

DOI: 10.31793/1680-1466.2026.31-1.73

Система реконструкції доз внутрішнього опромінення щитоподібної залози жителів України радіонуклідами йоду внаслідок аварії на Чорнобильській АЕС

С.В. Масюк¹,
М.Д. Тронько²,
М.І. Чепурний¹,
Т.І. Богданова²,
В.Б. Будерацька¹,
Г.А. Замотаєва²,
Н.С. Жадан¹,
В.М. Шпак²,
Г.В. Чорновол¹,
М.Ю. Болгов²

¹Державна установа «Національний науковий центр радіаційної медицини, гематології та онкології НАМН України»

²Державна установа «Інститут ендокринології та обміну речовин ім. В.П. Комісаренка НАМН України»

Резюме. Збільшення захворюваності на рак щитоподібної залози (РЩЗ) серед осіб, які зазнали впливу радіонуклідів йоду в дитинстві та підлітковому віці, є основним довгостроковим наслідком аварії на Чорнобильській атомній електростанції (ЧАЕС). Уже через 5-6 років після аварії було зафіксовано різке збільшення кількості випадків РЩЗ у дітей та підлітків, що мешкали на радіоактивно забруднених територіях України. Це явище зумовило низку міжнародних радіаційно-епідеміологічних досліджень, спрямованих на кількісну оцінку ризику розвитку радіаційно-індукованого раку та інших захворювань щитоподібної залози (ЩЗ) в осіб з опроміненою ЩЗ, що, своєю чергою, потребує визначення доз опромінення ЩЗ осіб, залучених до дослідження. **Мета роботи.** Огляд сучасної системи дозиметрії ЩЗ TD20 та результатів застосування цієї системи для реконструкції доз опромінення ЩЗ, отриманих населенням України у квітні-липні 1986 року внаслідок надходження до організму радіонуклідів йоду. **Матеріал і методи.** Жителі України, опромінені радіонуклідами йоду внаслідок аварії на ЧАЕС, були розподілені на 4 дозиметричні групи за критерієм наявності вимірювань радіоактивності в ЩЗ та іншої інформації, необхідної для розрахунку доз опромінення ЩЗ. Методологія реконструкції дози опромінення ЩЗ залежить від того, до якої дозиметричної групи належить особа. Дози опромінення ЩЗ були розраховані для таких шляхів опромінення: надходження ¹³¹I, а також ¹³²Te+¹³²I та ¹³³I через вдихання радіоактивно забрудненого повітря; споживання харчових продуктів, таких як молоко, молочні продукти та листові овочі у період з 26 квітня по 14 липня 1986 року. **Результати.** Середнє арифметичне значення доз опромінення ЩЗ радіонуклідом ¹³¹I для 13 204 членів Українсько-Американського когортного дослідження «Науковий проєкт вивчення раку та інших захворювань щитоподібної залози в Україні в результаті аварії на Чорнобильській АЕС» (дозиметрична група 1) становить 527 мГр, а медіана – 198 мГр. Середня арифметична доза опромінення ЩЗ внаслідок надходження ¹³¹I серед 146 425 осіб, у яких була виміряна активність у ЩЗ у травні-червні 1986 року (дозиметрична група 2), становить 230 мГр, а медіанна доза – 94 мГр. Найвищі усереднені та зважені за населенням області дози опромінення ЩЗ (дозиметрична група 3) отримали мешканці Чернігівської (середнє арифметичне – 150 мГр, медіана – 60 мГр), Київської (130 та 51 мГр)

та Житомирської (120 та 49 мГр) областей. Сумарні пренатальні та постнатальні дози опромінення ЩЗ розраховані для 2582 членів української когорти осіб, які зазнали впливу ^{131}I внутрішньоутробно (дозиметрична група 4) варіювалися від 0 до 2,7 Гр. Середня сумарна доза опромінення ЩЗ від ^{131}I становить 87 мГр, а медіана 17 мГр. Внесок $^{132}\text{Te}+^{132}\text{I}$ та ^{133}I у загальну дозу опромінення ЩЗ є найбільшим для мешканців Прип'яті (22-40%, залежно від віку на момент опромінення), для мешканців районів, наближених до ЧАЕС, він становить 8-11%, а для мешканців решти районів не перевищує 3%.

Висновки. У роботі представлено оновлену систему реконструкції доз внутрішнього опромінення ЩЗ (TD20) жителів України радіонуклідами йоду внаслідок аварії на ЧАЕС, а також результати застосування цієї системи для реконструкції доз опромінення ЩЗ: 13 204 членів Українсько-Американського когортного дослідження, 2582 членів української когорти осіб, опромінені *in utero*, 146 425 осіб, які мали вимірювання радіоактивності в ЩЗ у травні-червні 1986 року та мешканців 30 353 населених пунктів 24 областей України, Автономної Республіки Крим і міст Києва та Севастополя.

Ключові слова: аварія на Чорнобильській атомній електростанції, ^{131}I , щитоподібна залоза, доза опромінення.

Унаслідок аварії, що сталася 26 квітня 1986 року на ЧАЕС, в атмосферу потрапила велика кількість радіоактивних матеріалів, найбільше радіологічне значення з яких мають радіонукліди йоду, цезію та стронцію: ^{131}I , ^{134}Cs , ^{137}Cs та ^{90}Sr [1]. У результаті значна частина території України, Республіки Білорусь і Російської Федерації зазнала радіоактивного забруднення, а жителі цих територій піддалися радіоактивному опроміненню. Найбільш істотним було внутрішнє опромінення ЩЗ, спричинене надходженням до організму радіонукліда ^{131}I , викид якого в атмосферу оцінюється на рівні $1,8 \times 10^{18}$ Бк. При цьому найбільшого опромінення зазнали діти та підлітки, які у квітні-липні 1986 року проживали в північних регіонах Житомирської, Київської, Рівненської та Чернігівської областей України, а також особи, опромінені внутрішньоутробно та народжені в перші місяці після аварії від матерів, що проживали у вищевказаних регіонах у квітні-липні 1986 року [2-4].

Уже через 5-6 років після аварії було зафіксовано різке збільшення кількості випадків раку ЩЗ у дітей та підлітків, що мешкали на територіях із досить високими дозовими навантаженнями на цей орган [5]. Фактично зростання захворюваності на РЩЗ у дітей та підлітків, зумовлене її внутрішнім опроміненням унаслідок чорнобильських радіоактивних викидів, стало головним статистично вірогідним віддаленим ефектом аварії на ЧАЕС [1]. Не дивно, що це явище викликало великий інтерес і зумовило низку радіаційно-епідеміологічних досліджень, спрямованих на кількісну оцінку ризику захворювання на РЩЗ в Україні, зумовленого її внутрішнім опроміненням радіонуклідами йоду в дитячому та підлітковому віці [6, 7]. Одне з най-

відоміших постчорнобильських досліджень – українсько-американське когортне дослідження РЩЗ та інших захворювань ЩЗ. Когорта складається з 13 204 осіб, які зазнали опромінення у віці від 0 до 18 років від чорнобильських радіоактивних випадів і для яких проводяться спостереження щодо захворювань на РЩЗ та інших захворювань ЩЗ за стандартизованим протоколом скринінгу [8]. Індивідуальні дози, зумовлені надходженням ^{131}I , були реконструйовані двічі для всіх членів когорти з використанням дозиметричної системи, яка згодом була уточнена [9, 10].

Система дозиметрії ЩЗ 2010 року (TD10), до недавнього часу використовувалась для оцінки доз на ЩЗ членів Українсько-Американського когортного дослідження [11-13]. Однак, ця дозиметрична система має обмеження, пов'язані з невідомою геометрією вимірювань і невідомими значеннями калібрувальних коефіцієнтів для некаліброваних детекторів, що використовувались для вимірювань ЩЗ. Широкомасштабний моніторинг активності ^{131}I у ЩЗ, так званий «тиреодозиметричний моніторинг», серед постраждалого населення було організовано в надзвичайно стислі терміни, відразу після аварії. Це зумовило збільшення похибок при проведенні вимірювань порівняно з лабораторними дослідженнями. Ці похибки були спричинені залученням до проведення дозиметричного моніторингу персоналу, який не мав досвіду роботи з вимірювальним обладнанням, використанням різних типів вимірювальних приладів, які, як правило, не були призначені для вимірювання радіоактивності в ЩЗ [14]. Очевидно, що похибки, пов'язані з вимірами радіоактивності ЩЗ, могли зумовити сенсаційні відмінності

радіаційних ризиків захворювань на РЩЗ у мешканців Житомирської та Чернігівської областей України [11].

Щоб виправити вищевказані недоліки, були проведені спеціальні дослідження для вдосконалення системи TD10, зокрема: (а) переоцінка активності ^{131}I у ЩЗ, виміряної у 146 425 осіб, включно з членами Українсько-Американського когортного дослідження [2]; (б) удосконалення системи дозиметрії ЩЗ для всієї України, яка використовувалася для розрахунку екологічної дози ЩЗ [3]; (в) уточнення розподілу маси ЩЗ за віком і статтю для мешканців досліджуваної території [15]; (г) перерахунок щільності випадіння ^{131}I на ґрунт в Україні з використанням метеорологічної моделі високої роздільної здатності [16]. Крім того, у новій системі TDU20 було враховано внесок короткоіснуючих радіонуклідів $^{132}\text{Te}+^{132}\text{I}$ та ^{133}I , що надходили до організму людини інгаляційним і пероральним шляхом, у дозу опромінення ЩЗ.

У роботі описано сучасну систему дозиметрії ЩЗ (далі – TD20), яка містить усі описані вище зміни та вдосконалення, а також результати застосування цієї системи для реконструкції доз опромінення ЩЗ: (1) членів Українсько-Американського когортного дослідження [17], (2) членів української когорти осіб опромінених *in utero* [4, 18], (3) осіб, які мали вимірювання радіоактивності в ЩЗ у травні-червні 1986 року і (4) для всього населення України [3].

Мета роботи: огляд сучасної системи дозиметрії ЩЗ TD20 та результатів застосування цієї системи для реконструкції доз опромінення ЩЗ, отриманих населенням України у квітні-липні 1986 року внаслідок надходження до організму радіонуклідів йоду та телуру.

Матеріал і методи

Жителі України, опромінені радіонуклідами йоду внаслідок аварії на ЧАЕС, були розподілені на дозиметричні групи за критерієм наявності вимірювань радіоактивності в ЩЗ та іншої інформації, необхідної для розрахунку доз опромінення ЩЗ.

- До групи 1 входять члени Українсько-Американського когортного дослідження, опромінені в дитинстві або в підлітковому віці, у 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 [10, 17].

- Група 2 складається з осіб, у яких було виміряно активність ^{131}I у травні-червні 1986 року [2, 14], але з якими не було проведено персональне дозиметричне інтерв'ю.
- До групи 3 належать особи, які не мали вимірів активності ^{131}I у ЩЗ та серед яких не проводились персональні дозиметричні опитування, окрім декількох сотень осіб, серед яких такі опитування проводилися в рамках міжнародних наукових проєктів [19, 20]. Ця група поділена на три підгрупи, про що детально описано нижче в 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 [4, 18].

Якщо особа народилася після 31 березня 1987 року, то її ЩЗ не була опромінена радіонуклідом ^{131}I .

Шляхи опромінення

Дози були розраховані для таких шляхів опромінення ЩЗ:

- Надходження ^{131}I через вдихання радіоактивно забрудненого повітря та споживання харчових продуктів, таких як молоко (коров'яче та/або козяче), молочні продукти та листові овочі у період з 26 квітня по 14 липня 1986 року, коли ^{131}I внаслідок радіоактивного розпаду знизився до рівня 0,1% від початкової кількості, осадженої на підстильну поверхню.
- Надходження $^{132}\text{Te}+^{132}\text{I}$ та ^{133}I 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.

Індивідуальний анамнез проживання та харчування

Для більш точного визначення дози опромінення ЩЗ дітей та підлітків, опромінених у 1986 році, – членів Українсько-Американського когортного дослідження [10, 17], осіб, які зазнали опромінення внутрішньоутробно, – членів української когорти осіб опромінених *in utero* [4, 18]

та частини суб'єктів Чорнобильського банку тканин [19–21] були проведені персональні дозиметричні інтерв'ю з учасниками цих досліджень або з їхніми батьками. 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; (в) вживання стабільного йоду (йодиду калію) особою (або її матір'ю) для блокування поглинання радіоактивного ^{131}I ЩЗ у період з 26 квітня по 14 липня 1986 року.

Реконструкція доз опромінення ЩЗ від надходження ^{131}I

У системі TD20 методологія реконструкції дози опромінення ЩЗ залежить від того, до якої дозиметричної групи належить особа.

Дозиметрична група 1. До цієї групи належать члени Українсько-Американського когортного дослідження, які зазнали опромінення в дитинстві або підлітковому віці. 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 приймання 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 аварії на ЧАЕС.

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, $D_k^{model}(t)$, розрахованій для будь-якого часу t після аварії з використанням екологічних та біокінетичних моделей; (б) *виміряна* доза опромінення ЩЗ, D_k^{meas} , що базується на активності ^{131}I ЩЗ, виміряній у момент часу t_m після аварії, Q_k^{meas,t_m} . *Виміряна* доза опромінення ЩЗ є надійнішою, ніж *модельна*, оскільки вона базується на індивідуальному вимірюванні активності ^{131}I ЩЗ. *Модельна* доза опромінення ЩЗ (мГр) для особи k розраховувалась за формулою:

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

де $k_u = 13,84$ – коефіцієнт, що утворюється внаслідок приведення одиниць вимірювання до системи СІ (Бк кБк $^{-1}$ г кг $^{-1}$ Дж МеВ $^{-1}$ сд $^{-1}$ мГр Гр $^{-1}$); M_k – маса ЩЗ, що відповідає статі та віку особи k (г) [15]; e^{J-131} – середня енергія, яка поглинається ЩЗ на один розпад ^{131}I у ЩЗ, що відповідає віку особи k [22] (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 (з 26 квітня 1986 року ($t = 0$) по 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 в рівнянні (1) на виміряну активність, Q_k^{meas,t_m} , із 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.

Вважається, що теоретична динаміка $Q_k^{model}(t)$ 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 ЩЗ членів Українсько-Американського когортного дослідження, можна знайти в [10, 17].

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) зареєстроване на момент аварії місце проживання особи вважалося 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 ЩЗ $Q_k^{model}(t)$ у рівнянні (1) використовувалися референтні показники споживання молока та листових овочів особою

залежно від її віку та статі [17]; (в) вважалося, що особа не приймала препаратів стабільного йоду для блокування поглинання ^{131}I ЩЗ.

Дозиметрична група 3. Дози опромінення ЩЗ для осіб із цієї групи розраховувались за методологією, яка дозволяє розраховувати дози опромінення ЩЗ, точність яких 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 в 1986 році [3]:

- До першого рівня належать 835 населених пунктів Вінницької, Житомирської, Київської та Чернігівської областей, де вимірювання активності ^{131}I у ЩЗ, що проводилися в 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 взагалі, або кількість вимірюваних осіб була менше ніж 10, але такі вимірювання проводилися щонайменше в п'яти інших населених пунктах даного адміністративного району за адміністративним поділом до 2020 року (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 ЩЗ 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 [3]; а $D_{a,s,j}^{model}$ – модельна доза опромінення ЩЗ особи тієї ж вікової групи та статі, що проживає в тому ж населеному пункті.

Якщо з особою не проводилось персональне дозиметричне інтерв'ю, доза опромінення ЩЗ збігалася з дозою, розрахованою в [3]. Однак для осіб, які пройшли персональні дозиметричні інтерв'ю, дози відрізнялися від доз, розрахованих у [3], оскільки була відома індивідуальна інформація про місце проживання, раціон 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 плода 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 дози опромінення ЩЗ плода внаслідок надходження ^{131}I до організму матері базувалася на дозі опромінення ЩЗ матері з використанням біокінетичної моделі, рекомендованої публікацією МКРЗ 88 [23].

Для окремої особи пренатальна доза $D_{k,fetus}^{model}$ (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, визначалась як:

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

де $h_T(\tau)$ – залежна від гестаційного віку τ доза опромінення ЩЗ плода, нормована на одиницю надходження ^{131}I до організму матері (мГр кБк $^{-1}$) [23]; τ_0 – гестаційний вік станом на 26 квітня 1986 року (доба); $q_{k,mother}(t)$ динаміка надходження ^{131}I до організму матері, розрахована за допомогою екологічної моделі [10] (кБк).

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

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

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

Таким чином, точність пренатальної дози опромінення ЩЗ плода залежить від того, до якої дозиметричної групи опромінення належить матір дитини. Якщо в матері була виміряна радіоактивність у ЩЗ у травні-червні 1986 року (матір належить до дозиметричної групи 1 або 2), оцінка дози опромінення ЩЗ, яку отримала її дитина внутрішньоутробно, є набагато точнішою, ніж у випадку, коли радіоактивність у ЩЗ матері не вимірювалась (матір належить до дозиметричної групи 3).

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

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

Окрім ^{131}I з періодом напіврозпаду 8,02 дні, внаслідок аварії на ЧАЕС у навколишнє середовище потрапила низка короткоіснуючих радіонуклідів йоду та телуру. Найважливішими з них, що спричинили опромінення ЩЗ населення України, були ^{132}Te , ^{132}I та ^{133}I . Короткоіснуючі

радіонукліди йоду ^{132}I та ^{133}I у навколишньому середовищі та організмі людини поводяться аналогічно ^{131}I , а радіонукліди телуру ^{132}Te є материнськими для йоду ^{132}I . Радіонукліди $^{132}\text{Te}+^{132}\text{I}$ та ^{133}I надходили до ЩЗ головним чином інгаляційним шляхом та, меншою мірою, пероральним шляхом [24, 25]. 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 радіоізоотопів йоду в реакторі та динаміки осідання ^{131}I на підстильну поверхню [26].

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) та його радіоактивну рівновагу в навколишньому середовищі з ^{132}I (період напіврозпаду 2,3 год). 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 із 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 [27]. Надходження ^{132}Te до ЩЗ із листовими овочами розраховувалося аналогічно до ^{131}I , але з використанням значень параметрів екологічної моделі для телуру [10].

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 [23]. Екологічну постнатальну дозу опромінення ЩЗ від ^{133}I та $^{132}\text{Te}+^{132}\text{I}$ було розраховано, як описано в [10], із використанням дозових коефіцієнтів опромінення ЩЗ новонароджених при інгаляційному та пероральному надходженні відповідних радіонуклідів [28, 29].

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 $D_{k,SL}^{meas}$ – вимірні 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 .

Результати та обговорення

За допомогою сучасної системи дозиметрії ЩЗ TD20 дози опромінення ЩЗ внаслідок надходження радіонуклідів ^{131}I , $^{132}\text{Te}+^{132}\text{I}$ та ^{133}I були розраховані для представників усіх дозиметричних груп 1-4.

Дози опромінення ЩЗ від надходження радіонукліда ^{131}I , розраховані для 13 204 членів Українсько-Американського когортного дослідження (дозиметрична група 1), представлені в таблиці 1. Середнє арифметичне значення доз опромінення ЩЗ для всієї когорти становить 527 мГр, а медіана 198 мГр. Для 9 835 осіб (74,5% від загальної кількості) доза опромінення ЩЗ не перевищує 500 мГр. Доза опромінення ЩЗ для 28 членів когорти (0,2% від загальної кількості) більша за 10 Гр, тоді як максимальна доза становить 30 Гр. Загалом надходження ^{131}I формує в середньому близько 95% дози внутрішнього опромінення ЩЗ, тоді як середній внесок короткоіснуючих радіонуклідів йоду та телуру $^{132}\text{Te}+^{132}\text{I}$ та ^{133}I в загальну дозу опромінення ЩЗ становить близько 5%. Внесок $^{132}\text{Te}+^{132}\text{I}$ та ^{133}I у загальну дозу опромінення ЩЗ є найбільшим для мешканців Прип'яті (22–40%, залежно від віку на момент опромінення), а також він є значним (8–11%) для осіб, які проживали в районах, наближених до ЧАЕС (колишній Поліський та Чорнобильський райони Київської області та колишні Коростенський, Народицький, Овруцький та Олевський райони Житомирської області), де випадіння радіонуклідів відбулося в перший день аварії [17].

Середня арифметична доза опромінення ЩЗ внаслідок надходження ^{131}I серед 146 425 осіб, у яких була виміряна активність у ЩЗ у

травні-червні 1986 року (дозиметрична група 2), становить 230 мГр, а медіанна доза – 94 мГр. При цьому 274 особи, або 0,2% від 146 425 отримали дозу більшу, ніж 5 Гр. (табл. 2). Дозові оцінки для даної дозиметричної групи коливаються в широкому діапазоні – від 0,02 мГр до 26 Гр, тоді як 5–95% дозовий інтервал знаходиться в діапазоні 13–860 мГр. Надходження радіонукліда ^{131}I було основним шляхом опромінення ЩЗ, його

Таблиця 1. Розподіл доз опромінення ЩЗ від надходження ^{131}I серед 13 204 членів Українсько-Американського когортного дослідження (дозиметрична група 1)

Table 1. Distribution of thyroid radiation doses from ^{131}I intake among 13,204 members of the Ukrainian-American cohort study (dosimetric group 1)

Дозовий інтервал (мГр) Dose interval (mGy)	Кількість осіб Number of individuals	%	Середня доза (мГр) Average dose (mGy)
<20	557	4,2	11
20–50	1 397	10,6	35
50–100	2 055	15,6	74
100–200	2 636	20,0	144
200–500	3 190	24,1	322
500–1 000	1 690	12,8	702
1 000–5 000	1 542	11,7	1 937
>5 000	137	1,0	8 510
Загалом Total	13 204	100,0	527

Таблиця 2. Розподіл доз опромінення ЩЗ від надходження ^{131}I серед 146 425 осіб, у яких у травні-червні 1986 р. була виміряна активність радіоїоду в ЩЗ (дозиметрична група 2)

Table 2. Distribution of thyroid radiation doses among ^{131}I intake for 146,425 individuals who had radioiodine activity measurement in the thyroid in May-June 1986 (dosimetric group 2)

Дозовий інтервал (мГр) Dose interval (mGy)	Кількість осіб Number of individuals	%	Середня доза (мГр) Average dose (mGy)
<20	14 179	9,7	12
20–50	31 257	21,4	34
50–100	32 918	22,5	72
100–200	29 342	20,0	140
200–500	24 170	16,5	310
500–1 000	8 703	5,9	690
1 000–5 000	5 582	3,8	1 800
>5 000	274	0,2	8 300
Загалом Total	146 425	100,0	230

медіанний внесок у дозу опромінення ЩЗ становить 97,4%. Найбільший внесок короткоіснуючих радіонуклідів йоду та телуру ($^{132}\text{Te}+^{132}\text{I}$ та ^{133}I) у загальну дозу опромінення ЩЗ спостерігається для мешканців районів, наближених до ЧАЕС, де випадіння радіонуклідів відбулося в перший день аварії. Аналогічно до *дозиметричної групи 1*, найбільш значний внесок $^{132}\text{Te}+^{132}\text{I}$ та ^{133}I у загальну дозу опромінення ЩЗ характерний для мешканців Прип'яті (19–26%, залежно від віку на момент аварії) та для осіб, які проживали в районах, наближених до ЧАЕС (4–10%). Внесок $^{132}\text{Te}+^{132}\text{I}$ та ^{133}I у загальну дозу опромінення ЩЗ для мешканців інших районів не перевищує 3% [3].

У **таблиці 3** наведено розподіл середньоарифметичних та зважених за населенням значень доз внутрішнього опромінення ЩЗ радіонуклідом ^{131}I для різних вікових груп населення районів, міст та селищ міського типу, де в 1986 році проводилися вимірювання радіоактивності в ЩЗ (*дозиметрична група 3, дозиметричні підгрупи 3.1 та 3.2*). Евакуйовані міста, такі як Прип'ять, Чорнобиль та Поліське, не були включені до таблиці. У середньому, найвищі дози опромінення ЩЗ були оцінені в мешканців Народицького району Житомирської області (830 мГр) та Поліського району Київської області (680 мГр) [3].

Таблиця 3. Середні районні дози опромінення ЩЗ від надходження ^{131}I для мешканців різного віку на момент аварії на ЧАЕС, розраховані для районів, де в 1986 році проводилися вимірювання радіоактивності в ЩЗ щонайменше в п'яти населених пунктах (*дозиметрична група 3, дозиметричні підгрупи 3.1 та 3.2*)

Table 3. Average regional doses of thyroid radiation from ^{131}I intake for residents of different ages at the time of the Chernobyl accident, calculated for districts where thyroid radioactivity measurements were conducted in at least in five settlements in 1986 (*dosimetric group 3, dosimetric subgroups 3.1 and 3.2*)

Район* District*	Щільність випадінь ^{131}I (кБк м ⁻²)** ^{131}I deposition density (kBq m ⁻²)**	Середня доза опромінення ЩЗ для різних вікових груп (мГр)** Average thyroid dose for different age groups (mGy)**						Всі мешканці All residents
		< 1 р. < 1 y	1–2 р. 1–2 y	3–7 р. 3–7 y	8–12 р. 8–12 y	13–17 р. 13–17 y	≥ 18 р. ≥ 18 y	
<i>Вінницька область</i> <i>Vinnitska Oblast</i>								
Гайсинський Haysynskiy	68	100	82	44	28	22	22	40
Немирівський Nemyrivskiy	98	230	180	98	63	52	50	91
<i>Житомирська область</i> <i>Zhytomyrska Oblast</i>								
Коростенський Korostenskiy	1 090	560	470	260	180	150	130	240
Лугинський Luhynskiy	1 563	940	810	440	320	280	240	430
Малинський Malynskiy	654	870	720	380	250	200	190	360
Народицький Narodytskyi	2 135	2100	1700	910	620	530	500	830
Овруцький Ovrutskiy	1 733	860	690	370	240	200	190	330
Олевський Olevskiy	1 460	420	350	200	150	120	100	190
м. Житомир Zhytomyr city	128	150	110	50	30	20	30	47
м. Коростень Korosten city	1 200	730	550	270	130	110	140	250

Продовження таблиці 3

Район* District*	Щільність випадіння ¹³¹ I (кБк м ⁻²)** ¹³¹ I deposition density (kBq m ⁻²)**	Середня доза опромінення ЩЗ для різних вікових груп (мГр)** Average thyroid dose for different age groups (mGy)**						Всі мешканці All residents
		< 1 р. < 1 y	1–2 р. 1–2 y	3–7 р. 3–7 y	8–12 р. 8–12 y	13–17 р. 13–17 y	≥ 18 р. ≥ 18 y	
м. Звягель Zviahel city	268	190	140	67	34	27	35	64
Київська область Kyivska Oblast								
Бородянський Borodianskyi	486	340	280	155	110	88	80	150
Вишгородський Vyshhorodskyi	720	420	350	190	120	100	93	180
Іванківський Ivankivskyi	1 085	360	310	170	130	110	97	170
Києво-Святошинський Kyievo-Sviatoshynskyi	517	250	200	100	61	50	52	96
Макарівський Makarivskyi	357	430	370	200	150	120	105	200
Поліський Poliskyi	3 249	1500	1300	730	500	410	352	680
м. Ірпінь Irpin city	608	220	180	93	58	44	46	85
Чернігівська область Chernihivska Oblast								
Козелецький Kozeletskyi	322	310	260	140	100	82	71	140
Ріпкинський Ripkynskyi	807	530	470	250	180	150	140	240
Чернігівський Chernihivskyi	973	890	750	430	300	250	210	410
м. Чернігів Chernihiv city	1 334	440	330	160	79	64	84	140

Примітка. * – назва району до адміністративної реформи 2020 року; ** – дані, зважені на населення району в 1986 році.

Note. * – name of the district before to the 2020 administrative reform; ** – data regarding the district's population in 1986.

Окрім мешканців Прип'яті, де внесок короткоіснуючих радіонуклідів ¹³²Te+¹³²I та ¹³³I у загальну дозу опромінення ЩЗ є найбільшим і складає майже чверть від усієї дози опромінення, відносно високий внесок (до 10% від загальної дози опромінення ЩЗ) короткоіснуючих радіонуклідів був оцінений для мешканців районів, найближчих до ЧАЕС, де випадіння радіонуклідів відбулося в перший день аварії, а саме: для мешканців Поліського та Чорнобильського районів Київської області та Коростенського, Народицького, Овруцького і Олевського районів Житомирської області. Внесок ¹³²Te+¹³²I та ¹³³I у загальну дозу опромінення ЩЗ для мешканців інших районів коливається в діапазоні 0,5–3%.

Оцінки доз опромінення ЩЗ для статеві-вікових груп мешканців 30 353 населених пунктів у 24 областях України, Автономній Республіці Крим і містах Києві та Севастополі представлені в таблиці 4. Усі ці дози належать до дозиметричної групи 3. Серед них дозові оцінки для 835 населених пунктів базувалися на активності ¹³¹I у ЩЗ, виміряній у понад десяти мешканців у кожному населеному пункті (дозиметрична підгрупа 3.1), для 690 населених пунктів – на вимірюваннях активності ¹³¹I у ЩЗ, проведених у сусідніх населених пунктах (дозиметрична підгрупа 3.2), а для 28 828 населених пунктів – на кореляції між дозою опромінення ЩЗ внаслідок надходження ¹³¹I та кумулятивною щільністю випадіння ¹³¹I на ґрунт у населеному пункті (дозиметрична підгрупа 3.3).

Таблиця 4. Середні обласні дози опромінення ЩЗ від надходження ¹³¹I для мешканців різного віку на момент аварії на ЧАЕС (дозиметрична група 3)**Table 4.** Average regional thyroid radiation from ¹³¹I intake for residents of different ages at the time of the Chernobyl accident (dosimetric group 3)

Район* District*	Щільність випадінь ¹³¹ I (кБк м ⁻²)* ¹³¹ I deposition density (kBq m ⁻²)*	Середня доза опромінення ЩЗ для різних вікових груп (мГр)* Average thyroid dose for different age groups (mGy)*						Всі мешканці All residents
		< 1 р. < 1 y	1–2 р. 1–2 y	3–7 р. 3–7 y	8–12 р. 8–12 y	13–17 р. 13–17 y	≥ 18 р. ≥ 18 y	
Вінницька Vinnytska	76	140	120	61	38	31	32	55
Волинська Volynska	123	130	110	58	36	30	29	53
Луганська Luhanska	27	120	92	47	26	21	24	43
Дніпропетровська Dnipropetrovska	33	77	59	30	16	13	15	27
Донецька Donetska	101	120	91	45	26	20	23	41
Житомирська Zhytomyrska	490	300	250	130	85	68	66	120
Закарпатська Zakarpatska	57	85	69	37	23	19	19	34
Запорізька Zaporizka	38	79	61	31	17	14	16	28
Івано-Франківська Ivano-Frankivska	30	150	120	64	41	32	32	59
Київська Kyivska	407	320	250	130	84	69	68	130
Кіровоградська Kirovohradska	157	130	106	55	33	26	29	50
АР Крим AR Krym	53	74	58	30	18	15	16	28
Львівська Lvivska	59	79	63	32	18	15	17	29
Миколаївська Mykolaivska	34	100	80	41	24	19	21	38
Одеська Odeska	42	130	100	53	30	24	28	48
Полтавська Poltavska	111	130	100	54	32	26	28	48
Рівненська Rivnenska	394	260	210	110	72	58	57	100
Сумська Sumska	124	140	110	58	34	27	30	53
Тернопільська Ternopilska	15	98	80	43	27	21	21	39
Харківська Kharkivska	98	130	100	54	30	24	27	47
Херсонська Khersonska	43	93	73	38	22	18	21	35
Хмельницька Khmelnyska	99	110	86	45	28	23	23	41

Продовження таблиці 4

Район* District*	Щільність випадінь ¹³¹ I (кБк м ⁻²)* ¹³¹ I deposition density (kBq m ⁻²)*	Середня доза опромінення ЩЗ для різних вікових груп (мГр)* Average thyroid dose for different age groups (mGy)*						Всі мешканці All residents
		< 1 р. < 1 y	1–2 р. 1–2 y	3–7 р. 3–7 y	8–12 р. 8–12 y	13–17 р. 13–17 y	≥ 18 р. ≥ 18 y	
Черкаська Cherkaska	403	230	190	96	57	46	49	88
Чернівецька Chernivetska	68	190	160	82	50	40	43	74
Чернігівська Chernihivska	703	390	310	160	98	78	82	150
м. Київ Kyiv city	285	230	170	84	42	33	44	76
м. Севастополь Sevastopol city	223	180	140	67	34	27	35	60
Вся Україна Total of Ukraine	138	150	120	60	35	28	30	54

Примітка. * – дані, зважені на населення області у 1986 році

Note. * – data regarding by the population of the Oblast in 1986

Найвищі усереднені та зважені за населенням області дози опромінення ЩЗ отримали мешканці Чернігівської (середнє арифметичне – 150 мГр, медіана – 60 мГр), Київської (130 та 51 мГр) та Житомирської (120 та 49 мГр) областей, дещо менші дозові оцінки отримані для мешканців Рівненської (100 та 39 мГр) та Черкаської (88 та 32 мГр) областей та міста Києва (76 та 31 мГр) (див. табл. 4) [3].

Дози опромінення ЩЗ, розраховані для 2582 членів української когорти осіб, які зазнали впливу ¹³¹I внутрішньоутробно (дозиметрична група 4), представлені у таблиці 5. Сумарні пренатальні та постнатальні дози опромінення ЩЗ варіювалися від 0 до 2,7 Гр. Середня сумарна доза опромінення ЩЗ від ¹³¹I становила 87 мГр, а медіана – 17 мГр. Для 182 осіб (7,0% від загальної кількості) сумарна доза опромінення ЩЗ

Таблиця 5. Розподіл доз опромінення ЩЗ, отриманої внутрішньоутробно (пренатальна доза) та після народження (постнатальна доза) від надходження ¹³¹I серед 2582 членів української когорти осіб, які зазнали впливу ¹³¹I внутрішньоутробно (дозиметрична група 4)

Table 5. Distribution of thyroid radiation doses received in utero (prenatal dose) and after birth (postnatal dose) from ¹³¹I intake among 2,582 members of the Ukrainian cohort of individuals exposed to ¹³¹I in utero (dosimetric group 4)

Дозовий інтервал (мГр) Dose interval (mGy)	Пренатальна доза Prenatal dose			Постнатальна доза Postnatal dose			Сумарна доза Total dose		
	Кількість осіб Number of individuals	%	Середня доза (мГр) Average dose (mGy)	Кількість осіб Number of individuals	%	Середня доза (мГр) Average dose (mGy)	Кількість осіб Number of individuals	%	Середня доза (мГр) Average dose (mGy)
< 1	536	20,8	0,13	2,220	86,0	0,03	493	19,1	0,12
1 – 20	892	34,5	8,4	279	10,8	5,8	884	34,2	8,7
20 – 50	397	15,4	32	51	2,0	31	420	16,3	32
50 – 100	270	10,5	74	14	0,5	72	277	10,7	73
100 – 200	233	9,0	142	9	0,3	144	245	9,5	143
200 – 500	164	6,3	302	7	0,3	362	169	6,6	306
500 – 1 000	52	2,0	647	1	0,05	785	55	2,1	646
> 1 000	38	1,5	1 486	1	0,05	1 562	39	1,5	1 527
Загалом Total	2 582	100	83	2 582	100	4,0	2 582	100	87

дорівнювала нулю, оскільки вони народилися в 1987 році. Для 1995 осіб (77,3% від загальної кількості) сумарна доза опромінення ЩЗ від ^{131}I варіювалася від 1 мГр до 500 мГр, тоді як для 39 членів когорти (1,5%) доза перевищувала 1,0 Гр. [4].

Середня постнатальна доза опромінення ЩЗ від ^{131}I становила 4,0 мГр, тоді як медіана дорівнювала нулю, оскільки 1792 з 2582 членів когорти (69,4%) народилися після 14 липня 1986 року і, отже, не зазнали впливу ^{131}I постнатально. Отримана після народження доза серед членів когорти, яких годували грудьми, між 26 квітня та 31 травня 1986 року (291 особа), була дещо вищою, ніж дози для тих, кого грудьми не годували (37 осіб), середні значення – 31 мГр та 24 мГр відповідно.

Для осіб, які проживали в районах поблизу ЧАЕС, внесок короткоіснуючих радіонуклідів йоду та телуру $^{132}\text{Te}+^{132}\text{I}$ та ^{133}I в загальну дозу опромінення ЩЗ коливається від 5 до 7%, тоді як для всієї когорти цей внесок становить в середньому близько 3%.

Висновки

У роботі представлено оновлену систему реконструкції доз внутрішнього опромінення щитоподібної залози (TD20) жителів України радіонуклідами йоду внаслідок аварії на Чорнобильській АЕС, а також результати застосування цієї системи для реконструкції доз опромінення щитоподібної залози: 13 204 членів Українсько-Американського когортного дослідження, 2582 членів української когорти осіб опромінені *in utero*, 146 425 осіб, які мали вимірювання радіоактивності в щитоподібній залозі в травні-червні 1986 року та мешканців 30 353 населених пунктів 24 областей України, Автономної Республіки Крим і міст Києва та Севастополя. Точність дозових розрахунків для певної особи залежить від наявності в неї вимірювання радіоактивності в щитоподібній залозі (проводилися в 1986 році) та персональних дозиметричних інтерв'ю щодо проживання та харчування особи в перші місяці після Чорнобильської аварії. 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 дасть змогу отримати більш точні оцінки індивідуальних доз, ніж без проведення такого інтерв'ювання.

Перспективи подальших досліджень

Перспективи подальших досліджень пов'язані з реконструкцією доз внутрішнього опромінення ЩЗ від довгоіснуючих радіонуклідів ^{134}Cs та ^{137}Cs , а також доз зовнішнього опромінення ЩЗ від усіх радіонуклідів чорнобильського викиду.

Список використаної літератури

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. 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 May;60(2):267-88. doi: 10.1007/s00411-021-00896-9.
3. 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 Nov;60(4):591-609. doi: 10.1007/s00411-021-00930-w.
4. Masiuk S, Chepurny M, Buderatska V, Ivanova O, Boiko Z, Zhadan N, et al. Assessment of internal exposure to ^{131}I and short-lived radioiodine isotopes and associated uncertainties in the Ukrainian cohort of persons exposed *in utero*. *J Radiat Res*. 2022 May 18;63(3):364-77. doi: 10.1093/jrr/rrac007.
5. Likhtarev IA, Sobolev BG, Kairo IA, Tronko ND, Bogdanova TI, Oleinic VA, et al. Thyroid cancer in the Ukraine. *Nature*. 1995 Jun 1;375(6530):365. doi: 10.1038/375365a0.
6. Likhtarov I, Kovgan L, Vavilov S, Chepurny M, Ron E, Lubin J, et al. Post-Chernobyl thyroid cancers in Ukraine. Report 2: risk analysis. *Radiat Res*. 2006 Aug;166(2):375-86. doi: 10.1667/RR3593.1.
7. Tronko MD, Howe GR, Bogdanova TI, Bouville AC, Epstein OV, Brill AB, et al. A cohort study of thyroid cancer and other thyroid diseases after the chernobyl accident: thyroid cancer in Ukraine detected during first screening. *J Natl Cancer Inst*. 2006 Jul 5;98(13):897-903. doi: 10.1093/jnci/djj244.
8. Stezhko VA, Buglova EE, Danilova LI, Drozd VM, Krysenko NA, Lesnikova NR, et al. A cohort study of thyroid cancer and other thyroid diseases after the Chernobyl accident: objectives, design and methods. *Radiat Res*. 2004 Apr;161(4):481-92. doi: 10.1667/3148.
9. Likhtarev I, Bouville A, Kovgan L, Luckyanov N, Voillequé P, Chepurny M. Questionnaire- and measurement-based individual thyroid doses in Ukraine resulting from the Chernobyl nuclear reactor accident. *Radiat Res*. 2006 Jul;166(1 Pt 2):271-86. doi: 10.1667/RR3545.1.
10. Likhtarov 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 Mar;106(3):370-96. doi: 10.1097/HP.0b013e31829f3096.
11. Brenner AV, Tronko MD, Hatch M, Bogdanova TI, Oliynik VA, Lubin JH, et al. I-131 dose response for incident thyroid cancers in Ukraine related to the Chernobyl accident. *Environ Health Perspect*. 2011 Jul;119(7):933-9. doi: 10.1289/ehp.1002674.

12. Tronko M, Brenner AV, Bogdanova T, Shpak V, Oliynyk V, Cahoon EK, et al. Thyroid neoplasia risk is increased nearly 30 years after the Chernobyl accident. *Int J Cancer*. 2017 Oct 15;141(8):1585-8. doi: 10.1002/ijc.30857.
13. Little MP, Kukush AG, Masiuk SV, Shklyar S, Carroll RJ, Lubin JH, et al. Impact of uncertainties in exposure assessment on estimates of thyroid cancer risk among Ukrainian children and adolescents exposed from the Chernobyl accident. *PLoS One*. 2014 Jan 29;9(1):e85723. doi: 10.1371/journal.pone.0085723.
14. Likhtarov IA, Kovgan LM, Chepurny MI, Masiuk SV. Interpretation of results of radioiodine measurements in thyroid for residents of Ukraine (1986). *Probl Radiac Med Radiobiol*. 2015 Dec;20:185-203. English, Ukrainian.
15. 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 Jan;104(1):78-86. doi: 10.1097/HP.0b013e31826e188e.
16. Talerko MM, Lev TD, Drozdovitch VV, Masiuk SV. Reconstruction of the radioactive contamination of the territory of Ukraine by iodine-131 during initial period of the Chernobyl accident using the results from numerical model WRF. *Probl Radiac Med Radiobiol*. 2020 Dec;25:285-299. English, Ukrainian. doi: 10.33145/2304-8336-2020-25-285-299.
17. Masiuk S, Chepurny M, Buderatska V, Ivanova O, Boiko Z, Zhadan N, et al. 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. *Radiat Res*. 2023 Jan 1;199(1):61-73. doi: 10.1667/RADE-21-00152.1.
18. 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 Jun;100(6):583-93. doi: 10.1097/HP.0b013e3181ff391a.
19. Masiuk S, Chepurny M, Buderatska V, Ivanova O, Boiko Z, Zhadan N, et al. Thyroid doses for the Chernobyl Tissue Bank: improved estimates based on revised methodology and individual residence and diet history. *Radiat Environ Biophys*. 2025 Mar;64(1):85-98. doi: 10.1007/s00411-024-01099-8.
20. Masiuk SV, Chepurny MI, Buderatska VB, Ivanova OM, Boiko ZN, Zhadan NS, et al. Individual thyroid dose estimates for the genomic study of follicular carcinomas and adenomas in participants of the Chernobyl Tissue Bank. *Probl Radiac Med Radiobiol*. 2025 Dec;30:186-217. doi: 10.33145/2304-8336-2025-30-186-217.
21. 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 Dosimetry*. 2013 Oct;156(4):407-23. doi: 10.1093/rpd/nct096.
22. 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 Jun;45(2):143-6. doi: 10.2478/v10019-011-0008-5.
23. Doses to the embryo and fetus from intakes of radionuclides by the mother. A report of The International Commission on Radiological Protection. *Ann ICRP*. 2001;31(1-3):19-515. doi: 10.1016/S0146-6453(01)00022-7.
24. Balonov M, Kaidanovsky G, Zvonova I, Kovtun A, Bouville A, Luckyanov N, et al. Contributions of short-lived radioiodines to thyroid doses received by evacuees from the Chernobyl area estimated using early *in vivo* activity measurements. *Radiat Prot Dosimetry*. 2003;105(1-4):593-9. doi: 10.1093/oxfordjournals.rpd.a006309.
25. 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 Belarus-part I: (^{131}I) , short-lived radioiodines ((^{132}I) , (^{133}I)), and short-lived radiotelluriums ((^{131}MTe) and (^{132}Te)). *Health Phys*. 2004 Jun;86(6):565-85. doi: 10.1097/00004032-200406000-00002.
26. Mück K, Pröhl G, Likhtarev I, Kovgan L, Meckbach R, Golikov V. A consistent radionuclide vector after the Chernobyl accident. *Health Phys*. 2002 Feb;82(2):141-56. doi: 10.1097/00004032-200202000-00002.
27. Garner RJ. A mathematical analysis of the transfer of fission products to cows' milk. *Health Phys*. 1967 Feb;13(2):205-12. doi: 10.1097/00004032-196702000-00010.
28. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 2. Ingestion dose coefficients. A report of a Task Group of Committee 2 of the International Commission on Radiological Protection. *Ann ICRP*. 1993;23(3-4):1-167.
29. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 4. Inhalation dose coefficients. A report of a task group of Committee 2 of the International Commission on Radiological Protection. *Ann ICRP*. 1995;25(3-4):1-405. Erratum in: *Ann ICRP*. 2002;32(1-2):310.

Список скорочень

РЩЗ – рак щитоподібної залози

ЧАЕС – Чорнобильська атомна електростанція

ЩЗ – щитоподібна залоза

SYSTEM FOR RECONSTRUCTION OF INTERNAL THYROID DOSES OF UKRAINIAN RESIDENTS EXPOSED TO IODINE RADIONUCLIDES AS A RESULT OF THE CHERNOBYL ACCIDENT

**S.V. Masiuk¹, M.D. Tronko², M.I. Chepurny¹,
T.I. Bogdanova², V.B. Buderatska¹, G.A. Zamotayeva²,
N.S. Zhadan¹, V.M. Shpak², H.V. Chornovol¹, M.Yu. Bolgov²**

¹State Institution «National Research Center for Radiation Medicine, Hematology and Oncology of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine»

²State Institution «V.P. Komisarenko Institute of Endocrinology and Metabolism of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine»

Abstract. The increased incidence of thyroid cancer among individuals exposed to iodine radionuclides during childhood and adolescence is the main long-term consequence of the Chernobyl nuclear power plant (ChNPP) accident. Already 5–6 years after the accident, a sharp increase in the number of cases of thyroid cancer was recorded in children and adolescents living in radioactively contaminated areas of Ukraine. This phenomenon has led to a number of international radiation-epidemiological studies aimed at quantitatively assessing the risk of developing radiation-induced cancer and other thyroid diseases in individuals with the irradiated thyroid, which, in turn, requires determining the thyroid radiation doses of individuals involved in the study. **This study aimed** to review the current TD20 thyroid dosimetry system and the results of its application to reconstruct thyroid radiation doses received by the Ukrainian population in April–July 1986 as a result of iodine radionuclides intake into the body. **Material and methods.** Residents of Ukraine exposed to iodine radionuclides as a result of the Chernobyl accident were divided into four dosimetric groups based on the availability of thyroid radioactivity measurements and other information necessary for thyroid doses calculation. The methodology for reconstructing thyroid doses depends on the dosimetric group to which an individual belongs. Thyroid doses were calculated for the following exposure pathways: intake of (^{131}I) , as well as

$^{132}\text{Te}+^{132}\text{I}$ and ^{133}I through inhalation of radioactively contaminated air; and consumption of food products such as milk, dairy products, and leafy vegetables in the period from April 26 to July 14, 1986.

Results. The mean arithmetic value of thyroid radiation dose from ^{131}I radionuclide intake among 13.204 members of the Ukrainian-American cohort study (dosimetric group 1) was 527 mGy, and the median was 198 mGy. The mean arithmetic dose of thyroid radiation due to ^{131}I intake among 146.425 individuals whose thyroid activity was measured in May-June 1986 (dosimetry group 2) was 230 mGy, and the median dose was 94 mGy. The highest averaged and population-weighted thyroid doses (dosimetric group 3) were received by residents of Chernihiv (arithmetic mean is 150 mGy, median is 60 mGy), Kyiv (130 mGy and 51 mGy), and Zhytomyr (120 mGy and 49 mGy) Oblasts. Total prenatal and postnatal thyroid doses were calculated for 2.582 members of the Ukrainian cohort of individuals exposed to ^{131}I *in utero* (dosimetric group 4) and ranged from 0 to 2.7 Gy. The average total thyroid dose from ^{131}I was 87 mGy and the median was 17 mGy. The contribution of $^{132}\text{Te}+^{132}\text{I}$ and ^{133}I to the total thyroid dose was the largest for residents of Pripyat (22–40%, depending on age at the time of exposure). For residents of areas near the Chornobyl Nuclear Power Plant, it was 8–11%, and for residents of other areas it does not exceed 3%. **Conclusions.** The paper presents an updated system for reconstructing internal thyroid doses (TD20) of Ukrainian residents exposed to iodine radionuclides following the Chornobyl accident, as well as the results of applying this system to reconstruct thyroid doses: 13.204 members of the Ukrainian-American cohort study, 2.582 members of the Ukrainian cohort of individuals irradiated in utero, 146.425 individuals who had thyroid radioactivity measurement in May-June 1986, and residents of 30.353 settlements in 24 Oblasts of Ukraine, the Autonomous Republic Crimea, and the cities of Kyiv and Sevastopol.

Keywords: Chornobyl accident, radiation dose, thyroid gland, ^{131}I .

Для цитування: Масюк СВ, Тронько МД, Чепурний МІ, Богданова ТІ, Бударська ВБ, Замотаєва ГА, Жадан НС, Шпак ВМ, Чорновол ГВ, Болгов МЮ. Система реконструкції доз внутрішнього опромінення щитоподібної залози жителів України радіонуклідами йоду внаслідок аварії на Чорнобильській АЕС. Ендокринологія. 2026;31(1):73–87. DOI: 10.31793/1680-1466.2026.31-1.73.

Адреса для листування: Масюк Сергій Володимирович; masja1979@gmail.com; Державна установа «Національний науковий центр радіаційної медицини, гематології та онкології НАМН України», вул. Ю. Ілленка, 53, Київ 04050, Україна.

Відомості про авторів: Масюк Сергій Володимирович, канд. фіз.-мат. наук, завідувач лабораторії радіологічного захисту, ДУ «Національний науковий центр радіаційної медицини, гематології та онкології НАМН України», ORCID: 0000-0002-5123-9674; Тронько Микола Дмитрович, д-р мед. наук, чл.-кор. НАН України, акад. НАМН України, завідувач відділу фундаментальних та прикладних проблем ендокринології, в.о. директора ДУ «Інститут ендокринології та обміну речовин ім. В.П. Комісаренка НАМН України», ORCID: 0000-0001-7421-0981; Чепурний Микола Іванович, науковий співробітник лабораторії радіологічного захисту, ДУ «Національний науковий центр радіаційної медицини, гема-

тології та онкології НАМН України», ORCID: 0000-0001-9852-0669; Богданова Тетяна Іванівна, д-рка біол. наук, професорка, завідувачка лабораторії морфології ендокринної системи, ДУ «Інститут ендокринології та обміну речовин ім. В.П. Комісаренка НАМН України», ORCID: 0000-0001-5119-0236; Бударська Валентина Борисівна, наукова співробітниця лабораторії радіологічного захисту, ДУ «Національний науковий центр радіаційної медицини, гематології та онкології НАМН України», ORCID: 0000-0003-2120-4275; Замотаєва Галина Анатоліївна, канд. біол. наук, старш. наук. співроб., головна наукова співробітниця відділу фундаментальних і прикладних проблем ендокринології, ДУ «Інститут ендокринології та обміну речовин ім. В.П. Комісаренка НАМН України», ORCID: 0000-0002-2298-0105; Жадан Наталія Станіславівна, молодша наукова співробітниця лабораторії радіологічного захисту, ДУ «Національний науковий центр радіаційної медицини, гематології та онкології НАМН України», ORCID: 0009-0002-6776-9482; Шпак Віктор Михайлович, старший науковий співробітник відділу з питань медичних наслідків аварії на ЧАЕС та міжнародних відносин, ДУ «Інститут ендокринології та обміну речовин ім. В.П. Комісаренка НАМН України», ORCID: 0000-0002-6983-5490; Чорновол Галина Василівна, канд. філол. наук, старша наукова співробітниця відділу координації, планування та аналізу наукових досліджень, ДУ «Національний науковий центр радіаційної медицини, гематології та онкології НАМН України», ORCID: 0000-0002-3599-5154; Болгов Михайло Юрійович, д-р мед. наук, проф., завідувач відділу хірургії ендокринних залоз, ДУ «Інститут ендокринології та обміну речовин ім. В.П. Комісаренка НАМН України», ORCID: 0000-0002-9011-9982.

Особистий внесок: Тронько М.Д. – ідея публікації, обговорення отриманих результатів; Масюк С.В., Чепурний М. І. – розрахунок доз, участь у написанні рукопису; Жадан Н.С., Чорновол Г.В., Бударська В.Б. – проведення дозиметричних опитувань, редагування тексту; Замотаєва Г.А., Шпак В.М. – підготовка даних щодо членів Українсько-Американського когортного дослідження, участь у написанні рукопису; Болгов М.Ю., Богданова Т.І. – підготовка даних щодо суб'єктів Чорнобильського банку тканин, участь у написанні рукопису.

Фінансування: стаття підготовлена в рамках виконання науково-дослідних робіт: «Реконструкція індивідуалізованих доз опромінення мешканців Київської області, зареєстрованих у Державному реєстрі України осіб, які постраждали внаслідок Чорнобильської катастрофи» (номер державної реєстрації 0125U001228), «Розроблення системи оцінки доз опромінення щитоподібної залози у разі радіаційної аварії або застосування ядерної зброї» (номер державної реєстрації 0125U001235) та «Порівняльне дослідження проліферативної активності BRAFV600E-позитивних і BRAFV600E-негативних радіогенних і спорадичних ПТК у хворих різного віку з огляду на інвазійні властивості пухлин і післяопераційний перебіг захворювання» (номер державної реєстрації 0122U000544), профінансованих Національною академією медичних наук України.

Декларація з етики: автори задекларували відсутність конфлікту інтересів і фінансових зобов'язань.

Стаття: надійшла до редакції 16.03.2026 р.; перероблена 24.03.2026 р.; прийнята до друку 09.04.2026 р.; надрукована 20.04.2026 р.

For citation: Masiuk SV, Tronko MD, Chepurny MI, Bogdanova TI, Buderatska VB, Zamotayeva GA, Zhadan NS, Shpak VM, Chornovol HV, Bolgov MYu. System for reconstruction of internal thyroid doses

of Ukrainian residents exposed to iodine radionuclides as a result of the Chernobyl accident. *Endokrynologia*. 2026;31(1):73-87. DOI: 10.31793/1680-1466.2026.31-1.73.

Correspondence address: Masiuk Sergii Volodymyrovych; masja1979@gmail.com; State Institution «National Research Center for Radiation Medicine, Hematology and Oncology of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine», 53, Y. Illenko, str., Kyiv 04050, Ukraine.

Information about the authors: Masiuk Sergii Volodymyrovych, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Head of the Radiological Protection Laboratory, SI «National Research Center for Radiation Medicine, Hematology and Oncology of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine», ORCID: 0000-0002-5123-9674; Tronko Mykola Dmytrovych, Dr. of Sci. (Medicine), Prof., Corresponding Member of NAS of Ukraine, Academician of NAMS of Ukraine, Head of the Department of Fundamental and Applied Problems of Endocrinology, the acting Director of the SI «V.P. Komisarenko Institute of Endocrinology and Metabolism of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine», ORCID: 0000-0001-7421-0981; Chepurny Mykola Ivanovych, Researcher of the Radiological Protection Laboratory, SI «National Research Center for Radiation Medicine, Hematology and Oncology of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine», ORCID: 0000-0001-9852-0669; Bogdanova Tetiana Ivanivna, Dr. Sci. (Biology), Prof., Head of the Laboratory of Morphology of Endocrine System, SI «V.P. Komisarenko Institute of Endocrinology and Metabolism of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine», ORCID: 0000-0001-5119-0236; Buderatska Valentyna Borysivna, Researcher of the Radiological Protection Laboratory, SI «National Research Center for Radiation Medicine, Hematology and Oncology of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine», ORCID: 0000-0003-2120-4275; Zamotayeva Galyna Anatoliyivna, Cand. Sci. (Biology), Senior Research Fellow, Chief Researcher of the Department of Fundamental and Applied Problems of Endocrinology, SI «V.P. Komisarenko Institute of Endocrinology and Metabolism of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine», ORCID: 0000-0002-2298-0105; Zhadan Natalia Stanislavivna, Junior Researcher of the Radiological Protection Laboratory, SI «National Research Center for Radiation Medicine, Hematology and Oncology of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine», ORCID: 0009-0002-

6776-9482; Shpak Viktor Mykhailovych, Senior Researcher of the Department of Medical Consequences of the Chernobyl Accident and International Relations, SI «V.P. Komisarenko Institute of Endocrinology and Metabolism of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine», ORCID: 0000-0002-6983-5490; Chornovol Halyna Vasylivna, Cand. Sci. (Philology), Senior Researcher of the Department of Research Coordination, Planning and Analysis, SI «National Research Center for Radiation Medicine, Hematology and Oncology of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine», ORCID: 0000-0002-3599-5154; Bolgov Mykhailo Yuriyovych, Dr. Sci. (Medicine), Prof., Head of the Department of Endocrine Surgery, SI «V.P. Komisarenko Institute of Endocrinology and Metabolism of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine», ORCID: 0000-0002-9011-9982.

Personal contribution: Tronko M.D. – publication idea, discussion of the results obtained; Masiuk S.V., Chepurny M.I. – dose calculation, participation in writing the manuscript; Zhadan N.S., Chornovol H.V., Buderatska V.B. – conducting dosimetric interviewing and editing the text; Zamotayeva G.A., Shpak V.M. – data processing for the Ukrainian-American cohort study, participation in writing the manuscript; Bolgov M.Yu., Bogdanova T.I. – data processing for the Chernobyl Tissue Bank, participation in writing the manuscript.

Funding: the article was prepared as part of research works «Reconstruction of individualized radiation doses of residents of the Kyiv Oblast, registered in the State Register of Ukraine of persons affected by the Chernobyl disaster» (state registration number 0125U001228), «Development of the system of thyroid doses estimation in case of a radiation accident or the use of nuclear weapons» (state registration number 0125U001235) and «Comparative study of proliferative activity of BRAFV600E positive and BRAFV600E-negative radiogenic and sporadic papillary thyroid carcinomas in patients of different ages with regard to the tumors' invasive properties and postoperative follow-up» (state registration number 0122U000544) funded by the National Academy of Medical Sciences of Ukraine.

Declaration of ethics: authors have declared no conflicts of interest or financial obligations.

Article: received March 16, 2026; revised March 24, 2026; accepted April 09, 2026; published April 20, 2026.