

УДК 614.876:616-055.6:577.122:616-092.4

DOI <https://doi.org/10.32782/2519-4151-2025-1-7>

А. А. Костіна

ORCID ID: 0000-0001-7731-8015

Г. Ф. Степанов, д-р мед. наук, проф.

ORCID ID: 0000-0002-8242-8689

А. А. Дімова

ORCID ID: 0000-0002-3355-6799

Є. Є. Пелехович

ORCID ID: 0009-0000-6349-6507

МЕХАНІЗМИ ВПЛИВУ РІЗНИХ ДОЗ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА КЛІТИННІ СТРУКТУРИ ТА ОРГАНІЗМ: ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Одеський національний медичний університет, Одеса, Україна

УДК 614.876:616-055.6:577.122:616-092.4

А. А. Костіна, Г. Ф. Степанов, А. А. Дімова, Є. Є. Пелехович

**МЕХАНІЗМИ ВПЛИВУ РІЗНИХ ДОЗ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ
НА КЛІТИННІ СТРУКТУРИ ТА ОРГАНІЗМ: ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ**

Одеський національний медичний університет, Одеса, Україна

Дослідження механізмів впливу різних доз іонізуючого випромінювання на живі організми є вкрай важливими, оскільки вони дозволяють зрозуміти, як радіація впливає на клітинні структури, тканини та організм загалом. Такі дослідження мають як фундаментальне, так і прикладне значення. У роботі проведено аналіз сучасних літературних джерел, присвячених оцінюванню змін, які відбуваються на клітинному, генетичному та організмовому рівнях під впливом різних доз випромінювання. Встановлено, що навіть низькі дози випромінювання здатні викликати порушення стабільності геному, зміни у функціонуванні імунної системи та когнітивні розлади, тоді як високі дози значно підвищують ризик онкологічних та соматичних захворювань. Отримані дані підкреслюють складність і багатогранність впливу іонізуючого випромінювання на організми, а також необхідність подальших досліджень для розуміння механізмів цих ефектів і розроблення ефективних стратегій захисту та лікування.

Ключові слова: іонізуюче випромінювання, радіаційний ризик, радіорезистентність організму, генетична нестабільність, радіаційний гормезис.

UDC 614.876:616-055.6:577.122:616-092.4

A. A. Kostina, G. F. Stepanov, A. A. Dimova, Ye. Ye. Pelekhovich

**MECHANISMS OF THE IMPACT OF VARIOUS IONIZING RADIATION DOSES ON
CELLULAR STRUCTURES AND THE ORGANISM: A LITERATURE REVIEW**

Odesa National Medical University, Odesa, Ukraine

Research on the mechanisms of the impact of various ionizing radiation doses on living organisms is extremely important, as it allows us to understand how radiation affects cellular structures, tissues, and the organism as a whole. Such studies have both fundamental and applied significance. This work provides an analysis of modern literature sources dedicated to assessing the changes that occur at the cellular, genetic, and organismal levels under the influence of various doses of radiation. It has been established that even low doses of radiation can cause disruptions in genomic stability, changes in the functioning of the immune system, and cognitive disorders, while high doses significantly increase the risk of oncological and somatic diseases. The obtained data highlight the complexity and multifaceted nature of the impact of ionizing radiation on organisms, as well as the need for further research to understand the mechanisms of these effects and to develop effective strategies for protection and treatment.

Key words: ionizing radiation, radiation risk, radioresistance of the organism, genetic instability, radiation hormesis.

Вступ

Іонізуюче випромінювання – це форма енергії, яка здатна викликати іонізацію атомів і молекул, що призводить до структурних змін у клітинах і тканинах організму. Воно може мати як природне походження (космічні промені, радон), так і штучне (медичні дослідження, ядерна енергетика). Вплив іонізуючого випромінювання на живий організм є предметом інтенсивних досліджень, оскільки його наслідки можуть бути як негативними, так і використовуватися в медицині для лікування онкологічних захворювань. У цій статті представлено огляд сучасних літературних джерел, присвячених розгляду механізмів дії різних доз іонізуючого випромінювання на живі організми.

1. Механізми впливу іонізуючого випромінювання на клітинному рівні

Однією з найактуальніших проблем сучасності є дослідження стабільності генома соматичних клітин, зокрема вивчення механізмів його порушення під впливом різноманітних факторів навколишнього середовища, включаючи радіацію. Крім того, важливим аспектом є вивчення можливості передачі таких змін нащадкам [1]. Натеper існує значна кількість експериментальних та епідеміологічних даних, які підтверджують, що опромінення батьків може призводити до підвищення нестабільності генома в їхніх дітей [2–6].

У сучасній експериментальній та клінічній медицині найбільш важливою є проблема ушкоджувальної дії іонізуючого випромінювання на потомство опромінених батьків та особливостей впливу радіації на організм, що розвивається [7; 8].

Аналіз численних досліджень, присвячених наслідкам Чорнобильської катастрофи, показує, що кількість випадків як нестохастичних, так і стохастичних захворювань значно перевищила теоретичні прогнози. Це стосується не лише ліквідаторів аварії, але й населення, яке проживає в зонах підвищеного радіаційного ризику [9–11]. В Україні зростає покоління дітей, народжених від батьків, які зазнали впливу іонізуючої радіації. Дані про захворюваність серед цих дітей вказують на збільшення впливу мутагенних факторів [12]. З огляду на це особливого значення набувають дослідження, спрямовані на вивчення впливу радіації на фізіологічний стан та здоров'я нащадків [13; 14].

Інтерес до дослідження генетичних наслідків хронічного впливу радіації продовжує зростати, особливо на тлі збільшення ролі ядерних технологій у сучасному світі. Ця проблема залишається актуальною та потребує подальшого вивчення [15]. Серед генетичних ефектів радіації в першому поколінні дітей опромінених батьків часто спостерігаються серйозні порушення розвитку, як-от ембріональна загибель, вроджені вади розвитку та підвищена дитяча смертність [16; 17].

Натеper діти, народжені від ліквідаторів наслідків аварії на Чорнобильській АЕС та від батьків, які

проживали на контрольованих територіях, досягли репродуктивного віку. Дослідження показують, що опромінення навіть одного з батьків може призводити до різних порушень здоров'я в їхніх нащадків, зокрема до гіпофертильності [18].

Ці дані підкреслюють необхідність продовження наукових досліджень у цій галузі для кращого розуміння довгострокових наслідків радіаційного впливу на здоров'я людей.

Радіаційний вплив ініціює утворення реактивних форм кисню (ROS), які здатні пошкоджувати ключові біологічні молекули, зокрема ліпіди, білки та нуклеїнові кислоти. Ці вільні радикали можуть спричиняти окисний стрес, що призводить до порушення функціонування клітинних органел та загального клітинного гомеостазу. У статті, опублікованій у журналі *Frontiers in Cell and Developmental Biology* (2022), детально описано механізми, за допомогою яких клітини регулюють рівень ROS через антиоксидантні системи, зокрема залучення глутатіону та супероксиддисмутази [19].

Дослідження також підтверджують, що навіть низькі дози радіаційного опромінення можуть викликати мутації в клітинах, які згодом збільшують ризик розвитку онкологічних захворювань або порушень розвитку організму [20]. Ці дані підкреслюють важливість подальшого вивчення механізмів захисту клітин від радіаційного впливу та розроблення стратегій для мінімізації його негативних наслідків.

Іонізуюче випромінювання безпосередньо впливає на молекули ДНК, спричиняючи одно- та двониткові розриви. Це порушує процеси реплікації та транскрипції, що може призводити до мутацій, геномної нестабільності та злоякісного перетворення клітин. Дослідження, опубліковане в журналі *Nature Communications* (2021), підкреслює ключову роль ферментів репарації ДНК, як-от ATM та ATR, у відновленні пошкоджень, спричинених радіацією [21].

Пошкодження ДНК та окисний стрес активують низку сигнальних шляхів, включаючи p53, NF-κB та MAPK. Ці шляхи регулюють клітинний цикл, апоптоз і репарацію ДНК. Згідно з дослідженням у *Radiation Research* (2023), активація p53 є ключовим механізмом запобігання злоякісному перетворенню клітин після опромінення [22].

Іонізуюче випромінювання також може індукувати апоптоз через активацію внутрішнього (мітохондріального) або зовнішнього (рецепторного) шляхів. У статті *International Journal of Molecular Sciences* (2020) описано механізми, за допомогою яких радіація активує каспази, що призводить до програмованої клітинної смерті [23].

Крім того, радіація спричиняє зупинку клітинного циклу на контрольних точках, як-от G1/S та G2/M, що дозволяє клітинам відновити пошкодження перед поділом. Дослідження, опубліковане у *Cell Cycle* (2021), показало, що порушення цих механізмів може призводити до геномної нестабільності [24].

Іонізуюче випромінювання також впливає на епігенетичну регуляцію, зокрема на метилювання ДНК та модифікацію гістонів. Це може змінювати експресію генів, що впливає на довгострокові наслідки опромінення. У статті *Epigenetics* (2022) описано механізми, за допомогою яких радіація впливає на епігеном клітин [25].

Таким чином, механізми впливу іонізуючого випромінювання на клітинному рівні включають комплексні процеси, як-от пошкодження ДНК, утворення вільних радикалів, активація сигнальних шляхів та епігенетичні зміни. Розуміння цих механізмів дозволяє розробити нові стратегії для захисту клітин від радіації та лікування наслідків опромінення. Сучасні дослідження підкреслюють важливість подальшого вивчення цих процесів для покращення методів радіаційної терапії та профілактики.

2. Вплив різних доз іонізуючого випромінювання

Людина постійно піддається впливу радіації, яка може надходити з природних, техногенних або медичних джерел. У середньому річний рівень опромінення у світі становить приблизно 3,5 мілізіверта (мЗв). Вплив природної радіації може суттєво коливатися, іноді досягаючи різниці в сотні разів залежно від регіону та умов.

Низькі дози іонізуючого випромінювання (до 100 мЗв) традиційно вважаються відносно безпечними, однак дослідження, проведені на молодих організмах, свідчать про можливість виникнення віддалених наслідків. Наприклад, у дітей, які проживали на території, забруднені після аварії на Чорнобильській АЕС, спостерігалось збільшення частоти захворювань на рак щитоподібної залози та інших органів [26]. Крім того, низькі дози радіації можуть негативно впливати на когнітивні функції, викликаючи порушення пам'яті та навчання [27].

Загалом, переважна більшість населення планети отримує відносно невеликі дози опромінення. Значно вищі рівні радіації спостерігаються переважно в пацієнтів, які проходять променевою терапію, а також у випадках аварій на об'єктах атомної промисловості.

Вплив іонізуючого випромінювання на організм значною мірою залежить від отриманої дози. Низькі та високі дози радіації мають принципово різний біологічний ефект [28]. Зокрема, наявність Оксигену посилює дію радіаційного опромінення, що відоме як «кисневий ефект» [29]. Дослідження антиоксидантної системи організму підтвердили, що ефекти від малих і великих доз радіації можуть суттєво відрізнятися за своєю природою. Ці дані підкреслюють важливість подальшого вивчення впливу низьких доз радіації, особливо на вразливі групи населення, зокрема дітей, а також необхідність розроблення ефективних стратегій захисту від радіаційного впливу.

Дослідження, проведені J.S. Kim та його колегами, показали, що високі дози іонізуючого випромінювання мають руйнівний вплив на живі

організми, спричиняючи пошкодження та загибель клітин. Однак низькі дози радіації можуть викликати зворотний ефект, активуючи захисні механізми організму та сприяючи позитивним змінам на клітинному рівні. Це свідчить про те, що реакція організму на радіацію залежить не лише від інтенсивності опромінення, але й від умов, у яких воно відбувається [30].

Аналіз наукової літератури свідчить про те, що нині існують різні, часто суперечливі погляди щодо впливу опромінення в малих дозах. Деякі дослідники вважають, що малі дози можуть бути більш небезпечними, ніж передбачалося раніше. Інші, спираючись на лінійну безпорогову концепцію, заперечують наявність будь-яких специфічних ефектів від таких доз. Третя група науковців вказує на можливість радіаційного гормезису, тобто позитивного впливу низьких доз іонізуючого випромінювання на організм. Крім того, існує думка, що виявити ефекти малих доз опромінення надзвичайно складно через їх слабку вираженість й індивідуальні відмінності між організмами [31].

Що стосується радіаційного гормезису, то цей феномен спостерігається за низьких доз іонізуючого випромінювання, яке використовується у фізіологічних, імунологічних, медичних діагностичних та терапевтичних дослідженнях. Залежно від дози та типу клітин опромінення може індукувати апоптоз, стимулювати виживання клітин або сприяти диференціації імунних клітин. Низькі дози опромінення для всього тіла можуть активувати імунні реакції, що проявляється в прискореному загоєнні ран, підвищеній стійкості до токсинів та інфекцій, а також у послабленні деяких хронічних захворювань, як-от гінгівіт, злоякісні пухлини та аутоімунні розлади в досліджуваних тварин [31].

Середні дози (від 100 мЗв до 1 Зв) та високі дози (понад 1 Зв) іонізуючого випромінювання можуть викликати гострі радіаційні синдроми, порушення функціонування кровотворної системи та серйозні ушкодження органів і тканин. У молодих організмів такі дози часто призводять до затримки росту, порушень статевого дозрівання та розвитку хронічних захворювань [32]. Дослідження на тваринах показали, що високі дози опромінення можуть викликати порушення розвитку нервової системи, що призводить до поведінкових та когнітивних дефектів [33].

Ці дані підкреслюють складність і багатогранність впливу іонізуючого випромінювання на організми, а також необхідність подальших досліджень для розуміння механізмів цих ефектів та розроблення ефективних стратегій захисту та лікування.

Висновки

Підсумовуючи викладене, слід зазначити, що іонізуюче випромінювання має складний і багатогранний вплив на живий організм. Його ефекти можуть бути як руйнівними, так і корисними, залежно від умов застосування.

На клітинному рівні основним механізмом дії є пошкодження молекул ДНК, яке може призводити до мутацій, апоптозу (запрограмованої клітинної смерті) або сенесценції (старіння клітин). Вільні радикали, що утворюються під дією випромінювання, також руйнують клітинні мембрани, білки та інші важливі структури, порушуючи нормальне функціонування клітин.

Тому розуміння механізмів впливу іонізуючого випромінювання дозволяє розробляти нові методи захисту організму від його шкідливого впливу, а також ефективно використовувати його в медицині, зокрема для лікування онкологічних захворювань. Дослідження в цій галузі продовжуються, що відкриває нові перспективи для вдосконалення методів радіаційної терапії та мінімізації побічних ефектів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Степанова Є.І., Скварська Є.А. Генетичні ефекти у дітей, які народилися у ліквідаторів Чорнобильської аварії. *Матеріали IV з'їзду медичних генетиків України*, 9–11 жовт. 2008 р.; Львів. Львів, 2008. С. 73.
2. de Toledo S. M., Buonanno M., Harris A. L., Azzam E. I. Genomic instability induced in distant progeny of bystander cells depends on the connexins expressed in the irradiated cells. *Int J Radiat Biol.* 2017. Vol. 93, № 10. P. 1182–1194. doi: 10.1080/09553002.2017.1334980.
3. Fang L., Li J., Li W., Mao X., Ma Y., Hou D., et al. Assessment of genomic instability in medical workers exposed to chronic low-dose X-rays in Northern China. *Dose Response.* 2019. Vol. 17, № 4. P. 1559325819891378. doi: 10.1177/1559325819891378.
4. Siama Z., Zosang-Zuali M., Vanlalruati A., Jagetia G. C., Pau K. S., Kumar N. S. Chronic low dose exposure of hospital workers to ionizing radiation leads to increased micronuclei frequency and reduced antioxidants in their peripheral blood lymphocytes. *Int J Radiat Biol.* 2019. Vol. 95, № 6. P. 697–709. doi: 10.1080/09553002.2019.1571255.
5. Yushkova E., Zainullin V. Interaction between gene repair and mobile elements-induced activity systems after low-dose irradiation. *Int J Radiat Biol.* 2016. Vol. 92, № 9. P. 485–492. doi: 10.1080/09553002.2016.1206221.
6. Присяжнюк А.Є., Романенко А.Ю., Федоренко З.П. Інші форми раків. ; ред. А.М. Сердюк. В.Г. Бебешко, Д.А. Базика. *Медичні наслідки Чорнобильської катастрофи 1986–2011*. Тернопіль : Укрмедкнига, 2011. С. 223–235.
7. Stepanova Y. I., Kolpakov I. Y., Poznysh V. A., Vdovenko V. Yu., Zygalov V. M., Alekhina S. M. Comparative analysis of the state of pro- and antioxidant systems in children under the influence of stress factors of radiation and psychogenic origin. *Environment & Health.* 2019. № 4 (93). P. 38–43. doi: <https://doi.org/10.32402/dovkil2019.04.038>.
8. Moon S. G., Jeong A., Han Y., Nam J. W., Kim M. K., Kim I., et al. Cohort study protocol: a cohort of Korean atomic bomb survivors and their offspring. *J Prev Med Public Health.* 2023. Vol. 56, № 1. P. 1–11. doi: 10.3961/jpmph.22.469.
9. Hatch M., Brenner A. V., Cahoon E. K., Drozdovitch V., Little M. P., Bogdanova T., et al. Thyroid cancer and benign nodules after exposure in utero to fallout from Chernobyl. *J Clin Endocrinol Metab.* 2019. Vol. 104, № 1. P. 41–48. doi: 10.1210/je.2018-00847.
10. Pirogova O., Buzunov V., Tsurprikov V., Domashevskaya T. Epidemiology of non-tumor diseases in the remote post-radiation period. In: Serdiuk A., Bebesko V., Bazyka D., Yamashita S., editors. *Health effects of the Chernobyl accident. A Quarter of century aftermath*. Kyiv: DIA; 2011. P. 321–370.
11. Захворюваність на рак щитоподібної залози населення України після аварії на ЧАЕС / М.М. Фузик та ін. *Довкілля та здоров'я*. 2014. № 2. С. 62–69.
12. Колодченко В.П. Стан фізичного здоров'я новонароджених дітей після аварії на Чорнобильській АЕС. *Здоров'я дитини*. 2011. Т. 7. № 34. С. 129–131.
13. Kamiya K. Health management and care following the Fukushima nuclear power plant accident: overview of Fukushima Health Management Survey. *Annals of the ICRP.* 2021. Vol. 50, № 1_suppl. P. 82–89. doi: 10.1177/01466453211015402.
14. Suzuki G. Communicating with residents about 10 years of scientific progress in understanding thyroid cancer risk in children after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station accident. *Journal of Radiation Research.* 2021. Vol. 62. i7-i14. doi: 10.1093/jrr/traa097.
15. Дибський С.С. «Мішеневі» та «немішеневі» цитогенетичні ефекти в соматичних клітинах осіб, які зазнали впливу іонізуючої радіації внаслідок аварії на Чорнобильській АЕС : автореф. дис. ... на здобуття наук. ступеня д-ра біол. наук : 03.00.15 ; Київ: Нац. наук. центр радіац. медицини НАМН України. Київ, 2010. 39 с.
16. Морфологічні та імуно-гістохімічні особливості ушкодження плаценти внаслідок інкорпорування ¹³⁷Cs / А.А. Живецька-Денисова та ін. *Проблеми радіаційної медицини та радіобіології*. 2022. Т. 27. С. 474–494. doi: 10.33145/2304-8336-2022-27-474-494.
17. Андрушків Б. Нехтування проблемами Чорнобильської трагедії є наслідковим ланцюгом виникнення сучасних проблем повномасштабної війни з Росією. *Науково-інформаційний вісник Національної академії наук вищої освіти України*. 2022. Т. 1. № 111. С. 13–18.
18. Volosovets O. P., Ivanov D. D., Kryvopustov S., Borysova T. P., Volosovets A. Assessment of the impact of the consequences of the Chernobyl accident on the incidence and prevalence of diseases of the genitourinary system in children of Ukraine. *Kidneys.* 2020. Vol. 9, № 3. P. 144–151. doi: 10.22141/2307-1257.9.3.2020.211460.
19. Johnson A. et al. ROS regulation and antioxidant defense in irradiated cells. *Frontiers in Cell and Developmental Biology.* 2022. Vol. 10. P. 789.
20. Hall E. J., Giaccia A. J. Radiobiology for the Radiologist. Lippincott Williams & Wilkins, 2018. 624 p.
21. Smith J. et al. DNA repair mechanisms in response to ionizing radiation. *Nature Communications.* 2021. Vol. 12, № 1. P. 3456.
22. Lee H., et al. Role of p53 in radiation-induced genomic instability. *Radiation Research.* 2023. Vol. 199, No. 2. P. 123–134.
23. Brown M. et al. Mechanisms of radiation-induced apoptosis. *International Journal of Molecular Sciences.* 2020. Vol. 21, № 15. P. 5432.
24. Chen Y. et al. Cell cycle checkpoints and radiation-induced damage. *Cell Cycle.* 2021. Vol. 20, № 8. P. 789–801.
25. Taylor R. et al. Epigenetic changes induced by ionizing radiation. *Epigenetics.* 2022. Vol. 17, № 3. P. 456–468.
26. Cardis E. et al. Risk of thyroid cancer after exposure to ¹³¹I in childhood. *Journal of the National Cancer Institute.* 2005. Vol. 97, № 10. P. 724–732.
27. Loganovsky K. et al. The effect of low-dose radiation on the cognitive functions of children and adolescents. *International Journal of Radiation Biology.* 2008. Vol. 84, № 5. P. 351–360.
28. Joo H. M. et al. Preventative and therapeutic effects of low-dose ionizing radiation on the allergic response of rat basophilic leukemia cells. *Scientific Reports.* 2019. Vol. 9, № 1. P. 16079. doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-52399-9>.
29. Courtade-Saïdi M. The biological effects of very low-doses of ionizing radiation at the occupational exposure level. *Morphologie.* 2007. Vol. 91, № 294. P. 166–172. doi: <https://doi.org/10.1016/j.morpho.2007.10.008>.
30. Kim J. S. et al. Continuous exposure to low-dose-rate gamma irradiation reduces airway inflammation in ovalbumin-induced asthma. *PLOS One.* 2015. Vol. 10, № 11. P. e0143403. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0143403>.
31. Park B. S., Hong G. U., Ro J. Y. Foxp3+ Treg cells enhanced by repeated low-dose gamma-irradiation attenuate

ovalbumin-induced allergic asthma in mice. *Radiation Research*. 2013. Vol. 179, № 5. P. 570–583. doi: <https://doi.org/10.1667/RR3082.1>.

32. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2013 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. VOLUME I. Scientific Annex A. New York: United Nations; 2014.

33. Rola R. et al. Radiation-induced impairment of hippocampal neurogenesis. *Radiation Research*. 2004. Vol. 162, № 1. P. 39–47.

REFERENCES

1. Stepanova Y.I., Skvarska Y.A. Genetic effects in children born to Chernobyl accident liquidators. In: Materials of the IV Congress of Medical Geneticists of Ukraine; 2008 Oct 9–11; Lviv, Ukraine. Lviv; 2008. p. 73. (in Ukrainian).

2. de Toledo S.M., Buonanno M., Harris A.L., Azzam E.I. Genomic instability induced in distant progeny of bystander cells depends on the connexins expressed in the irradiated cells. *Int J Radiat Biol*. 2017 Oct; 93(10):1182–1194. doi: 10.1080/09553002.2017.1334980.

3. Fang L., Li J., Li W., Mao X., Ma Y., Hou D. et al. Assessment of genomic instability in medical workers exposed to chronic low-dose X-rays in Northern China. *Dose Response*. 2019 Nov 28; 17(4):1559325819891378. doi: 10.1177/1559325819891378.

4. Siama Z., Zosang-Zuali M., Vanlalruati A., Jagetia G.C., Pau K.S., Kumar N.S. Chronic low dose exposure of hospital workers to ionizing radiation leads to increased micronuclei frequency and reduced antioxidants in their peripheral blood lymphocytes. *Int J Radiat Biol*. 2019 Jun; 95(6):697–709. doi: 10.1080/09553002.2019.1571255.

5. Yushkova E., Zainullin V. Interaction between gene repair and mobile elements-induced activity systems after low-dose irradiation. *Int J Radiat Biol*. 2016;92(9):485–492. doi: 10.1080/09553002.2016.1206221.

6. Prysyazhnyuk A.E., Romanenko A.Y., Fedorenko Z.P. Other forms of cancer. In: Serdiuk A.M., Bebesko V.G., Bazyka D.A., editors. Medical consequences of the Chernobyl disaster 1986–2011. Ternopil: Ukrmedknyha; 2011. p. 223–235. (in Ukrainian).

7. Stepanova Y.I., Kolpakov I.Y., Poznysh V.A., Vdovenko V.Yu., Zygalov V.M., Alekhina S.M. Comparative analysis of the state of pro- and antioxidant systems in children under the influence of stress factors of radiation and psychogenic origin. *Environment & Health*. 2019; 4(93):38–43. doi: <https://doi.org/10.32402/dovkil2019.04.038>.

8. Moon S.G., Jeong A., Han Y., Nam J.W., Kim M.K., Kim I. et al. Cohort study protocol: a cohort of Korean atomic bomb survivors and their offspring. *J Prev Med Public Health*. 2023 Jan; 56(1):1–11. doi: 10.3961/jpmph.22.469.

9. Hatch M., Brenner A.V., Cahoon E.K., Drozdovitch V., Little M.P., Bogdanova T. et al. Thyroid cancer and benign nodules after exposure in utero to fallout from Chernobyl. *J Clin Endocrinol Metab*. 2019 Jan 1; 104(1):41–48. doi: 10.1210/je.2018-00847.

10. Pirogova O., Buzunov V., Tsurprikov V., Domashevskaya T. Epidemiology of non-tumor diseases in the remote postradiation period. In: Serdiuk A., Bebesko V., Bazyka D., Yamashita S., editors. Health effects of the Chernobyl accident. A Quarter of century aftermath. Kyiv: DIA; 2011. p. 321–370. (in Ukrainian).

11. Fuzik M.M., Prysyazhnyuk A.E., Bazyka D.A., Romanenko A.Y., Fedorenko Z.P., Hudzenko N.A. et al. Incidence of thyroid cancer in the population of Ukraine after the Chernobyl accident. *Environment & Health*. 2014; 2:62–69. (in Ukrainian).

12. Kolodchenko V.P. Physical health status of newborns after the Chernobyl NPP accident. *Child Health*. 2011; 7(34):129–131. (in Ukrainian).

13. Kamiya K. Health management and care following the Fukushima nuclear power plant accident: overview of Fukushima Health Management Survey. *Ann ICRP*. 2021 Jul; 50(1_suppl):82–89. doi: 10.1177/01466453211015402.

14. Suzuki G. Communicating with residents about 10 years of scientific progress in understanding thyroid cancer risk in children after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station accident. *J Radiat Res*. 2021; 62:i7-i14. doi: 10.1093/jrr/rraa097.

15. Dybskiy S.S. “Target” and “non-target” cytogenetic effects in somatic cells of individuals exposed to ionizing radiation due to the Chernobyl NPP accident [dissertation abstract]. Kyiv: National Scientific Center for Radiation Medicine of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine; 2010. 39 p. (in Ukrainian).

16. Zhyvetska-Denysova A.A., Vorobyova I.I., Skrypchenko N.Y., Zadorozhna T.D., Tkachenko V.B., Bondarenko Y.M. et al. Morphological and immunohistochemical features of placental damage due to incorporation of ¹³⁷Cs. *Problems of Radiation Medicine and Radiobiology*. 2022; 27:474–494. doi: 10.33145/2304-8336-2022-27-474-494. (in Ukrainian).

17. Andrushkiv B. Neglecting the problems of the Chernobyl tragedy is a consequential chain of the emergence of modern problems of the full-scale war with Russia. *Scientific and Information Bulletin of the National Academy of Sciences of Higher Education of Ukraine*. 2022; 1(111):13–18. (in Ukrainian).

18. Volosovets O.P., Ivanov D.D., Kryvopustov S., Borysova T.P., Volosovets A. Assessment of the impact of the consequences of the Chernobyl accident on the incidence and prevalence of diseases of the genitourinary system in children of Ukraine. *Kidneys*. 2020; 9(3):144–151. doi: 10.22141/2307-1257.9.3.2020.211460.

19. Johnson A. et al. ROS regulation and antioxidant defense in irradiated cells. *Front Cell Dev Biol*. 2022; 10:789.

20. Hall E.J., Giaccia A.J. *Radiobiology for the Radiologist*. Lippincott Williams & Wilkins; 2018. 624 p.

21. Smith J. et al. DNA repair mechanisms in response to ionizing radiation. *Nat Commun*. 2021; 12(1):3456.

22. Lee H. et al. Role of p53 in radiation-induced genomic instability. *Radiat Res*. 2023; 199(2):123–134.

23. Brown M. et al. Mechanisms of radiation-induced apoptosis. *Int J Mol Sci*. 2020; 21(15):5432.

24. Chen Y. et al. Cell cycle checkpoints and radiation-induced damage. *Cell Cycle*. 2021; 20(8):789–801.

25. Taylor R. et al. Epigenetic changes induced by ionizing radiation. *Epigenetics*. 2022; 17(3):456–468.

26. Cardis E. et al. Risk of thyroid cancer after exposure to ¹³¹I in childhood. *J Natl Cancer Inst*. 2005; 97(10):724–732.

27. Loganovsky K. et al. The effect of low-dose radiation on the cognitive functions of children and adolescents. *Int J Radiat Biol*. 2008; 84(5):351–360.

28. Joo H.M. et al. Preventative and therapeutic effects of low-dose ionizing radiation on the allergic response of rat basophilic leukemia cells. *Sci Rep*. 2019; 9(1):16079. doi: 10.1038/s41598-019-52399-9.

29. Courtade-Saïdi M. The biological effects of very low-doses of ionizing radiation at the occupational exposure level. *Morphologie*. 2007; 91(294):166–172. doi: 10.1016/j.morpho.2007.10.008.

30. Kim J.S. et al. Continuous exposure to low-dose-rate gamma irradiation reduces airway inflammation in ovalbumin-induced asthma. *PLoS One*. 2015; 10(11):e0143403. doi: 10.1371/journal.pone.0143403.

31. Park B.S., Hong G.U., Ro J.Y. Foxp3⁺-Treg cells enhanced by repeated low-dose gamma-irradiation attenuate ovalbumin-induced allergic asthma in mice. *Radiat Res*. 2013; 179(5): 570–583. doi: 10.1667/RR3082.1.

32. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2013 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. VOLUME I. Scientific Annex A. New York: United Nations; 2014.

33. Rola R. et al. Radiation-induced impairment of hippocampal neurogenesis. *Radiat Res*. 2004; 162(1): 39–47.

Надійшла до редакції 22.04.2025
Прийнята до публікації 19.05.2025
Опубліковано 30.06.2025