

# Аналіз впливу радіаційної дифузії на організм людини: від уроків Чорнобиля до викликів сьогодення

## Analysis of the Impact of Radiation Diffusion on the Human Body: From the Lessons of Chernobyl to Contemporary Challenges

Артем Карпусь

ад'юнкт кафедри, e-mail: [karpusark@gmail.com](mailto:karpusark@gmail.com),  
<https://orcid.org/0000-0003-4652-9180>

ORCID ID:

Artem Karpus

PhD student, e-mail: [karpusark@gmail.com](mailto:karpusark@gmail.com),  
<https://orcid.org/0000-0003-4652-9180>

ORCID ID:

Національний університет оборони України, м. Київ, Україна

National Defense University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Received: February 20, 2026 | Revised: April 10, 2026 | Accepted: April 30, 2026

УДК 616-001.28:614.876

DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2026.16.2.14>

**Мета роботи.** Комплексне дослідження механізмів впливу міграції радіонуклідів на організм людини, аналіз патофізіологічних змін на основі досвіду Чорнобильської катастрофи та розробка рекомендацій щодо підвищення ефективності захисних систем.

**Метод дослідження.** Дизайн дослідження інтегрує методи радіобіології, системного аналізу та військової токсикології для вивчення масопереносу радіонуклідів. Методологія базується на комплексному аналізі патофізіологічних змін в організмі та ретроспективному дослідженні медичних наслідків Чорнобильської катастрофи.

**Результати дослідження.** Результати дослідження підтверджують, що міграція радіонуклідів у біологічних тканинах суттєво залежить від градієнта концентрації та структурних особливостей клітинних мембран. Доведено, що накопичення ізотопів призводить до глибоких патофізіологічних змін, зокрема порушення метаболічних процесів та цілісності геному. Ретроспективний аналіз наслідків аварії на ЧАЕС підтвердив кореляцію між інтенсивністю дифузійних процесів та ризиком виникнення хронічних патологій. Визначено, що ефективність деконтамінації безпосередньо залежить від оперативності впровадження системних захисних заходів, що мінімізують внутрішнє опромінення через ланцюги живлення та інгаляційні шляхи. Обґрунтовано необхідність оновлення протоколів радіаційної безпеки з урахуванням сучасних техногенних загроз.

**Теоретична цінність дослідження.** Теоретична цінність дослідження полягає в поглибленні наукових уявлень про механізми міграції радіонуклідів у біологічних середовищах. Робота розширює теоретичну базу радіобіології та військової токсикології шляхом інтеграції фізико-математичних моделей масопереносу з аналізом патофізіологічних реакцій організму. Сформований системний підхід дозволяє глибше обґрунтувати закономірності виникнення віддалених медичних наслідків радіаційного впливу. Крім того, дослідження закладає теоретичний фундамент для вдосконалення методології деконтамінації, адаптуючи ретроспективний досвід Чорнобильської катастрофи до сучасних викликів техногенної та військової безпеки біоструктур та захисних матеріалів через ефект Кіркендалла.

**Тип статті.** Оглядова.

**Ключові слова.** Міграція радіонуклідів, радіонукліди, внутрішнє опромінення, Чорнобильська катастрофа, радіоліз.

**Purpose.** A comprehensive study of the mechanisms of radiation diffusion's impact on the human body, an analysis of pathophysiological changes based on the experience of the Chernobyl disaster, and the development of recommendations to enhance the effectiveness of protective systems.

**Method.** The study integrates radiobiology, systems analysis, and military toxicology to examine radionuclide mass transfer. The methodology is based on a comprehensive analysis of pathophysiological changes and a retrospective study of the Chernobyl disaster's medical consequences. A systems approach links physical migration parameters with clinical radiation indicators. The findings are verified by radiation accident response experience, providing a basis for enhancing decontamination and personnel protection in modern environments.

**Findings.** The research results confirm that radionuclide migration in biological tissues significantly depends on the concentration gradient and the structural characteristics of cellular membranes. It is proven that isotope accumulation leads to profound pathophysiological changes, including disruption of metabolic processes and genomic integrity. A retrospective analysis of the Chernobyl disaster's consequences confirmed a correlation between the intensity of diffusion processes and the risk of developing chronic pathologies. It was determined that decontamination effectiveness directly depends on the promptness of implementing systemic protective measures that minimize internal radiation exposure through food chains and inhalation pathways. The study justifies the need to update radiation safety protocols to account for modern technological threats.

**Theoretical implications.** The theoretical value of the study lies in deepening scientific understanding of radionuclide migration mechanisms within biological environments. The work expands the theoretical framework of radiobiology and military toxicology by integrating physical and mathematical mass transfer models with the analysis of pathophysiological body reactions. The established systems approach allows for a more profound justification of the patterns underlying long-term medical consequences of radiation exposure. Furthermore, the research provides a theoretical foundation for improving decontamination methodology by adapting the retrospective lessons of the Chernobyl disaster to modern technological and military security challenges.

**Paper type.** Analytic.

**Key words.** Radiological Diffusion, Radionuclides, Internal Irradiation, Chernobyl Catastrophe, Radiolysis.

## **Вступ**

Проблема радіаційної безпеки в сучасному світі набуває нових, складніших форм, що вимагає переосмислення фундаментальних механізмів впливу іонізуючого випромінювання на живі системи. Одним із найменш вивчених, але критично важливих аспектів є міграція радіонуклідів — процес масопереносу радіонуклідів, що визначає динаміку внутрішнього опромінення організму. Досвід Чорнобильської катастрофи продемонстрував, що саме накопичення ізотопів у тканинах через дифузійні процеси спричиняє найбільш тяжкі патофізіологічні наслідки, які тривають десятиліттями.

В теперішній час, у період 2022–2026 років, актуальність цієї теми загострюється через військову агресію РФ проти України. Бойові дії в зонах радіоактивного забруднення, пожежі та фортифікаційні роботи провокують ефект «зворотної дифузії», повертаючи небезпечні нукліди в біологічний колообіг. Це створює безпрецедентні ризики для здоров'я військовослужбовців та цивільного населення.

Метою статті є комплексний огляд механізмів міграції радіонуклідів, аналіз її впливу на клітинному рівні та розробка практичних рекомендацій для модернізації систем захисту. Розуміння фізико-хімічної природи міграції ізотопів є необхідною умовою для формування національної стійкості перед обличчям сучасних ядерних загроз.

## **Теоретичні основи дослідження**

Теоретичні основи дослідження базуються на інтеграції фундаментальних положень радіобіології, фізики міграції радіонуклідів та військової токсикології, де організм людини розглядається як складна гетерогенна система, а рух радіонуклідів підпорядковується фізико-хімічним закономірностям розподілу речовин у рідинах та через клітинні мембрани. Радіобіологічна парадигма роботи спирається на теорію прямої та непрямої дії іонізуючого випромінювання на ДНК і біополімери, що пояснює виникнення соматичних та генетичних ефектів у тканинах. Важливою складовою є системний аналіз наслідків Чорнобильської катастрофи, який виступає теоретичним базисом для моделювання сценаріїв внутрішнього опромінення та оцінки ризиків у сучасних умовах. Методологія деконтамінації в роботі обґрунтовується через динаміку накопичення та виведення ізотопів, що дозволяє формувати стратегії мінімізації шкоди для здоров'я при виникненні новітніх техногенних та військових радіаційних загроз.

## **Постановка проблеми**

Сучасні виклики національній безпеці України, зумовлені повномасштабною агресією російської федерації, актуалізують питання захисту від хімічних та радіаційних загроз. Одним із фундаментальних механізмів ураження в таких умовах є дифузія — процес неконтрольованого масопереносу частинок у навколишнє середовище та біологічні тканини. Чорнобильська катастрофа 1986 року стала наймасштабнішим прикладом того, як міграція радіонуклідів трансформує локальний інцидент у глобальну екологічну трагедію, де головним чинником ураження стає внутрішнє накопичення радіонуклідів [8]. Розуміння дифузії як “невидимої сили” дозволяє науково обґрунтувати недоліки засобів індивідуального захисту та розробити стратегії виживання людини в контамінованих зонах [3, 12].

## **Результати**

### **1. Міграція радіонуклідів**

Під “міграцією радіонуклідів” в екології зазвичай розуміють сукупність процесів переміщення радіонуклідів. Основними ізотопами, що визначають радіологічну ситуацію сьогодні, є Цезій-137 ( $^{137}\text{Cs}$ ) та Стронцій-90 ( $^{90}\text{Sr}$ ).

Дифузія визначає динаміку перетворення локального зараження на об'ємну зону ураження.

Міграція радіонуклідів в організмі людини стосується процесів кінетики радіонуклідів – їхнього надходження, переміщення (транспортування) та перерозподілу між тканинами, рідкими середовищами в організмі людини та її органами [2]. Цей процес регулюється законами дифузії, осмосу та активного біологічного транспорту. На відміну від зовнішнього опромінення [2], внутрішня дифузія ізотопів створює пролонговане радіаційне навантаження на критичні органи.

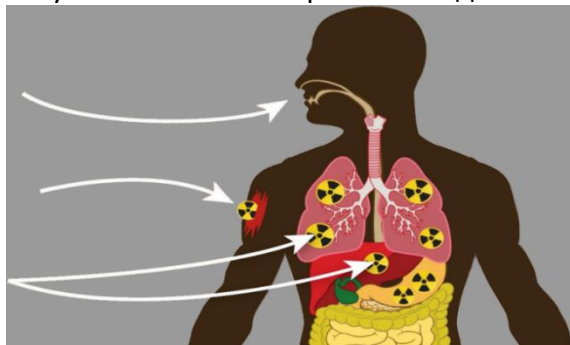
У військової діяльності, дифузія є основним механізмом перетворення локального джерела радіаційного зараження (наприклад, місця розриву снаряда) у об'ємну зону ураження, або подальше розповсюдження зараження шляхом контакту із чинником [4] (або результатом) зараження, що утворює перехресне зараження у подальшому.

Радіонукліди потрапляють до внутрішнього середовища організму людини трьома основними шляхами (Рисунок 1), а саме:

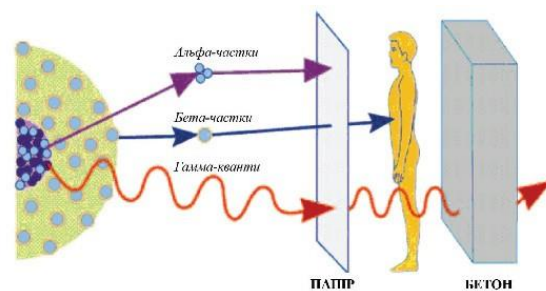
1. Інгаляційний шлях. Газоподібні сполуки та аерозолі дифундують через альвеолярно-капілярну мембрану. Швидкість дифузії залежить від дисперсності часток. Частки розміром  $d < 0.5$  мкм проникають безпосередньо в кров, оминаючи захисні бар'єри верхніх дихальних шляхів.

2. Пероральний шлях. Найбільш масовий шлях у постійних умовах забруднення. Дифузія відбувається через слизову оболонку шлунково-кишкового тракту (ШКТ). Інтенсивність залежить від хімічної валентності елемента та його розчинності.

3. Перкутанний шлях (рисунок 2). Дифузія через непошкоджену шкіру є обмеженою, проте для тритію ( $^3H$ ) та деяких органічних сполук, вона є значущим фактором ризику [1], що має суттєвий вплив на організм людини.



**Рисунок 1:** Шляхи потрапляння радіоактивних часток в організм людини [21]



**Рисунок 2:** Потрапляння радіоактивних часток в організм людини перкутанним шляхом

Після потрапляння в системний кровотік, починається наступний етап міграції радіонуклідів [2]. Організм людини часто не розрізняє радіоактивні ізотопи [1] та їхні стабільні хімічні аналоги, через що відбувається помилкове вбудовування радіонуклідів у метаболічні цикли, а саме:

**Остеотропна група.** Такі елементи, Стронцій-90 ( $^{90}Sr$ ) та Радій-226 ( $^{226}Ra$ ) дифундують у кісткову тканину, заміщуючи кальцій. Це призводить до опромінення гемопоетичної (кровотворної) системи.

**Тиреотропна група.** Ізотопи Йоду ( $^{131}I$ ) концентруються у щитоподібній залозі за допомогою активного транспорту, де рівень концентрації може у тисячі разів перевищувати рівень у крові [12].

Приклади впливу на організм радіоактивних елементів, а також їх властивості наведені у таблиці 1.

**Таблиця 1:** Вплив на організм радіоактивних елементів

Радіоактивний Елемент	Властивості	Шляхи потрапляння	Вплив на організм
<b>Йод-131</b>	Гамма- та бета- випромінювач, накопичується щитовидній залозі	Шкіра, дихальні шляхи, їжа	Викликає ураження щитовидної залози, особливо небезпечний у перші 1,5–2 місяці.
<b>Цезій-134, Цезій-137</b>	Бета-гамма- випромінювачі	Шлунково-кишковий тракт, дихальні шляхи	Рівномірно розподіляються в організмі, накопичуються в м'язах, печінці та нирках.
<b>Стронцій-89, Стронцій-90</b>	Бета-гамма- випромінювачі	Шлунково-кишковий тракт, дихальні шляхи	Накопичуються в кістках, уражають кістковий мозок.
<b>Плутоній-239</b>	Довгоживучий ізоотоп, високотоксичний	Шкіра, дихальні шляхи, їжа	Накопичується в кістках, підвищує ризик розвитку пухлин та ураження кісткового мозку.

*Джерело: розроблено автором*

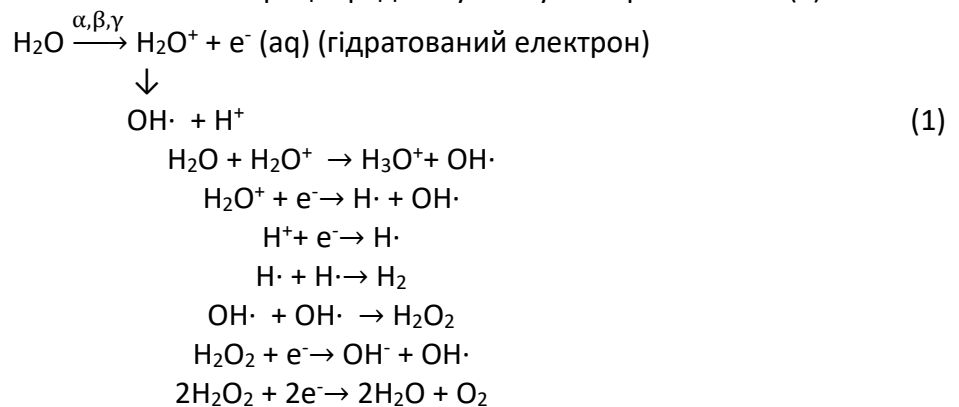
Пряма дія випромінювання це процес, коли іонізуюча частинка безпосередньо взаємодіє з макромолекулами. Найкритичнішим є пошкодження ДНК:

одинарні та подвійні розриви ланцюгів;

виникнення зшивок “білок-ДНК” [2];

порушення генетичного коду, що веде до мутагенезу або апоптозу клітини.

Непрямою дією та радіолізом води є те, що клітина складається з води на 70-80 %, основна енергія випромінювання поглинається нею. Процес радіолізу описується рівняннями (1):



Утворення вільних радикалів (зокрема гідроксильного радикалу·OH) запускає ланцюгові реакції перекисного окиснення ліпідів, що руйнує клітинні мембрани [2].

**Таблиця 2:** Приклади міграції радіонуклідів на історичних подіях

Подія	Ключовий радіоактивний елемент	Орган, що уражено у більшості	Основний шлях потрапляння в організм
<b>Чорнобиль, Україна</b>	Йод-131	Щитоподібна залоза	Харчовий
<b>Фукусіма, Японія</b>	Цезій-137	М'язи, серце	Вода, морепродукти
<b>Гоянія, Бразилія</b>	Цезій-137 (порошок)	Весь організм	Контактний/Пероральний
<b>Ядерні тести</b>	Стронцій-90	Кістки, зуби	Опади →трава, кущі, дерева→тварини→їжа (як наслідок всього ланцюга)

*Джерело: розроблено автором*

## 2. Чорнобиль. Міграція радіонуклідів та внутрішнє опромінення

Чорнобильська катастрофа стала головним джерелом даних про біологічну тропність (вибірковість) радіонуклідів (Дифузія  $^{131}I$  та  $^{137}Cs$ ) [13].

У перші тижні після аварії основним чинником ураження був  $^{131}I$ . Через вживання забрудненого молока радіоактивний йод потрапляв у шлунково-кишковий тракт (ШКТ), звідки дифундував у кров і вибірково накопичувався в щитоподібній залозі. Це призвело до різкого зростання випадків раку щитоподібної залози серед дітей (понад 6000 випадків за наступні 20 років), оскільки дитячий орган має інтенсивніший метаболізм.

$^{137}Cs$  став довгостроковим фактором. Будучи аналогом калію, він дифундує по всьому тілу, але найбільше концентрується в м'язах. Також,  $^{137}Cs$  вбудовується в кістки та зуби, через свої подібні до калію фізико-хімічні властивості (обидва розташовані в групі лужноземельних металів, мають однакову валентність +2 та схожий радіус іонів). Дослідження дітей у Гомельській області (Білорусь) у 1990-х роках виявили пряму залежність між рівнем накопиченого цезію в м'яких тканинах та частотою патологій серцево-судинної системи та нирок.

Внутрішня дифузія викликає радіоліз клітинної води — утворення вільних радикалів (H•, OH•). Вони дифундують до ядра клітини, атакуючи молекули ДНК, що стає причиною онкогенезу та генетичних мутацій, зафіксованих у тисяч ліквідаторів [10].

Внутрішнє опромінення (інкорпорація) вважається небезпечнішим за зовнішнє, оскільки джерело випромінювання знаходиться в безпосередньому контакті з тканинами.

### 2.1. Міграція радіонуклідів та міграція радіонуклідів у Чорнобильській екосистемі.

Стало зрозуміло, що після аварії 1986 року Чорнобильська зона відчуження (ЧЗВ) перетворилася на гігантську природну лабораторію. Питання того, як відбувається міграція радіонуклідів у ґрунті, воді та іншому, є і досі критичним для безпеки не лише України, а й усієї Європи. Одразу після аварії почалася відбуватися неконтрольована вертикальна та горизонтальна дифузія.

**Таблиця 3:** Специфіка життєвого циклу поширених ізотопів

Ізотоп	Період напіврозпаду	Характер дифузії	Поведінка в екосистемі
Цезій-137	~30 років	Повільна	Сильно фіксується глинистими мінералами ґрунту. Мігрує переважно з пилом або ерозією (аналог калію).
Стронцій-90	~28.8 років	Швидка	Має високу рухливість у водних розчинах. Легко поглинається корінням рослин (аналог кальцію).
Америцій-241	432 роки	Зростаюча	Утворюється внаслідок розпаду Плутонію-241. Його концентрація в зоні наразі зростає.

*Джерело:* розроблено автором

Вертикальна міграція це повільний рух радіонуклідів вниз по ґрунтовому профілю. У перші роки після аварії більшість речовин була зосереджена в лісовій підстилці та верхньому шарі ґрунту (0–5 см). Дифузійне проникнення відбувається на молекулярному рівні через пори ґрунту, заповнені водою. Конвективний перенос- переміщення разом із потоками дощової та талої води.

Вода є головним вектором горизонтальної дифузії. Під час весняних паводків радіонукліди вимиваються з пойми річки Прип'ять. Процес описується рівнянням дифузії з урахуванням сорбції:

$$\frac{dC}{dt} = D \frac{d^2c}{dx^2} - V \frac{dC}{dx} - \lambda C \quad (2)$$

де	$dc/dt$	– швидкість зміни концентрації в часі в певній точці (просторі);
	$dc$	– нескінченно мала;
	$dt$	– нескінченно малий проміжок часу;
	$D$	– коефіцієнт дифузії;
	$C$	– концентрація радіонукліда;
	$v$	– швидкість потоку води;
	$\lambda$	– константа радіоактивного розпаду;
	$d^2c/dx^2$	– друга похідна концентрації за координатою.

## 2.2. Хронічні наслідки для мешканців, що потрапили в зону зараження

Основна небезпека полягає не лише в моменті самого вибуху чи аварії, а в тривалому впливі малих доз радіації [19]. Хронічні наслідки розвиваються поступово — через місяці, роки, десятиліття після початку опромінення. Основними аспектами впливу на здоров'я людини є: стохастичні (імовірнісні) ефекти;

вплив на генетику та репродуктивну систему;  
соматичні порушення (хронічна променева хвороба).

Найбільшому впливу піддалися кісткові тканини, системи кровотворення, серцево-судинна та ендокринна система організму.

$^{90}\text{Sr}$  накопичуючись у кістках, він опромінює червоний кістковий мозок. Це підвищує ризик розвитку лейкозів (раків крові) та остеосарком (новоутворення та пухлини).

$^{137}\text{Cs}$  у разі накопичення цезію в серцевому м'язі (міокарді) [12] може призводити до порушення ритму та передчасного старіння серця [16].  $^{137}\text{Cs}$  та  $^{90}\text{Sr}$  можуть призводити до раку легень, шлунку та молочної залози.

Хоча радіоактивний йод  $^{131}\text{I}$  вже давно розпався, тривалий вплив інших ізотопів продовжує пригнічувати імунну систему, викликаючи стан, який часто називають вторинним імунодефіцитом [11].  $^{131}\text{I}$  накопичується в щитоподібній залозі, викликаючи рак (особливо у дітей).

Радіація пошкоджує структуру ДНК [20] у статевих клітинах, що може не впливати на саму людину, але позначитися на її репродуктивній функції та нащадках. Результатом цього є генетичні мутації. Саме ці мутації підвищують ризик народження дітей з вродженими вадами розвитку або спадковими хворобами. Іншим небезпечним прикладом негативного радіоактивного впливу є тартогенний ефект. У випадку коли, вагітна жінка отримала дозу опромінення – це створює ризик порушення розвитку плоду, мікроцефалії або зниження IQ дитини [18].

При тривалому перебуванні в зоні радіаційного зараження, або його тривалому впливі на людину, організм не встигає відновлювати пошкоджені тканини. Радіація пошкоджує внутрішню стінку судин (ендотелій), що веде до ранніх інфарктів, інсультів та гіпертонії. Іншим прикладом соматичного порушення є вплив радіації на зір. Кристалик ока дуже чутливий до радіації. Хронічне опромінення викликає його помутніння, що може призвести до сліпоты [20]. Окремим впливом на людину є зниження здатності організму боротися з будь-якими інфекціями.

Приклади впливу на організм наведені у таблиці 4.

**Таблиця 4:** Ризики впливу радіонуклідів

Радіоактивний елемент	Куди потрапляє в організмі	Основний ризик для організму
$^{131}\text{I}$	Щитоподібна залоза	Рак щитоподібної залози
$^{137}\text{Cs}$	М'язи та м'які тканини замість калію)	Загальне опромінення, саркоми
$^{90}\text{Sr}$	Кісткова тканина (замість кальцію)	Лейкоз, рак кісток

*Джерело: розроблено автором*

Зафіксовані випадки, коли генетичні хвороби виникали внаслідок радіоактивного впливу. Такими прикладами є деякі типи інтерсексуальності, або хвороба Дауна.

Окремої уваги потребує радіаційний вплив на ментальне здоров'я людини, а саме на психосоматичні наслідки. Не варто недооцінювати “ефект радіофобії”. Постійний стрес від перебування на небезпечній території, страх за майбутнє дітей та зміна способу життя (обмеження у вживанні місцевих продуктів, контакту з флорою та фауною) призводять до хронічної депресії, тривожних розладів, порушень сну, хронічної втоми, психосоматичних хвороб (виразкок, гастритів) та іншого.

### 3. Сучасний стан та прогнози (до 2027 року)

Станом на сьогодні, більшість радіонуклідів проникла та осіла на глибині 10–20 см [21]. Це зменшує рівень зовнішнього гамма-випромінювання на поверхні, але робить радіацію доступною для глибокої кореневої системи дерев та ґрунтових вод.

Головними викликами перехресного забруднення сьогодення стали трансуранові елементи та вплив бойових дій в районах наявності радіоактивного впливу. Трансуранові елементи [22], а саме плутоній та америцій залишатимуться в зоні тисячі років. Прикладами наслідків бойових дій є Чорнобильській зоні під час російсько-української війни стали такі чинники, як окопи, рух важкої техніки та пожежі внаслідок вогню артилерії, що порушує стабільні шари ґрунту, спричиняючи вторинне підняття радіоактивного пилу (рисунок 3, 4).



**Рисунок 3:** Фортифікаційне облаштування позицій армії рф в Чорнобильській зоні, 2022 рік [17]



**Рисунок 4:** Залишки побуту армії рф в Чорнобильській зоні, 2022 рік [17]

Станом на 2026 рік рівень радіації в повітрі в більшості міст навколо зони (наприклад, у

Славутич або Іванкове) є в межах норми [7]. Однак міграція радіонуклідів в продукти харчування залишається локальною проблемою.

Людина може отримувати 80–90% своєї річної дози радіації не від прогулянок лісом, а через споживання локального молока, домашнього сиру або сушених лісових грибів, зібраних у “неперевічених” місцях.

Основною проблемою 2026 року стало пероральне надходження радіонуклідів [6] (через їжу). Радіонукліди не зникли, вони змінили своє місце перебування. Наприклад з поверхні листя вони перейшли в кореневу систему рослин.

Для мешканців Полісся та прилеглих територій основними шляхами потрапляння радіонуклідів в організм людини стали молоко, м'ясо, гриби, ягоди та річкову рибу [9].

## **Висновки**

За результатами проведеного дослідження “Вплив міграції радіонуклідів на організм людини: від уроків Чорнобиля до викликів сьогодення”, доцільно стверджувати, що дифузія є фундаментальним фізико-хімічним механізмом, який визначає динаміку трансформації локальних радіаційних або хімічних інцидентів у масштабні екологічні та гуманітарні катастрофи. Основний висновок дослідження полягає в тому, що саме дифузійні процеси забезпечують міграція радіонуклідів у біологічні тканини, що призводить до пролонгованого внутрішнього опромінення, яке за своїми наслідками є значно небезпечнішим за зовнішній гамма-фон. Відомим фактом є те, що людський організм неспроможний ефективно розрізняти радіоактивні ізотопи та їхні стабільні аналоги, через що продовжується міграція радіонуклідів, а саме  $^{90}\text{Sr}$  накопичується в кістках, заміщуючи кальцій, а  $^{131}\text{I}$  — у щитоподібній залозі. Патологіологічний аналіз свідчить, що на клітинному рівні міграція радіонуклідів спричиняє радіоліз води та утворення вільних радикалів, які запускають ланцюгові реакції перекисного окиснення ліпідів, руйнуючи мембрани та викликаючи незворотні мутації в ДНК.

Станом на 2026 рік ситуація в Чорнобильській зоні та на прилеглих територіях Полісся демонструє нові критичні тенденції: радіонукліди дифундували вглиб ґрунту на 10–20 см, інтегрувавшись у кореневі системи рослин, що зробило харчовий ланцюг (молоко, гриби, ягоди, риба) основним джерелом формування внутрішньої дози опромінення населення прилеглих територій. Повномасштабна війна додала фактор “зворотної дифузії”, коли через фортифікаційні роботи та пожежі радіоактивний пил знову піднімається в атмосферу. Узагальнюючи ці дані, стає очевидним, що традиційні засоби індивідуального захисту часто мають обмежену ефективність проти дифузії ультрадисперсних часток ( $d < 0,5$  мкм) та газоподібних сполук, що вимагає перегляду стандартів безпеки.

Перспективи подальших досліджень у даному напрямі мають бути зосереджені на розробці багатокомпонентних математичних моделей, які б враховували конвективний перенос та сорбційні властивості сучасних будівельних і захисних матеріалів в умовах бойових дій. Особливої уваги потребує вивчення «ефекту накопичення» трансуранових елементів, зокрема Америкацію-241 ( $^{241}\text{Am}$ ), концентрація якого в екосистемах з часом лише зростатиме. Пріоритетним вектором є створення інтелектуальних систем онлайн-моніторингу, здатних прогнозувати дифузійне поширення забруднювачів у реальному часі під час техногенних аварій або застосування хімічної зброї.

Також наукова зацікавленість становить пошук нових біохімічних антиоксидантів та ентеросорбентів, здатних блокувати дифузію радіонуклідів через слизові оболонки шлунково-кишкового тракту. Окремим напрямом має стати дослідження психосоматичних наслідків тривалого проживання в умовах дифузійного забруднення, що дозволить розробити ефективні методики реабілітації для ветеранів, що приймали участь у веденні бойових дій в зоні ЧАЕС та цивільного населення.

## Фінансування

Це дослідження не отримало конкретної фінансової підтримки.

## Конкуруючі інтереси

Автори заявляють, що у них немає конкуруючих інтересів.

## Список використаних джерел:

1. Fick, A. (1855). On diffusion. *Annalen der Physik*. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/andp.18551700105>
2. Darken, L. S. (1948). Diffusion and mobility. *Transactions of the AIME*. <https://doi.org/10.1007/BF02670941>
3. Nastar M., Soisson F. Radiation-Induced Segregation. *Comprehensive Nuclear Materials*. 2012. Vol. 1. P. 453–481. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-056033-5.00015-8>.
4. Надання медичної допомоги при ураженні хімічними агентами : методичні рекомендації / МОЗ України. Київ, 2022. 54 с.
5. Захист населення у разі ядерної або радіологічної аварії : посібник з безпеки № GSG-11 / МАГАТЕ. Відень, 2018. 182 с. (Серія норм безпеки МАГАТЕ).
6. Mechanisms of radiation-induced genomic instability and bystander effects. *Radiation Research*. 2025. Vol. 203. № 4. P. 312–335. DOI: <https://doi.org/10.1667/RR2025>
7. Sources and effects of ionizing radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) 2020/2021 report. New York, NY : United Nations, 2021. Vol. I : Report to the General Assembly, Scientific Annex A. 248 p.
8. Handbook on irritants and TICs (Chlorine, Ammonia) / OPCW. The Hague : Technical Secretariat, 2023. 112 p.
9. National stockpiles for radiological and nuclear emergencies: policy advice / WHO. Geneva : World Health Organization, 2023. 84 p. URL: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240067875>
10. Методичні рекомендації щодо організації радіаційного та хімічного спостереження в умовах воєнного стану : затв. ДСНС України 25.04.2022. Київ, 2022. 28 с..
11. Окупанти і "Рудий ліс": які наслідки для здоров'я загарбників матиме перебування в зоні відчуження. (2022, 7 квітня). *LB.ua*. Отримано з [https://lb.ua/society/2022/04/07/512613\\_okupanti\\_i\\_rudiy\\_lis\\_naslidki.html](https://lb.ua/society/2022/04/07/512613_okupanti_i_rudiy_lis_naslidki.html)
12. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection : ICRP Publication 103 / International Commission on Radiological Protection. Oxford ; New York : Sage, 2007. 332 p. (Annals of the ICRP ; vol. 37, no. 2–4).
13. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. (2011). *Sources and effects of ionizing radiation, UNSCEAR 2008 report: Scientific annexes C, D and E*. United Nations.
14. World Health Organization. (2006). *Health effects of the Chernobyl accident and special health care programmes: Report of the UN Chernobyl Forum Expert Group "Health"*. Отримано з <https://www.who.int/publications/i/item/9241594179>
15. 30 років Чорнобильської катастрофи: від екстремальної ситуації до сталого розвитку : нац. доп. України / Нац. комісія з радіац. захисту населення України [та ін.]. Київ : ДП «Інформ.-аналіт. агентство», 2016. 232 с.
16. Health effects of the Chernobyl accident: 32 years of follow-up / D. A. Bazyka, A. Ye. Prysyzhnyuk, N. A. Gudzenko et al. *Radiation Hygiene*. 2018. Vol. 11. № 3. P. 10–22. DOI: <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2018-11-3-10-22>.

17. Український гідрометеорологічний інститут. (2026). *Прогноз розповсюдження радіонуклідів при транскордонному перенесенні та локальних пожежах*. Отримано з <http://uhmi.org.ua/radio/>
18. Про стан радіаційної ситуації в зоні відчуження та на прилеглих територіях : щорічна аналітична доповідь за 2024 рік / Держ. агентство України з управління зоною відчуження. Київ : Міндовкілля, 2025. 142 с
19. Екологічні наслідки Чорнобильської аварії: динаміка переходу радіонуклідів у харчові ланцюги (2020–2026) / МАГАТЕ. Відень : IAEA Publications, 2024. 156 с.
20. Preparedness and response for a nuclear or radiological emergency : general safety requirements № GSR Part 7 / IAEA. Vienna : International Atomic Energy Agency, 2020. 122 p. (IAEA Safety Standards Series)
21. Occupational Radiological Protection in Interventional Procedures : ICRP Publication 152 / International Commission on Radiological Protection. Ottawa : Sage, 2023. 172 p. (Annals of the ICRP ; vol. 52, no. 1).
22. Recent advances in internal dosimetry and microdosimetry for radiation protection. *Journal of Radiological Protection*. 2024. Vol. 44. № 2. P. 145–168. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6498/2024>.

## References

1. Fick, A. (1855). On diffusion. *Annalen der Physik*. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/andp.18551700105>
2. Darken, L. S. (1948). Diffusion and mobility. *Transactions of the AIME*. <https://doi.org/10.1007/BF02670941>
3. Nastar, M., & Soisson, F. (2012). Radiation-induced segregation. In *Comprehensive Nuclear Materials* (Vol. 1, pp. 453–481). <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-056033-5.00015-8>
4. Ministerstvo okhorony zdorovia Ukrainy. (2022). *Nadannia medychnoi dopomohy pry urazhenni khimichnyimi ahentamy: Metodychni rekomendatsii* [Provision of medical care in case of chemical exposure]. Kyiv.
5. International Atomic Energy Agency. (2018). *Protection of the public in the event of a nuclear or radiological emergency (GSG-11)*. Vienna.
6. *Mechanisms of radiation-induced genomic instability and bystander effects*. (2025). *Radiation Research*, 203(4), 312–335. <https://doi.org/10.1667/RR2025>
7. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. (2021). *Sources and effects of ionizing radiation: UNSCEAR 2020/2021 report* (Vol. I). United Nations.
8. Organisation for the Prohibition of Chemical Weapons. (2023). *Handbook on irritants and toxic industrial chemicals (chlorine, ammonia)*. The Hague: Technical Secretariat.
9. World Health Organization. (2023). *National stockpiles for radiological and nuclear emergencies: Policy advice*. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240067875>
10. Derzhavna sluzhba Ukrainy z nadzvychainykh sytuatsii. (2022). *Metodychni rekomendatsii shchodo orhanizatsii radiatsiinoho ta khimichnoho sposterezhenia v umovakh voiennoho stanu* [Methodical recommendations on the organization of radiological and chemical monitoring under martial law]. Kyiv.
11. LB.ua. (2022, April 7). *Okupanty i "Rudyi lis": Yaki naslidky dlia zdorovia zaharbnykiv matyme perebuvannia v zoni vidchuzhennia* [Occupiers and the "Red Forest": Health consequences of staying in the exclusion zone]. [https://lb.ua/society/2022/04/07/512613\\_okupanti\\_i\\_rudiy\\_lis\\_naslidki.html](https://lb.ua/society/2022/04/07/512613_okupanti_i_rudiy_lis_naslidki.html)
12. International Commission on Radiological Protection. (2007). *The 2007 recommendations of the ICRP (Publication 103)*. Sage.

13. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. (2011). *Sources and effects of ionizing radiation: UNSCEAR 2008 report*. United Nations.
14. World Health Organization. (2006). *Health effects of the Chernobyl accident and special health care programmes*. <https://www.who.int/publications/i/item/9241594179>
15. Natsionalna komisiiia z radiatsiinoho zakhystu naselennia Ukrainy. (2016). *30 rokiv Chornobylskoi katastrofy: Vid ekstremalnoi sytuatsii do staloho rozvytku* [30 years of the Chernobyl disaster: From extreme situation to sustainable development]. Kyiv.
16. Bazyka, D. A., Prysyazhnyuk, A. Ye., Gudzenko, N. A., et al. (2018). Health effects of the Chernobyl accident: 32 years of follow-up. *Radiation Hygiene*, 11(3), 10–22. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2018-11-3-10-22>
17. Ukrainyskyi hidrometeorolohichnyi instytut. (2026). *Prohnoz rozpovsiudzhennia radionuklidiv pry transkordonnomu perenesenni ta lokalnykh pozhezhakh* [Forecast of radionuclide dispersion during transboundary transport and local fires]. <http://uhmi.org.ua/radio/>
18. Derzhavne ahentstvo Ukrainy z upravlinnia zonoju vidchuzhennia. (2025). *Pro stan radiatsiinoi sytuatsii v zoni vidchuzhennia ta na prylehlykh terytoriiakh: Shchorichna dopovid za 2024 rik*. Kyiv: Mindovkillia.
19. International Atomic Energy Agency. (2024). *Environmental consequences of the Chernobyl accident: Dynamics of radionuclide transfer in food chains (2020–2026)*. Vienna.
20. International Atomic Energy Agency. (2020). *Preparedness and response for a nuclear or radiological emergency (GSR Part 7)*. Vienna.
21. International Commission on Radiological Protection. (2023). *Occupational radiological protection in interventional procedures (Publication 152)*. Sage.
22. *Recent advances in internal dosimetry and microdosimetry for radiation protection*. (2024). *Journal of Radiological Protection*, 44(2), 145–168. <https://doi.org/10.1088/1361-6498/2024>



This is an open access journal and all published articles are licensed under a Creative Commons «Attribution» 4.0.