

УДК 614.876:616-055.6:577.122:616-092.4
DOI <https://doi.org/10.32782/2519-4151-2025-2-7>

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

ВПЛИВ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА МОЛОДИЙ ОРГАНІЗМ У РІЗНИХ ДОЗАХ: 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
ВПЛИВ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА МОЛОДИЙ ОРГАНІЗМ
У РІЗНИХ ДОЗАХ: ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ
Одеський національний медичний університет, Одеса, Україна

Актуальність дослідження зумовлена високою чутливістю молодого організму до радіаційного впливу, що може призводити до віддалених негативних наслідків. **Мета** – узагальнити сучасні дані про вплив різних доз іонізуючого випромінювання на дітей та підлітків. **Методи:** аналіз епідеміологічних, клінічних і експериментальних досліджень, отриманих із сучасних літературних джерел, присвячених оцінці віддалених наслідків дії іонізуючої радіації на молодий організм. **Результати.** Встановлено, що молодий організм є особливо чутливим до впливу іонізуючого випромінювання через активні процеси росту та диференціації клітин. Дослідження віддалених наслідків опромінення молодого організму показують, що навіть низькі дози радіації можуть спричинити серйозні довгострокові ефекти. **Висновки.** Необхідні подальші дослідження механізмів впливу іонізуючого випромінювання на організм та розробка ефективних стратегій профілактики й реабілітації осіб, що зазнали опромінення. **Ключові слова:** іонізуюче випромінювання, опромінення молодого організму, генетична нестабільність, віддалені наслідки опромінення, профілактика опромінення.

UDC 614.876:616-055.6:577.122:616-092.4
A. A. Kostina, G. F. Stepanov, A. A. Dimova, Ye. Ye. Pelekhovich
THE IMPACT OF IONIZING RADIATION ON A YOUNG ORGANISM
AT DIFFERENT DOSES: A LITERATURE REVIEW
Odesa National Medical University, Odesa, Ukraine

Relevance. The study is driven by the high sensitivity of the young organism to ionizing radiation, which may result in delayed adverse outcomes. **The aim is** to summarize current data on the impact of various doses of ionizing radiation on children and adolescents. **Methods.** Analysis of epidemiological, clinical, and experimental studies obtained from current literature sources focused on assessing the long-term effects of ionizing radiation on young organisms. **Results.** It was established that young organisms are particularly vulnerable to ionizing radiation due to active processes of cell growth and differentiation. Studies of long-term consequences show that even low radiation doses can lead to significant persistent effects. **Conclusions.** Further research on the mechanisms of ionizing radiation impact and the development of effective prevention and rehabilitation strategies for exposed individuals are essential. **Key words:** ionizing radiation, exposure of a young organism, genetic instability, long-term effects of ionizing radiation, radiation prevention.

Вступ

Іонізуюче випромінювання є одним із найпотужніших факторів, які можуть впливати на живі організми, зокрема на молодий організм, що перебуває на етапі активного росту та розвитку. Дослідження впливу іонізуючого випромінювання на дітей та підлітків мають велике значення для розуміння механізмів радіаційного ушкодження, а також для розробки стратегій захисту та профілактики. У цій статті представлено огляд сучасних літературних джерел, присвячених впливу різних доз іонізуючого випромінювання на молодий організм.

1. Віддалені наслідки опромінення молодого організму

Вплив іонізуючого випромінювання на організм людини залишається однією з найважливіших проблем сучасної медицини та радіобіології. Особлива увага приділяється дослідженню наслідків опромінення для молодого організму, оскільки дитячий та підлітковий вік характеризуються активним ростом, розвитком тканин і органів, що робить їх більш вразливими до дії радіації. Віддалені наслідки опромінення можуть проявлятися через роки або навіть десятиліття, що робить цю проблему не лише медичною, але і соціальною.

Іонізуюче випромінювання впливає на клітинні структури, зокрема на ДНК, викликаючи її пошкодження. У молодому організмі, де клітини активно діляться, такі пошкодження можуть призводити до порушень у процесах росту та диференціації тканин. Найбільш чутливими до радіації є клітини кісткового мозку, епітелію кишечника, лімфоїдної системи та статевих залоз. Ці тканини та органи є критично важливими для нормального функціонування організму, і їх пошкодження може мати серйозні наслідки для здоров'я. Наприклад, ураження кісткового мозку може призводити до порушень кровотворення, а пошкодження статевих залоз – до проблем із репродуктивною функцією в майбутньому [1–4].

Дослідження показують, що молоді організми, які зазнали впливу радіації, можуть мати підвищений ризик розвитку хронічних захворювань, таких як онкологічні патології, ендокринні порушення та імунodefіцитні стани. Це підкреслює необхідність розробки ефективних методів захисту та лікування наслідків радіаційного впливу, особливо для дітей та підлітків.

У разі, якщо опромінена клітина зберігає життєздатність і не зазнає загибелі, існує ризик виникнення віддалених наслідків опромінення в її нащадкових клітинах, це явище відоме як генетична нестабільність [5]. Іонізуюче випромінювання впливає не лише шляхом прямого пошкодження молекул ДНК, а й опосередковано через порушення міжклітинних комунікацій. Зокрема, опромінення одних клітин може спричинити розвиток так званого «ефекту свідка» – феномену, за якого неопромінені клітини зазнають змін або

ушкоджень у відповідь на сигнали, отримані від опромінених сусідів.

Особливо чутливим до впливу іонізуючого випромінювання, навіть у малих дозах, є період ембріонального та раннього постембріонального розвитку організму. У цей час клітини активно діляться та диференціюються, що робить їх більш вразливими до радіаційного впливу. Віддалені наслідки пренатального опромінення, ймовірно, є результатом декомпенсаційних процесів на рівні клітини, таких як радіаційно-індукована нестабільність генома [6; 7]. На рівні організму це може проявлятися порушеннями розвитку органів і систем, що призводить до довгострокових фізіологічних та функціональних відхилень.

У тварин, які зазнавали впливу радіації надзвичайно низької інтенсивності впродовж розвитку, виявлено відтерміновані ознаки генетичної нестабільності, індукованої іонізуючим випромінюванням, у клітинах кровотворної системи – однієї з найбільш чутливих до радіаційного впливу. Свідченням цього є зростання частоти ушкоджень ДНК у лейкоцитах периферичної крові, що зберігається навіть у віці 8 та 11 місяців у самців, які піддавались опроміненню.

Важливим механізмом підтримки стабільності ДНК клітин білої крові, які постійно піддаються процесам природної селекції, є апоптоз – програмована клітинна смерть. Відомо, що безпосередній вплив іонізуючого випромінювання малими дозами в різні періоди розвитку організму ссавців призводить до збільшення частоти апоптозу [8; 9]. Однак у експерименті було виявлено відстрочене зменшення частоти апоптозу лейкоцитів у опромінених тварин порівняно з неопроміненими [10].

Це може свідчити про те, що в умовах хронічного низькоінтенсивного опромінення відбувається посилена селекція стійких клітин, які менш схильні до апоптозу. Такі клітини можуть накопичувати пошкодження ДНК, що призводить до генетичної нестабільності та підвищує ризик розвитку патологій у віддаленій перспективі.

Ці дані підкреслюють складність механізмів впливу радіації на організм, особливо в умовах низьких доз, і необхідність подальшого вивчення цих процесів для розробки ефективних стратегій захисту та профілактики.

Отже, виявлена у крові опромінених самців генетична нестабільність може бути пов'язана зі зниженням здатності клітин до апоптозу. На користь цього припущення опосередковано свідчить динаміка середнього кометного індексу, за якої основні зміни були зумовлені збільшенням частки клітин із незначними пошкодженнями [11; 12]. Це може вказувати на те, що за умов тривалого низькоінтенсивного опромінення в організмі активується селективне збереження клітин, більш резистентних до механізмів програмованої загибелі.

Цей механізм можна порівняти з радіоадаптивною відповіддю, коли організм адаптується до

умов радіаційного впливу шляхом відбору клітин, здатних протистояти пошкодженням. У результаті залишаються клітини, які мають вищу стійкість до апоптозу, але при цьому можуть накопичувати генетичні пошкодження, що призводить до генетичної нестабільності [13].

Віддалені наслідки опромінення молодого організму включають підвищений ризик розвитку низки серйозних захворювань та порушень. Наприклад, дослідження серед населення Хіросіми та Нагасакі показали, що діти, які зазнали опромінення, мали значно підвищений ризик розвитку лейкемії та інших форм раку в дорослому віці [14]. Це пов'язано з тим, що молоді клітини, які активно діляться, більш чутливі до пошкоджень ДНК, спричинених іонізуючим випромінюванням.

Крім онкологічних захворювань, іонізуюче випромінювання може впливати на репродуктивну функцію, знижуючи фертильність у майбутньому [15]. Пошкодження статевих клітин може призводити до порушень у формуванні гамет, що впливає на здатність до зачаття та збільшує ризик вроджених вад у потомства.

Одним із найбільш серйозних віддалених наслідків опромінення є збільшення ризику розвитку раку. У дітей та підлітків, які зазнали впливу радіації, частіше виявляють лейкемії, рак щитоподібної залози, молочної залози та інші види пухлин. Це пов'язано з тим, що молоді клітини більш схильні до злоякісного перетворення через активні процеси поділу.

Радіація може впливати на формування та функціонування різних органів. Наприклад, опромінення може призводити до порушень у розвитку нервової системи, що проявляється когнітивними порушеннями, затримкою розумового розвитку або неврологічними розладами. Також можливі порушення в роботі серцево-судинної, ендокринної та імунної систем.

Пошкодження ДНК у статевих клітинах може призводити до мутацій, які передаються наступним поколінням. Це може викликати вроджені вади розвитку, хромосомні аномалії або підвищений ризик захворювань у потомства. Радіація пригнічує функцію імунної системи, що робить організм більш вразливим до інфекційних захворювань. У віддаленій перспективі це може призводити до хронічних імунодефіцитних станів. Діти, які зазнали опромінення, часто стикаються з психологічними проблемами, такими як тривожність, депресія або посттравматичний стресовий розлад. Крім того, соціальна стигматизація та побоювання щодо здоров'я можуть впливати на якість життя.

Віддалені наслідки опромінення молодого організму є серйозною проблемою, яка вимагає комплексного підходу до діагностики, лікування та профілактики. Зростання обізнаності про ризики, пов'язані з радіацією, та впровадження сучасних методів захисту дозволять зменшити негативний вплив на здоров'я майбутніх поколінь.

Дослідження в цій галузі тривають, і їх результати мають ключове значення для розробки ефективних стратегій збереження здоров'я дітей в умовах радіаційного впливу.

Для зменшення ризиків віддалених наслідків опромінення важливо дотримуватися принципів радіаційної безпеки. У разі аварій або медичних процедур, пов'язаних із використанням радіації, необхідно застосовувати захисні заходи, такі як обмеження часу опромінення, збільшення відстані до джерела та використання захисних екранів.

Для дітей, які вже зазнали опромінення, важливим є регулярне медичне обстеження, спрямоване на раннє виявлення можливих ускладнень. Також необхідно забезпечити психологічну підтримку та реабілітацію.

2. Профілактика та захист від іонізуючого випромінювання

Складна біохімічна та патогенетична природа розвитку променевої хвороби зумовлює високі вимоги до засобів її профілактики та лікування, а також підкреслює доцільність пошуку ефективних радіозахисних агентів серед сполук природного походження. До біологічних засобів захисту, які включають вітамінно-амінокислотні комплекси, гормональні препарати, полісахариди та інші речовини, належать такі, що здатні зміцнювати загальну резистентність організму до опромінення. Вони можуть зменшувати вираженість таких патологічних проявів, як дисбаланс біологічних функцій, порушення метаболізму, інтоксикація, інфекційні ускладнення, а також симптоми, характерні для кістково-мозкової, кишкової та ендокринної форм променевого ураження [16; 17]. У цьому контексті особливо актуальним залишається дослідження природних метаболітів і біологічно активних речовин як потенційних лікарських засобів, здатних запобігати розвитку первинних біохімічних змін і сприяти активації процесів відновлення після опромінення.

На сьогодні загально визнаним є твердження про ключову роль комплексного підходу до радіаційного захисту, який передбачає не лише фізичні методи, зокрема екранування, але й обов'язкове застосування фармакологічних засобів із радіозахисною дією. Прийнято класифікувати усі засоби протирадіаційного захисту на дві основні категорії: радіопротектори та препарати, що використовуються для лікування променевих уражень [18].

Один із багатообіцяючих векторів у розробці протирадіаційних засобів пов'язаний зі створенням препаратів для ранньої патогенетичної терапії. Ці сполуки характеризуються здатністю втручатися у перебіг патологічних змін, які запускаються в організмі під впливом іонізуючого випромінювання, ще на початкових етапах їх розвитку [19].

Наявні наукові дані дозволяють розглядати хронічне опромінення як тривалий радіаційний стрес, який посилюється впливом екологічних та психосоціальних факторів. У патогенезі такого стресу ключову роль відіграють:

- активація вільнорадикального окиснення;
- антиоксидантний дефіцит, який поступово наростає;

- нейроендокринна та імунна дисрегуляція.

Для корекції цих змін ефективними є такі групи препаратів:

1. Антиоксиданти: нейтралізують вільні радикали, що утворюються під дією радіації, і зменшують окисний стрес.

2. Антистресові препарати (адаптогени): допомагають організму адаптуватися до стресових умов, підвищуючи його стійкість до радіаційного впливу.

3. Імуномодулятори: відновлюють функціонування імунної системи, яка часто порушується під дією радіації [20; 21].

Ці підходи дозволяють не лише зменшити негативний вплив радіації на організм, але й запобігти розвитку віддалених наслідків опромінення. Подальші дослідження в цій галузі мають великий потенціал для розробки нових ефективних методів лікування та профілактики променевих уражень.

Запобігання шкідливому впливу зовнішнього опромінення досягається шляхом використання радіопротекторних препаратів, а також засобів, що забезпечують тривалу підтримку підвищеної радіостійкості організму. Такі засоби можуть бути ефективними як у разі профілактичного застосування до моменту опромінення, так і в перші години після дії іонізуючого випромінювання [22–24].

Одним із ключових механізмів дії радіозахисних засобів є їх здатність зменшувати рівень кисневої напруги всередині клітин кровотворної тканини шляхом активації процесів споживання кисню в мітохондріях. У ситуаціях, коли між кров'ю і клітинним середовищем наявні виражені дифузійні бар'єри, такий метаболічний ефект сприяє зростанню трансмембранного градієнта кисневої напруги. Це, своєю чергою, призводить до зниження парціального тиску кисню (pO_2) у внутрішньоклітинних компартментах, що означає зменшення оксигенації молекулярних мішеней іонізуючого випромінювання не шляхом обмеження надходження кисню до тканин, а за рахунок його посиленого споживання клітинами [25; 26].

Підвищення радіорезистентності організму може бути досягнуто за допомогою застосування як природних, так і синтетичних антиоксидантів [27]. До таких речовин належать:

- β -каротин;
- α -токоферол (вітамін E);
- аскорбінова кислота (вітамін C);
- препарати глутатіону;
- супероксиддисмутаза;
- селен та інші.

Захисний ефект цих препаратів у умовах радіаційного впливу пов'язаний насамперед з їхньою здатністю:

- пригнічувати процеси вільнорадикального окиснення: антиоксиданти нейтралізують вільні

радикали, які утворюються під дією іонізуючого випромінювання, запобігаючи пошкодженню клітинних структур;

- підвищувати активність антиоксидантних систем організму: вони стимулюють власні механізми захисту організму, такі як ферменти антиоксидантної системи, що допомагає боротися з окисним стресом.

Таким чином, використання антиоксидантів є ефективним способом зменшення негативного впливу радіації на організм і підвищення його стійкості до променевого впливу. Це відкриває широкі перспективи для їх застосування як у профілактичних, так і в лікувальних цілях.

Для цілеспрямованої корекції метаболічних порушень, спричинених ушкоджувальним впливом іонізуючого випромінювання, широко застосовуються препарати, що модулюють тканинний обмін речовин. До таких засобів належать похідні піримідину, аденозину та гіпоксантину – сполуки, що здатні посилювати загальну стійкість організму до радіаційного впливу. Більшість із них є природними метаболітами, які беруть участь у синтезі АТФ і нуклеїнових кислот, сприяють підвищенню їх концентрації та прискорюють відновлення ДНК після радіаційних пошкоджень [28]. Такі речовини можна об'єднати в умовну групу попередників та похідних нуклеїнових кислот і енергетичних метаболітів. Важливою характеристикою цих сполук є також їх здатність стимулювати антиоксидантну систему та зміцнювати неспецифічну резистентність організму [29].

Застосування ноотропних засобів і біогенних стимуляторів може виявитися ефективним у запобіганні та лікуванні наслідків дії екстремальних чинників, зокрема у випадках радіаційних інцидентів. Ці препарати реалізують свою дію через різні механізми, що сприяють підвищенню адаптаційного потенціалу організму, стимулюють відновлювальні процеси та забезпечують захисну відповідь на шкідливі впливи:

1. Посилення біосинтетичних процесів енергетичних молекул і нуклеїнових компонентів:

- ноотропіл та пірацетам покращують енергетичний обмін у клітинах, що сприяє їхньому відновленню після радіаційного впливу.

2. Інгібування процесів перекисного окиснення ліпідів (ПОЛ):

- лепротек активує синтез білків і фосфоліпідів, що допомагає відновити структуру клітинних мембран і зменшити пошкодження, спричинені вільними радикалами.

3. Підвищення рівня біогенних стимуляторів та активізація клітинного метаболізму:

- церебролізін, актовегін та солкосерил активують клітинний метаболізм, сприяють регенерації тканин і знижують інтенсивність вільнорадикального окиснення.

Ці препарати допомагають організму протистояти негативним наслідкам радіаційного впливу, підвищуючи його стійкість і сприяючи відновленню

пошкоджених тканин. Їх застосування може бути ефективним як у профілактичних, так і в лікувальних цілях, особливо в умовах радіаційних аварій або інших екстремальних ситуацій [30].

Велике значення у підвищенні радіорезистентності людей, які піддаються низькоінтенсивному радіаційному впливу малими дозами, мають біологічно активні харчові добавки. Ці добавки є джерелом таких ключових компонентів, як:

– Біоантиоксиданти: нейтралізують вільні радикали, що утворюються під дією радіації, і зменшують окисний стрес.

– Амінокислоти: забезпечують будівельні блоки для синтезу білків, що сприяє відновленню пошкоджених тканин.

– Есенціальні фосфоліпіди: підтримують цілісність клітинних мембран і покращують їх функціонування.

Використання таких добавок допомагає підвищити стійкість організму до радіаційного впливу, активуючи природні механізми захисту та відновлення. Це особливо важливо для людей, які постійно або періодично піддаються дії низьких доз радіації, наприклад, у зонах з підвищеним радіаційним фоном або під час медичних процедур [31].

Одним із найзручніших та дієвих підходів до сучасної корекції функціонування основних систем організму є використання нутрицевтичних засобів, парафармацевтиків і еубіотиків, які вводяться у вигляді дієтичних добавок або функціональних продуктів харчування з чітко визначеними властивостями [32]. Перспективним напрямом у створенні таких засобів для застосування в програмах реабілітації після радіаційних ушкоджень є використання рослинної сировини вітчизняного походження.

Висновки

Молодий організм є особливо вразливим до впливу іонізуючого випромінювання через високу активність клітинного поділу та розвитку. Навіть низькі дози опромінення можуть мати віддалені негативні наслідки, такі як підвищений ризик онкологічних захворювань та порушення когнітивних функцій. Середні та високі дози можуть викликати серйозні порушення розвитку та функціонування органів.

Узагальнюючи вищенаведене, варто підкреслити, що в умовах стійкого зростання радіаційного фону на планеті та фіксації антропогенних радіаційних аномалій у різних регіонах світу особливої актуальності набуває наукове обґрунтування та розробка підходів до цілеспрямованої корекції метаболічних зрушень, спричинених впливом іонізуючого випромінювання. Для зменшення його негативних наслідків необхідне широке впровадження ефективних профілактичних і захисних заходів.

Конфлікт інтересів авторів відсутній.

ЛІТЕРАТУРА

1. Аміразян С.А., Радзішевська Є.Б., Гордієнко Н.О. Низькі дози радіації: наукова полеміка або конфронтація поглядів. *Український радіологічний журнал*. 2016. Т. 24, № 3. С. 36–41.
2. Власюк Н.В. Радіаційно-гігієнічна оцінка радіотривожності населення України у пізній фазі Чорнобильської аварії. *Довкілля та здоров'я*. 2016. № 2. С. 19–23.
3. Прилипка В.А., Озерова Ю.Ю., Кратик П.Ф., Шевченко К.К., Бондаренко І.В., Морозова М.М. Інформаційна складова радіаційного захисту населення зони спостереження АЕС. *Довкілля та здоров'я*. 2016. № 4. С. 30–34.
4. Сердюк А.М., Павленко Т.О., Риган М.М., Лось І.П., Скалецький Ю.М. Радіологічні наслідки аварії на Чорнобильській АЕС крізь призму проблем протирадіаційного захисту населення України. *Довкілля та здоров'я*. 2016. № 1. С. 22–30.
5. Земскова О.В., Главацький О.Я., Курінний Д.А., Демченко О.М., Рушковський С.Р. Індивідуальні особливості радіаційно-індукованої геномної нестабільності у хворих на гліобластому. *Доповіді НАН України*. 2020. № 4. С. 91–98. doi: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2020.04.091>.
6. Streffer C. Bystander effects, adaptive response and genomic instability induced by prenatal irradiation. *Mutation Research*. 2004. Vol. 568, No. 1. P. 79–87. doi: 10.1016/j.mrfmmm.2004.07.014.
7. Devi P.U., Satyamitra M. Tracing radiation induced genomic instability in vivo in the haemopoietic cells from fetus to adult mouse. *British Journal of Radiology*. 2005. Vol. 78, No. 934. P. 928–933. doi: 10.1259/bjr/18119329.
8. Benekou A., Bolaris S., Kazanis E., Bozas E., Philippidis H., Stylianopoulou F. In utero radiation-induced changes in growth factor levels in the developing rat brain. *International Journal of Radiation Biology*. 2001. Vol. 77, No. 1. P. 83–93. doi: 10.1080/095530001453140.
9. Foray N., Bourguignon M., Hamada N. Individual response to ionizing radiation. *Mutation Research*. 2016. Vol. 770, Pt B. P. 369–386. doi: 10.1016/j.mrrev.2016.09.001.
10. Furlong H., Mothersill C., Lyng F.M., Howe O. Apoptosis is signalled early by low doses of ionising radiation in a radiation-induced bystander effect. *Mutation Research*. 2013. Vol. 741–742. P. 35–43. doi: 10.1016/j.mrfmmm.2013.02.001.
11. Ільєнко І.М. Генна регуляція апоптозу, проліферації та старіння імункомпетентних клітин людини у ранньому та віддаленому періодах після опромінення : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра біол. наук : 03.00.01, 03.00.15. Нац. наук. центр радіац. медицини НАМН України, Ін-т клін. радіології. Київ, 2016. 38 с.
12. Бази́ка Д.А., Ільєнко І.М. Зв'язок генної регуляції довжини теломер, клітинної проліферації та апоптозу з дозою опромінення у віддаленому періоді після Чорнобильської катастрофи. *Журнал НАМН України*. 2016. Т. 22, № 2. С. 123–134.
13. Мотуляк А.П., Черкасов В.Г., Стеченко Л.О. Структурні та молекулярні особливості апоптозу лімфоцитів у органах імунної системи мишей лінії BALB/c після дії малих доз гамма-опромінення. *Вісник морфології*. 2007. Т. 13, № 1. С. 85–90.
14. Preston D.L., et al. Solid cancer incidence in atomic bomb survivors: 1958–1998. *Radiation Research*. 2007. Vol. 168, No. 1. P. 1–64. doi: 10.1667/RR0763.1.
15. Otake M., Schull W.J. Radiation-related brain damage and growth retardation among the prenatally exposed atomic bomb survivors. *International Journal of Radiation Biology*. 1998. Vol. 74, No. 2. P. 159–71. doi: 10.1080/095530098141555.
16. Дьоміна Е.А. Протиіонізуючі засоби: класифікація та механізми. *Проблеми радіаційної медицини та радіобіології*. 2015. Т. 20. С. 42–54.

17. Азарова О.В., Литвинов Ю.В., Паламарчук В.І. Забезпечення здоров'я та життєдіяльності населення у складних радіо-екологічних умовах. *Матеріали доповідей XIX щоріч. наук. конф. ін-ту ядер. досл. НАН України*, 24–27 січня 2012 р., Київ. Київ, 2012. С. 159–160.

18. Бузунов В.О., Трескунова Т.В. Профілактика непухлинних захворювань як стратегічний напрямок медичного захисту населення в екстремальних соціальних й економічних умовах (на досвіді Чорнобиля). *Східноєвропейський журнал громадського здоров'я*. 2015. № 2. С. 105–106.

19. Sun Q., Mao W., Jiang H., Zhang X., Xiao J., Lian Y. The effect of protracted exposure to radiation on liver injury: a cohort study of industrial radiographers in Xinjiang, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2018. Vol. 15, No. 1. P. 71. doi: 10.3390/ijerph15010071.

20. Hofer M., Hoferova Z., Falk M. Pharmacological modulation of radiation damage. Does it exist a chance for other substances than hematopoietic growth factors and cytokines? *International Journal of Molecular Sciences*. 2017. Vol. 18, No. 7. P. 1385. doi: 10.3390/ijms18071385.

21. Montesinos C.A., Khalid R., Cristea O., Greenberger J.S., Epperly M.W., Lemon J.A., et al. Space radiation protection countermeasures in microgravity and planetary exploration. *Life (Basel)*. 2021. Vol. 11, No. 8. P. 829. doi: 10.3390/life11080829.

22. Hladkykh F. Pharmacoprophylactic and pharmacotherapeutic approaches to mitigating the damaging effects of ionizing radiation: review of information sources. *Path of Science*. 2018. Vol. 4, No. 12. P. 5001–5022. doi: 10.22178/pos.41-5.

23. Kolotilov N.N., Alekseyenko A., Andrushchenko I.V., Anton S. Repurposing of drugs: radiological aspect. *Radiation Diagnostics, Radiation Therapy*. 2019. Vol. 3. P. 71–74.

24. Vasil'eva I.N., Bepalov V.G., Baranenko D.A. Radioprotective and apoptotic properties of a combination of α -tocopherol acetate and ascorbic acid. *Bulletin of Experimental Biology and Medicine*. 2016. Vol. 161, No. 2. P. 248–251. doi: 10.1007/s10517-016-3388-0.

25. Vasin M.V., Ushakov I.B. Radiomodulators as agents of biological protection against oxidative stress under the influence of ionizing radiation. *Biology Bulletin Reviews*. 2020. Vol. 10. P. 251–265. doi: 10.1134/S2079086420040106.

26. Montoro A., Obrador E., Mistry D., Forte G.I., Bravata V., Minafra L., et al. Radioprotectors, Radiomitigators, and Radiosensitizers. *Radiobiology Textbook*. Springer Cham, 2023. P. 571–628. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-18810-7_11.

27. Apostolova N., Victor V.M. Molecular strategies for targeting antioxidants to mitochondria: therapeutic implications. *Antioxidants & Redox Signaling*. 2015. Vol. 22, No. 8. P. 686–729. doi: 10.1089/ars.2014.5952.

28. Babayan N., Vorobyeva N., Grigoryan B., Grekhova A., Pustovalova M., Rodneva S., et al. Low repair capacity of DNA double-strand breaks induced by laser-driven ultrashort electron beams in cancer cells. *International Journal of Molecular Sciences*. 2020. Vol. 21, No. 24. P. 9488. doi: 10.3390/ijms21249488.

29. Візір В.А., Заїка І.В. Організація терапевтичної допомоги у воєнний час та при надзвичайних ситуаціях мирного часу : навч.-метод. посіб. до практ. занять з внутрішньої медицини (військової медицини) для студентів 5 курсу мед. ф-ту. Запоріжжя : ЗДМУ, 2019. 68 с.

30. Нековаль І.В., Казанюк Т.В. Фармакологія : підручник. 10-е перероблене і доповнене видання. Київ : Медицина, 2022. 552 с.

31. Yang X., Ren H., Guo X., Hu C., Fu J. Radiation-induced skin injury: pathogenesis, treatment, and management. *Aging (Albany NY)*. 2020. Vol. 12, No. 22. P. 23379–23393. doi: 10.18632/aging.103932.

32. Хоменко І.М., Поліщук С.В. Оцінка впливу споживання продуктів харчування місцевого виробництва на формування дози внутрішнього опромінення у віддалений період після Чорнобильської катастрофи. *Довкілля та здоров'я*. 2014. № 2. С. 57–61.

REFERENCES

1. Amirazyan SA, Radzishavska EB, Hordiienko NO. Low doses of radiation: scientific polemics or confrontation of views. *Ukr Radiol J*. 2016;24(3):36–41. (In Ukrainian).
2. Vlasiuk NV. Radiation-hygienic assessment of radiation anxiety of the population of Ukraine in the late phase of the Chernobyl accident. *Environment & Health*. 2016;2:19–23. (In Ukrainian).
3. Prylypko VA, Ozerova YY, Kratyk PF, Shevchenko KK, Bondarenko IV, Morozova MM. Information component of radiation protection of the population in the observation zone of NPPs. *Environment & Health*. 2016;4:30–34. (In Ukrainian).
4. Serdiuk AM, Pavlenko TO, Rigan MM, Los IP, Skalecky YM. Radiological consequences of the Chernobyl NPP accident through the prism of the problems of radiation protection of the population of Ukraine. *Environment & Health*. 2016;1:22–30. (In Ukrainian).
5. Zemskova OV, Hlavatskyi OY, Kurinnyi DA, Demchenko OM, Rushkovskyi SR. Individual features of radiation-induced genomic instability in patients with glioblastoma. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*. 2020;(4):91–98. doi: 10.15407/dopovidi2020.04.091. (In Ukrainian).
6. Streffer C. Bystander effects, adaptive response and genomic instability induced by prenatal irradiation. *Mutat Res*. 2004;568(1):79–87. doi: 10.1016/j.mrfmmm.2004.07.014.
7. Devi PU, Satyamitra M. Tracing radiation induced genomic instability in vivo in the haemopoietic cells from fetus to adult mouse. *Br J Radiol*. 2005;78(934):928–933. doi: 10.1259/bjr/18119329.
8. Benekou A, Bolaris S, Kazanis E, Bozas E, Philippidis H, Stylianopoulou F. In utero radiation-induced changes in growth factor levels in the developing rat brain. *Int J Radiat Biol*. 2001 Jan;77(1):83–93. doi: 10.1080/095530001453140.
9. Foray N, Bourguignon M, Hamada N. Individual response to ionizing radiation. *Mutat Res*. 2016;770(Pt B):369–386. doi: 10.1016/j.mrrev.2016.09.001.
10. Furlong H, Mothersill C, Lyng FM, Howe O. Apoptosis is signalled early by low doses of ionising radiation in a radiation-induced bystander effect. *Mutat Res*. 2013 Jan–Feb;741–742:35–43. doi: 10.1016/j.mrfmmm.2013.02.001.
11. Iliencko IM. Gene regulation of apoptosis, proliferation, and aging of human immunocompetent cells in the early and late periods after irradiation [dissertation abstract]. Kyiv: National Scientific Center for Radiation Medicine of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine; 2016. 38 p. (In Ukrainian).
12. Bazyka DA, Iliencko IM. The relationship of gene regulation of telomere length, cell proliferation, and apoptosis with the dose of irradiation in the late period after the Chernobyl disaster. *J Natl Acad Med Sci Ukr*. 2016;22(2):123–134. (In Ukrainian).
13. Motulyak AP, Cherkasov VG, Stechenko LO. Structural and molecular features of lymphocyte apoptosis in the immune organs of BALB/c mice after exposure to low doses of gamma radiation. *Bull Morphol*. 2007;13(1):85–90. (In Ukrainian).
14. Preston DL, et al. Solid cancer incidence in atomic bomb survivors: 1958–1998. *Radiat Res*. 2007;168(1):1–64.
15. Otake M, Schull WJ. Radiation-related brain damage and growth retardation among the prenatally exposed atomic bomb survivors. *Int J Radiat Biol*. 1998;74(2):159–171. doi: 10.1080/095530098141555.
16. Dyomina EA. Radioprotective agents: classification and mechanisms. *Probl Radiac Med Radiobiol*. 2015;20:42–54. (In Ukrainian).

17. Azarova OV, Litvinov YV, Palamarchuk VI. Ensuring health and life activities of the population in difficult radioecological conditions. In: Materials of the reports of the XIX annual scientific conference of the Institute of Nuclear Research of the National Academy of Sciences of Ukraine; 2012 Jan 24–27; Kyiv, Ukraine. Kyiv; 2012. p. 159–160. (In Ukrainian).
18. Buzunov VO, Treskunova TV. Prevention of non-tumor diseases as a strategic direction of medical protection of the population in extreme social and economic conditions (based on the experience of Chernobyl). *East Eur J Public Health*. 2015;2:105–106. (In Ukrainian).
19. Sun Q, Mao W, Jiang H, Zhang X, Xiao J, Lian Y. The effect of protracted exposure to radiation on liver injury: a cohort study of industrial radiographers in Xinjiang, China. *Int J Environ Res Public Health*. 2018 Jan 4;15(1):71. doi: 10.3390/ijerph15010071.
20. Hofer M, Hoferova Z, Falk M. Pharmacological modulation of radiation damage. Does it exist a chance for other substances than hematopoietic growth factors and cytokines? *Int J Mol Sci*. 2017 Jun 28;18(7):1385. doi: 10.3390/ijms18071385.
21. Montesinos CA, Khalid R, Cristea O, Greenberger JS, Epperly MW, Lemon JA, et al. Space radiation protection countermeasures in microgravity and planetary exploration. *Life (Basel)*. 2021 Aug 14;11(8):829. doi: 10.3390/life11080829.
22. Hladkykh F. Pharmacoprophylactic and pharmacotherapeutic approaches to mitigating the damaging effects of ionizing radiation: review of information sources. *Path Sci*. 2018;4(12):5001-5022. doi: 10.22178/pos.41-5.
23. Kolotilov NN, Alekseyenko A, Andrushchenko IV, Anton S. Repurposing of drugs: radiological aspect. *Radiat Diagn Radiat Ther*. 2019;3:71–74.
24. Vasil'eva IN, Bespalov VG, Baranenko DA. Radioprotective and apoptotic properties of a combination of α -tocopherol acetate and ascorbic acid. *Bull Exp Biol Med*. 2016 Jun;161(2):248–251. doi: 10.1007/s10517-016-3388-0.
25. Vasin MV, Ushakov IB. Radiomodulators as agents of biological protection against oxidative stress under the influence of ionizing radiation. *Biol Bull Rev*. 2020;10:251–265. doi: 10.1134/S2079086420040106.
26. Montoro A, Obrador E, Mistry D, Forte GI, Bravata V, Minafra L, et al. Radioprotectors, Radiomitigators, and Radiosensitizers. In: Baatout S, editor. *Radiobiology Textbook*. Springer Cham; 2023, p. 571–628. doi: 10.1007/978-3-031-18810-7_11.
27. Apostolova N, Victor VM. Molecular strategies for targeting antioxidants to mitochondria: therapeutic implications. *Antioxid Redox Signal*. 2015 Mar 10;22(8):686–729. doi: 10.1089/ars.2014.5952.
28. Babayan N, Vorobyeva N, Grigoryan B, Grekhova A, Pustovalova M, Rodneva S, et al. Low repair capacity of DNA double-strand breaks induced by laser-driven ultrashort electron beams in cancer cells. *Int J Mol Sci*. 2020;21(24):9488. doi: 10.3390/ijms21249488.
29. Vizir VA, Zaika IV. Organization of therapeutic care in wartime and in emergencies of peacetime: educational-methodical manual for practical classes in internal medicine (military medicine) for 5th year students of the medical faculty. *Zaporizhzhia*; 2014. 72 p. (In Ukrainian).
30. Nekoval IV, Kazanyuk TV. *Pharmacology: textbook*. 10th ed., revised and supplemented. Kyiv: Medytsyna; 2011. 520 p. (In Ukrainian).
31. Yang X, Ren H, Guo X, Hu C, Fu J. Radiation-induced skin injury: pathogenesis, treatment, and management. *Aging (Albany NY)*. 2020 Nov 16;12(22):23379–23393. doi: 10.18632/aging.103932.
32. Khomenko IM, Polishchuk SV. Assessment of the impact of consumption of locally produced food on the formation of internal radiation dose in the remote period after the Chernobyl disaster. *Environment & Health*. 2014;2:57–61. (In Ukrainian).

Надійшла до редакції 25.08.2025

Прийнята до публікації 23.09.2025

Опубліковано 17.10.2025