org/10.1097/00004032-196702000-00010>
24. International Commission on Radiological Protection. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 2. Ingestion dose coefficients. ICRP Publication 67. *Ann ICRP.* 1993;23(3-4):151-154.
25. International Commission on Radiological Protection. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 4. Inhalation dose coefficients. ICRP Publication 71. *Ann ICRP.* 1995;25(3-4):178-232.
26. 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;23:164-187. doi: <https://doi.org/10.33145/2304-8336-2018-23-164-187>
27. Eckerman KF, Ryman JC. External exposures to radionuclides in air, water, and soil. Federal Guidance Report No 12. EPA US. Washington DC; 1993.
28. Petoussi-Henss N, Satoh D, Endo A, Eckerman KF, Bolch WE, Hunt J, et al. ICRP Publication 144: Dose coefficients for external exposures to environmental sources. *Ann ICRP.* 2020;49(2):11-145. doi: <https://doi.org/10.1177/0146645320906277>
29. Ivanova OM, Chepurny MI, Masiuk SV, Vasylenko W, Kuriata MS, Buderatska VB, et al. Methodology of reconstruction of internal doses from ^{137}Cs and ^{134}Cs of residents of radioactively contaminated settlements in Ukraine not covered by WBC monitoring. *Probl Radiac Med Radiobiol.* 2024;29:115-151. doi: <https://doi.org/10.33145/2304-8336-2024-29-115-151>
30. Masiuk SV, Shklyar SV, Kukush AG, Carroll RJ, Kovgan LN, Likhtarov IA. Estimation of radiation risk in presence of classical additive and Berkson multiplicative errors in exposure doses. *Biostatistics* 2016;17:422-436. doi: <https://doi.org/10.1093/biostatistics/kxv052>
31. Masiuk SV, Kukush AG, Shklyar SV, Chepurny MI, Likhtarov IA. Radiation risk estimation: Based on measurement error models. De

- in Mathematics and Life Sciences, Vol. 5. Berlin/Boston: Walter de Gruyter GmbH; 2017.
32. Thyroid dose estimates for a cohort of Belarusian children exposed to radiation from the Chernobyl accident / V. Drozdovitch, V. Minenko, V. Khrouch et al. *Radiat. Res.* 2013. Vol. 179, no. 5. P. 597-609. DOI: <https://doi.org/10.1667/RR3153.1>
 33. Reliability of questionnaire data in the distant past: relevance for radiation exposure assessment / V. Drozdovitch, T. Kukhta, V. Minenko et al. *Health Phys.* 2016. Vol. 110, no. 1. P. 74-92. DOI: <https://doi.org/10.1097/HP.0000000000000406>
 34. Recall of residential history and dietary habits during pregnancy and lactation in the distant past: reliability of questionnaire-based radiation doses for persons exposed in utero and early life / V. Drozdovitch, T. Kukhta, V. Minenko et al. *Radiat Environ Biophys.* 2023. Vol. 62, no. 4. P. 465-481. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00411-023-01040-5>
32. Drozdovitch V, Minenko V, Khrouch V, Leshcheva S, Gavrilin Y, Khurchinsky A, et al. Thyroid dose estimates for a cohort of Belarusian children exposed to radiation from the Chernobyl accident. *Radiat Res.* 2013;179(5):597-609. doi: <https://doi.org/10.1667/RR3153.1>
 33. Drozdovitch V, Kukhta T, Minenko V, Trofimik S, Bouville A, Potishman N. Reliability of questionnaire data in the distant past: relevance for radiation exposure assessment. *Health Phys.* 2016;110(1):74-92. doi: <https://doi.org/10.1097/HP.0000000000000406>
 34. Drozdovitch V, Kukhta T, Minenko V, Trofimik S, Veyalkin I, Yau-seyenka V, et al. Recall of residential history and dietary habits during pregnancy and lactation in the distant past: reliability of questionnaire-based radiation doses for persons exposed in utero and early life. *Radiat Environ Biophys.* 2023;62(4):465-481. doi: <https://doi.org/10.1007/s00411-023-01040-5>

ІНФОРМАЦІЯ ПРО АВТОРІВ

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>

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>

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>

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>

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

Жадан Наталія Станїславївна, молодший науковий співробітник лабораторії радіологічного захисту, Інститут радіаційної гігієни та епідеміології ННЦРМГО, м. Київ, Україна
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-6776-9482>

Чорновол Галина Василївна, кандидат філологічних наук, старший науковий співробітник відділу координації, планування та аналізу наукових досліджень ННЦРМГО, м. Київ, Україна
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3599-5154>

INFORMATION ABOUT AUTHORS

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>

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>

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>

Olha M. Ivanova, Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher of the Radiological Protection Laboratory, Institute of Radiation Hygiene and Epidemiology, NRCRMHO, Kyiv, Ukraine
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3652-0836>

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>

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>

Halyna V. Chornovol, Candidate of Philological Science, Senior Researcher of the Department of Research Coordination, Planning and Analysis, NRCRMHO, Kyiv, Ukraine
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3599-5154>

Болгов Михайло Юрійович, доктор медичних наук, професор, завідувач відділу хірургії ендокринних залоз, Державна установа «Інститут ендокринології та обміну речовин ім. В. П. Комісаренка Національної академії медичних наук України», м. Київ, Україна

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9011-9982>

Шпак Віктор Михайлович, старший науковий співробітник відділу з питань медичних наслідків аварії на ЧАЕС та міжнародних відносин, Державна установа «Інститут ендокринології та обміну речовин ім. В. П. Комісаренка Національної академії медичних наук України», м. Київ, Україна

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6983-5490>

Тронько Микола Дмитрович, доктор медичних наук, професор, член-кореспондент НАН України, академік НАМН України, завідувач відділу фундаментальної та прикладної ендокринології, директор Державної установи «Інститут ендокринології та обміну речовин ім. В. П. Комісаренка Національної академії медичних наук України», м. Київ, Україна

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7421-0981>

Богданова Тетяна Іванівна, доктор біологічних наук, професор, завідувач лабораторії морфології ендокринної системи, Державна установа «Інститут ендокринології та обміну речовин ім. В. П. Комісаренка Національної академії медичних наук України», м. Київ, Україна

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5119-0236>

Кар'яді Даніель, доктор філософії (молекулярна генетика), науковий співробітник лабораторії генетичної сприйнятливості, відділу епідеміології раку та генетики, Національний інститут раку, Національні інститути охорони здоров'я, Міністерство охорони здоров'я і соціальних служб США, Бетесда, Меріленд США, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4164-5625>

Відж Вібха, магістр громадського здоров'я (епідеміологія), науковий співробітник відділення радіаційної епідеміології відділу епідеміології раку та генетики, Національний інститут раку, Національний інститут охорони здоров'я, Міністерство охорони здоров'я і соціальних служб США, Бетесда, Меріленд, США ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1411-0257>

Кахун Елізабет, доктор філософії (епідеміологія), дослідник за програмою Ерла Штадтмана, Відділ радіаційної епідеміології, Відділ епідеміології раку та генетики, Національний інститут раку, Національний інститут охорони здоров'я, Міністерство охорони здоров'я і соціальних служб США, Бетесда, Меріленд, США

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8028-0588>

Чанок Стівен, доктор медичних наук, директор відділу епідеміології раку та генетики, Національний інститут раку, Національний інститут охорони здоров'я, Міністерство охорони здоров'я і соціальних служб США, Бетесда, Меріленд, США ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2324-3393>

Мортон Ліндсі, доктор філософії (епідеміологія), директор відділення радіаційної епідеміології відділу епідеміології

Mikhail Y. Bolgov, Doctor of Medical Sciences, Professor, Head of the Department of Endocrine Surgery, State Institution «V. P. Komissarenko Institute of Endocrinology and Metabolism of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine», Kyiv, Ukraine

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9011-9982>

Viktor M. Shpak, Senior Researcher of the Department of Medical Consequences of the Chernobyl Accident and International Relations, State Institution «V. P. Komissarenko Institute of Endocrinology and Metabolism of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine», Kyiv, Ukraine

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6983-5490>

Mykola D. Tronko, Doctor of Medical Sciences, Professor, Corresponding Member of the NAS of Ukraine, Academician of the NAMS of Ukraine, Head of the Department of Fundamental and Applied Problems of Endocrinology, Director of the State Institution «V. P. Komissarenko Institute of Endocrinology and Metabolism of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine», Kyiv, Ukraine

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7421-0981>

Tetiana I. Bogdanova, Doctor of Biological Sciences, Professor, Head of the Laboratory of Morphology of Endocrine System, State Institution «V. P. Komissarenko Institute of Endocrinology and Metabolism of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine», Kyiv, Ukraine

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5119-0236>

Danielle Karyadi, Ph.D. (Molecular Genetics), Staff Scientist, Laboratory of Genetic Susceptibility, Division of Cancer Epidemiology and Genetics, National Cancer Institute, National Institutes of Health, DHHS, Bethesda, MD, USA

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4164-5625>

Vibha Vij, Master of Public Health (Epidemiology), Staff Scientist, Radiation Epidemiology Branch, Division of Cancer Epidemiology and Genetics, National Cancer Institute, National Institutes of Health, DHHS, Bethesda, MD, USA

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1411-0257>

Elizabeth K. Cahoon, Ph.D. (Epidemiology), Earl Stadtman Investigator, Radiation Epidemiology Branch, Division of Cancer Epidemiology and Genetics, National Cancer Institute, National Institutes of Health, DHHS, Bethesda, MD, USA

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8028-0588>

Stephen J. Chanock, M.D., Director, Division of Cancer Epidemiology and Genetics, National Cancer Institute, National Institutes of Health, DHHS, Bethesda, MD, USA

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2324-3393>

раку та генетики, Національний інститут раку, Національний інститут охорони здоров'я, Міністерство охорони здоров'я і соціальних служб США, Бетесда, Меріленд, США, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9767-2310>

Дроздович Володимир В'ячеславович, кандидат технічних наук, науковий співробітник відділення радіаційної епідеміології, відділу епідеміології раку та генетики, Національний інститут раку, Національний інститут охорони здоров'я, Міністерство охорони здоров'я і соціальних служб США, Бетесда, Меріленд, США

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

Lindsay M. Morton, Ph.D. (Epidemiology), Director, Senior Investigator, Radiation Epidemiology Branch, Division of Cancer Epidemiology and Genetics, National Cancer Institute, National Institutes of Health, DHHS, Bethesda, MD, USA

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9767-2310>

Vladimir V. Drozdovitch, Ph.D. (Engineering), Staff Scientist, Radiation Epidemiology Branch, 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 15.10.2025

Received: 15.10.2025