

**Д. А. Бази́ка, В. О. Сушко, К. М. Логановський, А. Є. Присяжнюк, Д. О. Білий,  
П. А. Федірко, І. М. Ільєнко, Л. А. Янович**

*Державна установа “Національний науковий центр радіаційної медицини НАМН України” (ННЦРМ),  
04050 Київ*

## **РАДІАЦІЙНА МЕДИЦИНА УКРАЇНИ — ЧВЕРТЬ СТОРІЧЧЯ ПРОГРЕСУ ТА ПРІОРИТЕТИ НА МАЙБУТНЄ**

В статті проведено науковий аналіз здобутків української радіаційної медицини установами Національної академії медичних наук. Поряд з висвітленням питань радіаційної безпеки та проблем дозиметричного контролю основна увага в статті приділена аналізу результатів досліджень медичних наслідків аварії на ЧАЕС. Вивчено детерміновані ефекти іонізуючого опромінення на здоров'я, зокрема гостру променеву хворобу та радіаційну катаракту. Наведено дані щодо стану здоров'я у різних груп постраждалих за рахунок пухлинної та непухлинної патології. Представлено аналіз результатів епідеміологічного та клінічного дослідження онкологічної та соматичної патології у постраждалих. Визначення радіаційних ризиків раку щитоподібної залози, хронічної лімфоцитарної лейкемії, цереброваскулярної патології, радіаційної катаракти, фундаментальних механізмів дії малих доз опромінення, вивчення ролі імунологічних, метаболічних та генетичних процесів, нейроімунної взаємодії стали світовим пріоритетом. Міжнародні дослідження показали наявність у населення, постраждалого від аварії на Чорнобильській АЕС, довгострокових психічних розладів, у тому числі депресії, тривожності та посттравматичних стресових розладів. Встановлено зв'язок радіаційних ефектів в імунній системі з дозою та віком на момент опромінення. Проведений цитогенетичний моніторинг підтвердив зростання інтенсивності соматичного хромосомного мутагенезу у людини у віддалені терміни після аварії на ЧАЕС. У статті запропоновано заходи з вирішення комплексу проблем мінімізації негативних наслідків Чорнобильської катастрофи, медичного та професійного опромінення, напрями дослідження ефектів опромінення у широкому діапазоні доз і розробка та впровадження технологій лікування та радіаційного захисту населення.

**Ключові слова:** Чорнобиль, радіація, детерміністські ефекти, стохастичні ефекти, лейкемія, рак, радіаційна катаракта, канцерогенез.

За понад 30 років досліджень медичних наслідків аварії на ЧАЕС радіаційна медицина в Україні досягла значного наукового прогресу. Розкрито та вивчено особливості реалізації впливу іонізуючого опромінення на людський організм на різних рівнях від популяційного до молекулярно-генетичного та розвиток і патогенез радіаційно зумовлених патологій.

Розробка наукових аспектів мінімізації медичних наслідків Чорнобилю та надання медичної допомоги постраждалим стали одними з найважливіших завдань створеної у 1993 р. Академії медичних наук України. Заснування Академії було серед перших кроків Уряду незалежної України для забезпечення висококваліфікованої медичної допомоги населенню. Приєднання Наукового центру радіа-

---

Д. А. Бази́ка — генеральний директор ННЦРМ, зав. відділу клінічної імунології, академік НАМН України (bazyka@yahoo.com)  
В. О. Сушко — перший заступник генерального директора ННЦРМ з наукової роботи,  
К. М. Логановський — зав. відділу медичної експертизи та лікування наслідків впливу радіаційного опромінення, д.м.н.  
А. Є. Присяжнюк — зав. відділу радіаційної психоневрології Інституту клінічної радіології ННЦРМ, д.м.н.,  
Д. О. Білий — зав. відділення кардіології відділу терапії радіаційних наслідків Інституту клінічної радіології ННЦРМ д.м.н., професор  
П. А. Федірко — директор інституту радіаційної гігієни і епідеміології ННЦРМ, д.м.н., професор  
І. М. Ільєнко — с.н.с. відділу клінічної імунології Інституту клінічної радіології ННЦРМ, д.б.н.  
Л. А. Янович — зав. відділу координації, планування та аналізу наукових досліджень ННЦРМ, к.м.н.

© Д. А. Бази́ка, В. О. Сушко, К. М. Логановський, А. Є. Присяжнюк, Д. О. Білий, П. А. Федірко, І. М. Ільєнко, Л. А. Янович, 2018.

ційної медицини стало результатом зростаючого визнання наукових досліджень в галузі ефектів іонізуючої радіації у людини та радіологічного захисту.

Прогрес радіаційної медицини, який зробив українські дослідження ефектів малих доз опромінення всесвітньо відомими, забезпечено науковими здобутками ННЦРМ під керівництвом акад. А. Ю. Романенка, Інституту ендокринології та обміну речовин ім. В. П. Комісаренка, Інституту педіатрії, акушерства та гінекології, Інституту урології, Інституту загальної та комунальної гігієни (зараз — Інститут громадського здоров'я ім. О. М. Марзеєва), наукових колективів та особистого внеску акад. Ю. Г. Антипкіна, проф. Т. І. Богданової, акад. О. Ф. Возіанова, чл.-кор. Є. В. Епштейна, акад. Ю. П. Зозулі, акад. Ю. І. Кундієва, проф. І. А. Ліхтарьова, проф. О. А. Пятака, акад. А. М. Романенко, акад. А. М. Сердюка, акад. М. Д. Тронька. Визнання прогресу радіаційної медицини України підтверджено присудженням Державних премій України в галузі науки і техніки за розробку і впровадження технології, організації та управління будівництвом в умовах підвищеного радіаційного впливу (Горицький О. В., Лось І. П., 2000 р.); за комплексне дослідження впливу Чорнобильської катастрофи на природне середовище, наукове обґрунтування реабілітації забруднених територій та радіаційного захисту населення України (Ліхтарьов І. А., 2004 р.); за цикл робіт з визначення механізмів ефектів дії іонізуючого випромінювання та розробку і впровадження новітніх технологій медичного захисту критичних груп постраждалих внаслідок Чорнобильської катастрофи (Бешешко В. Г., Базика Д. А., Омелянець М. І., Бруслова К. М., Богданова Т. І., Тронько М. Д., Романенко А. М., 2007 р.); за цикл робіт в галузі біохімії (Чумак А. А., 2011 р.). Лауреатами Міжнародної меморіальної премії імені доктора Нагаї стали М. Д. Тронько (2013 р.) та Д. А. Базика (2017 р.). Свідченням високого наукового потенціалу галузі стало присудження Премій Верховної Ради України найталановитішим молодим ученим в галузі фундаментальних і прикладних досліджень та науково-технічних розробок за дослідження нейроімунних механізмів радіаційного ураження головного мозку (Арясов П. Б., Бомко М. О., Голярник Н. А., Перчук І. В., 2009 р.); за впровадження комплексу клітинно-молекулярних маркерів діагностики віддалених ефектів опромінення у постраждалих внаслідок Чорнобильської катастрофи (Льєнко І. М., Костін О. В., Лясківська О. В., Клепко А. В., 2011 р.).

#### **Проблеми дозиметрії та радіаційної безпеки**

У світі спостерігається зростання активності в області енергетичних ядерних технологій. Якщо на

період аварії на ЧАЕС у світі працювало 380 ядерних енергетичних блоків, то сьогодні вже працює 439, з них 104 — у США, 59 у Франції, 55 в Японії. Знаходяться в стадії будівництва 35 блоків, планується будівництво 210 блоків. Більше 40 без'ядерних країн заявили про намір створення ядерних енергетичних комплексів [57]. Незважаючи на розвиток "зелених" технологій, атомна енергетика залишиться на осяжне майбутнє основним джерелом енергії в Україні [9]. Застосування атомної енергії можливе тільки при впровадженні найвищих стандартів регуляторних документів, радіаційної безпеки та системи медичного реагування на аварійні ситуації, відкритості інформації про дозові навантаження. Середньозважена сумарна еквівалентна доза від джерел природного походження становить для України 3,5 мЗв/рік. Внесок керованого компонента при цьому оцінюється у 2,8 мЗв/рік, 72 % дози формується за рахунок радону-222 у повітрі приміщень [21].

Аварії на ЧАЕС, у Фукусімі та серйозний розгляд гіпотетичних сценаріїв опромінення великих мас населення внаслідок масштабної аварії, актів ядерного тероризму чи бойових дій висунули на перший план питання оцінки доз і експресного сортування (тріажу) постраждалих за дозовим критерієм. Останніми роками великої ваги набули дослідження та практичні розробки, спрямовані на напрацювання заходів контраварійного реагування (зонування уражених територій, принципи моніторингу, критерії сортування та класифікації уражених) і розробку методів аварійної ретроспективної дозиметрії [75]. Серед останніх слід відзначити сучасні методи біологічної дозиметрії (FISH, генні маркери та підписи), фізичні методи (оптико-стимульована люмінесценція — ОСЛ та електронний парамагнітний резонанс — ЕПР), основані на використанні т. з. імпровізованих дозиметрів — елементів персональних електронних пристроїв (скло екранів мобільних телефонів, резистори, чіпи кредитних карток тощо) або інших матеріальних об'єктів, які постійно супроводжують людину у сучасному світі [34]. Ці методи, дозволяють стандартизувати аварійну дозиметрію та характеризуються специфічними властивостями (експресність аналізу, індивідуальність дозових оцінок, відносно високий поріг чутливості). Необхідним і можливим є відновлення позицій української науки, яка мала пріоритети (ЕПР дозиметрія пластику та нігтів) [83], що залежить від фінансування і наявності кваліфікованих кадрів.

Актуалізація питань радіаційного контролю та дозиметричного забезпечення контраварійних заходів примусила по-новому подивитись на досвід, накопичений у перші роки після аварії на ЧАЕС

[51]. Практичні поради та узагальнення вже стали у пригоді при розробці міжнародних рекомендацій з організації медичного супроводу і спостереження постраждалих контингентів (проект SHAMISEN), очевидною є потреба в узагальненні, систематизації та консервації первинних результатів вимірювань (ЛВЛ, ТЛД, радіоактивність проб довкілля та продуктів харчування). На часі стоять завдання ревізії раніш отриманих та визначених даних і закономірностей — верифікація та фільтрація первинних даних, уточнення критичних параметрів дозиметричних моделей, індивідуалізація та корекція оцінок доз населення, що постраждало внаслідок аварії на ЧАЕС.

Як наслідок розробки нових радіаційних технологій, а також аварійного опромінення проходить трансформація структури дозових навантажень зі збільшенням пропорції опромінення за рахунок штучних джерел. Значно зростають еквівалентні дози населення за рахунок діагностичних і медичних процедур. До основних шляхів опромінення належать також опромінення населення та персоналу внаслідок виробництва ядерної енергії на об'єктах ядерного циклу і атомних електростанціях; опромінення при виробництві електроенергії в гірничій та металургійній промисловості; аварійне опромінення. Дози та ефекти при вказаних видах опромінення стали предметом зростаючої уваги та узагальнення з боку ВООЗ і НКДАР ООН [89]. Розробка та оцінка ефективності індивідуального захисту, напрацювання адекватних підходів до визначення відповідних дозиметричних величин, здійснення реєстрації та обліку доз професійного опромінення є основними завданнями сучасного етапу. Крім загальновиголошеної потреби у захисті органу зору інтервенційних радіологів, вченими ННЦРМ вперше були показані критичне значення та важливість коректного визначення доз гіпокампа [52, 53]. Прогрес променевих технологій візуалізації та дедалі більше їх поширення в Україні, виводять питання оцінки доз пацієнтів на новий рівень актуальності. Масове використання комп'ютерної томографії, зокрема у стоматології, ставить нові виклики в галузі радіаційного захисту, нормування, оцінки ризиків віддалених наслідків такого діагностичного опромінення [86]. Наразі існують всі підстави для включення українських науковців у міжнародний розподіл праці та їх участі у передових дослідженнях, які в сучасному світі здійснюються спільними зусиллями міжнародних команд дослідників.

#### Стан здоров'я постраждалих

Дані державної статистики показують за 26 років безперервне погіршення здоров'я у різних груп постраждалих — учасників ліквідації наслідків

аварії (ЛНА) на ЧАЕС, евакуйованих із зони відчуження та населення забруднених територій [58]. Доказові дані останніх п'яти років в Україні надають підтримку збільшенню ризиків неонкологічних захворювань, включаючи аутоімунний тиреоїдит в учасників ЛНА з дозами зовнішнього опромінення понад 250 мГр та дорослих з дозами на щитоподібну залозу понад 300 мГр. Зростає смертність учасників ЛНА (рис. 1).

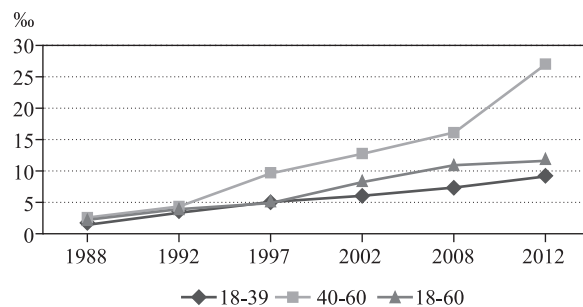


Рис. 1. Динаміка показника смертності учасників ЛНА на ЧАЕС за віковими категоріями [48].

Демографічна ситуація в зонах радіоактивного забруднення відрізняється від решти країни. Негативними факторами стали переселення, зміни числа працездатного населення, обмеження виробничої та інвестиційної діяльності, формування комплексу “жертви”. Дитяча смертність після катастрофи зберігається на низькому рівні і має тенденцію до зниження протягом останніх років, що є певним свідченням ефективності локальної медичної мережі навіть в існуючих умовах.

#### Детерміновані ефекти опромінення

Світвим пріоритетом стали дослідження ранніх та наслідків детермінованих ефектів. Ретроспективний аналіз гострої променевої хвороби ННЦРМ спільно з університетами м. Ульм (ФРН) та Erasmus (Нідерланди) привів до створення міжнародної бази даних радіаційних уражень, більшість випадків у якій становили хворі на гостру променеву хворобу з України. Гостру променеву хворобу (ГПХ) було діагностовано у 237 осіб, після ретроспективного аналізу у 1989 р. діагнози було підтверджено у 134 пацієнтів, які отримали в ранній період аварії дози опромінення 1-12 Гр. Медична допомога, яка надавалася цим хворим в ранньому періоді та в подальшому в ННЦРМ, сприяла їх виживанню. 28 хворих померли протягом перших трьох місяців після аварії. У наступні роки, 31 смерть було зареєстровано у пацієнтів з верифікованою ГПХ і 24 смерті — серед тих, у кого ГПХ не була підтверджена. Основними причинами цих смертей були онкологічні та серцево-судинні захворювання [40]. Серед серцево-судинних

захворювань причиною смерті була раптова серцева смерть (10 пацієнтів), хронічна серцева недостатність (7), гострий інфаркт міокарда (1) та гостре порушення мозкового кровообігу (2). Серед онкогематологічної патології причинами смерті були мієлодиспластичний синдром (3), гостра мієломобластна і хронічна мієлобластна лейкемії, гіпоплазія кровотворення та істинна поліцитемія (по 1), рак різної локалізації (12). Термін появи злоякісних новоутворень та їх частота не розрізнялись залежно від ступеня тяжкості ГПХ, дози опромінення, а також від наявності або відсутності ГПХ у пацієнта.

Радіаційні катаракти розвинулися у 24 хворих: у 10 з ГПХ-III, 8 з ГПХ-II, 3 — з ГПХ-I та 3 хворих з непідтвердженою ГПХ. Практично у всіх випадках (96 %) катаракти розвинулися протягом перших 15 років після опромінення.

Проведені після Чорнобильської катастрофи в ННЦРМ дослідження дозволили зафіксувати 176 випадків специфічної радіаційної катаракти, найбільша кількість нових випадків була зареєстрована через 8-9 років після опромінення, але один був зафіксований навіть через 29 років після радіаційного впливу у особи, яка раніше такої патології не мала [30]. Встановлено, що ризик радіаційної катаракти залежить від дозового навантаження (рис. 2), адитивно-відносний ризик становить 3,451 (1,347-5,555) на 1 Гр. Доведено, що типова клінічна картина радіаційної катаракти може виникати при дозах, значно менших за 0,25 Гр. В масштабному міжнародному дослідженні UACOS, в якому брали участь співробітники ННЦРМ, дослідники в остаточному підсумку прийняли порогову модель і дійшли висновку, що порог розвитку радіаційної катаракти реєструється, але є значно нижчим, ніж вважали раніше [91].

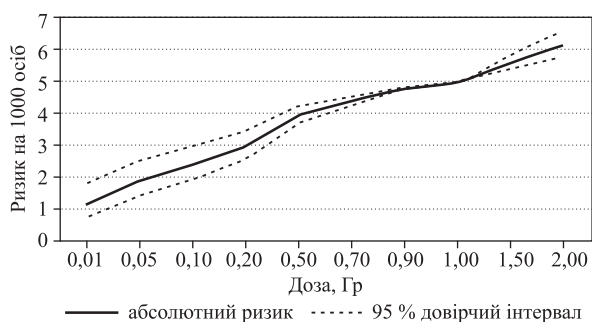


Рис. 2. Абсолютний ризик радіаційної катаракти (на тисячу опромінених осіб) в залежності від дози опромінення.

Дані епідеміологічних досліджень, проведених Інститутом медицини праці НАМН України спільно з Колумбійським університетом, показують також зростання захворюваності на катаракту в

когорті з 8000 учасників ЛНА, які зазнали опромінення у низьких дозах, починаючи з 250-300 мЗв.

Визначено достовірно вищу частоту вроджених катаракт (RR = 6,22, CI — 1,34; 28,96) серед опромінених *in utero* осіб, матері яких отримали сумарні ефективні дози 75 мЗв і вище, в порівнянні з особами, доза опромінення матерів яких менша за 75 мЗв [31]. Два паралельні дослідження — “Пітсбургський проект” (США — Україна) [54] і проведене у ННЦРМ дослідження в Іванківському районі Київської області виявили у дітей, які мешкають на радіаційно забруднених територіях, тендітні специфічні помутніння кришталика [32, 54].

Ці дослідження визнані та стали підґрунтям для перегляду професійних лімітів Міжнародної комісії радіаційного захисту, яка знизила порогову дозу розвитку радіаційних катаракт до 150 мГр та встановила професійний ліміт на око у 20 мЗв. Втім, вказані нормативи мають рекомендаційний характер та не розділяються усіма фахівцями; залишається невизначеність щодо стохастичного або детерміністського характеру радіогенної катаракти [87]. Результати досліджень, що вказують на значення опромінення в ранньому розвитку судинної та вікової катаракт, а також макулодистрофії повинні бути підтверджені в майбутньому.

#### Онкологічні наслідки аварії на Чорнобильській АЕС

Дослідження були сконцентровані на загальній онкологічній захворюваності та “ранніх” формах раку, до яких відносяться рак щитоподібної, молочної залози та лейкемія. Латентний період цих форм, як показали попередні дослідження постраждалих при атомних бомбардуваннях, становить від 2 до 10 років, пік захворюваності припадає на 20-30 років після опромінення. Епідеміологічному вивченню онкологічних наслідків аварії на Чорнобильській АЕС сприяли розробка та запровадження національних і міжнародних наукових програм. Міжнародні програми передбачали проведення аналітичних досліджень, що надало можливість оцінити ризики розвитку злоякісних новоутворень з урахуванням отриманих доз опромінення. Виконання міжнародних програм ІРНЕСА (ЕСР-7), досліджень у рамках Франко-Німецької Чорнобильської ініціативи, INCO-COPERNICUS та інших сприяло проведенню довгострокового моніторингу злоякісних новоутворень в групах постраждалих із залученням баз даних Державного реєстру України та Національного канцер-реєстру.

Масштабні екологічні дослідження онкологічних ефектів проведено в основних групах населення, які постраждали внаслідок Чорнобильської аварії (у 2015 році: мешканців найбільш забрудне-

них радіонуклідами територіях України — 176,6 тис. — 6 881 197 людино-років спостереження, учасників ліквідації наслідків аварії (УЛНА) 1986-1987 рр. — 73,7 тис. — 2 197 524 людино-років спостереження, евакуйованих із зони відчуження — 46,2 тис. — 1 336 904 людино-років спостереження), та дали змогу виявити особливості трендових моделей частоти цієї патології. Загальні показники захворюваності на всі форми раку перевищують в учасників ЛНА 1986-1987 рр. національний рівень (стандартизоване співвідношення захворюваності (SIR) за період 1994-2015 рр. становило 106,8 %, 95 %, ДІ: 104,9-108,7) [79].

Дескриптивні дослідження частоти лейкемії у дорослого населення в перші півтора десятиліття після аварії не виявили зростання частоти. Результати досліджень у опромінених в дитячому віці є недостатньо переконливими. Рівень захворюваності у 1990-2015 рр. на лейкемії та лімфоми учасників ЛНА 1986-1987 рр. (SIR = 144,5; 95 % ДІ: 133,9-155,1) та евакуйованих із зони відчуження (SIR = 144,2; 95 % ДІ: 127,8-160,1) перевищує національні показники. Для населення радіаційно забруднених територій отримано протилежні результати (SIR = 85,6; 95 % ДІ: 83,6-89,0) [79], що може пояснюватися обмеженнями методу.

Першим визнаним стохастичним ефектом став підвищений ризик розвитку раку щитоподібної залози. Значне підвищення частоти раку щитоподібної залози було продемонстровано, починаючи з 4-5 років після аварії, серед опромінених в дитячому віці та пов'язується з радіонуклідами йоду, в основному йодом-131. Спільними дослідженнями Інституту ендокринології та обміну речовин НАМН України та Національного інституту раку США встановлено причинний зв'язок між поглиненою дозою на щитоподібну залозу та збільшенням захворюваності на рак щитоподібної залози у опромінених в дитячому та підлітковому віці. Підвищена частота реєструється до сьогодні [88].

Радіаційні ризики раку щитоподібної залози у дорослих є предметом обговорення. Підвищену захворюваність на рак щитоподібної залози в Україні було зареєстровано в учасників ЛНА та евакуйованих з 30-кілометрової зони; проводяться пілотні аналітичні дослідження. Дані спільного дослідження раку щитоподібної залози в когорті учасників ЛНА з Білорусі, країн Балтії та Російської Федерації показали зростання радіаційних ризиків після впливу радіоізотопів йоду та зовнішнього випромінювання при внутрішній гетерогенності когорти — у РФ надлишкової частоти раку щитоподібної залози не визначено. ННЦРМ спільно з Національним інститутом раку США розгорнуто дослідження частоти раку щитоподіб-

ної залози в когорті 150 813 учасників ліквідації наслідків аварії, опромінених у віці старше 18 років. Попереднім аналізом встановлено підвищений рівень захворюваності на цю патологію — SIR 3,50 (95 % ДІ: 3,04-4,03) [77]. Радіаційні ризики для цих факторів мають бути вивчені в майбутньому.

У зв'язку з безпрецедентним збільшенням числа випадків раку щитоподібної залози у трьох постраждалих країнах налагоджено ефективну систему ранньої діагностики, лікування та реабілітації, що призвело до успішного лікування. Однак, незважаючи на ефективність ранніх результатів лікування, його довгострокові результати потребують подальшого вивчення, якість життя у післяопераційному періоді, як і раніше зменшується, хворі потребують довгострокової подальшої підтримки. Унікальний досвід лікування та реабілітації хворих на рак щитоподібної залози може бути використаний у разі інших радіаційних аварій.

Вагомим внеском у вивчення радіаційних ризиків лейкемії стало найбільше у світі за розмірами когорти (110 645 учасників ЛНА), колективною дозою та кількістю випадків аналітичне дослідження за міжнародною угодою між Україною та США в галузі вивчення ефектів Чорнобильської аварії (1999 р.), яке охопило період з 1986 по 2006 рр. Вперше всі випадки було експертовано міжнародною групою експертів, а для реконструкції доз застосовано новий метод дозиметрії RADRUE, створений спільно вченими Міжнародної агенції з дослідження раку ООН, Національного інституту раку США, Колумбійського університету, Інституту біофізики (РФ) та ННЦРМ НАМН України.

Значення надлишкового відносного ризику (ERR) за 15 років після опромінення становить 3,44/Gy (95 % ДІ: 0,47-9,78,  $P < 0,01$ ) [80], за 20 років — ERR/Gy = 2,38 (95 % ДІ: 0,49-5,87,  $P = 0,004$ ) [92]. Залежність “доза-ефект” була подібною як для хронічної лімфоцитарної лейкемії (ХЛЛ) (ERR/Gy = 2,58; 95 % ДІ: 0,02-8,43,  $P = 0,047$ ), так і для не-ХЛЛ групи лейкемій (ERR/Gy = 2,21; 95 % ДІ: 0,05-7,61,  $P = 0,039$ ). Визначення радіозалежності хронічної лімфоцитарної лейкемії стало світовим пріоритетом.

Не було встановлено суттєвого впливу на радіаційні ризики лейкемії модифікуючих факторів нерадіаційної природи — експозиції до пестицидів, органічних розчинників, інших потенційно небезпечних хімічних речовин, роботи на небезпечних виробництвах в цілому) на ризик виникнення лейкемії серед учасників ЛНА [55].

В українських дослідженнях отримано нові факти щодо зв'язку між опроміненням і виникненням множинної мієломи. У когорті з 152 520 учасників ліквідації аварії на ЧАЕС протягом 1986-2013 рр. було ідентифіковано 75 випадків. Тенденція до під-

вищення захворюваності через 20 років після опромінення змінилася на статистично значуще перевищення загальнонаціонального рівня (SIR 1,86; 95 % ДІ 1,27-2,44) [38]. Планується аналітичне епідеміологічне дослідження за дизайном випадок–контроль, яке може дозволити визначити дозозалежні коефіцієнти ризику виникнення множинної мієломи.

Радіаційним ризикам лейкемії у опромінених в дитячому віці, були присвячені тільки описові дослідження. Контроверсійними стали результати досліджень міжнародного консорціуму. Збільшення захворюваності на лейкемію у опромінених внутрішньоутробно, потребує ретельної перевірки.

У віддаленому періоді збільшилася захворюваність на деякі види солідних раків серед учасників ЛНА та постраждалих. Радіаційні ризики раку молочної залози встановлено для жінок-ліквідаторів 1986-1987 рр., а також жінок, які проживають у найбільш забруднених районах Білорусі та України. Тривалість латентного періоду залежить від типу раку і дози опромінення. Радіаційні ризики солідних раків в таких групах, як ліквідатори та евакуйовані, мають бути додатково вивчені і оцінені.

#### **Непухлинні ефекти опромінення**

Протягом останнього десятиліття зростає число доказів радіаційних ризиків непухлинної патології, в першу чергу, кардіо- та цереброваскулярних захворювань [61, 78, 82]. Епідеміологічні дослідження зумовлених неонкологічними хворобами медичних наслідків аварії на ЧАЕС проведені на підставі даних Державного реєстру України осіб, які постраждали внаслідок Чорнобильської катастрофи (ДРУ) і клініко-епідеміологічного реєстру ННЦРМ (КЕР), що є спеціалізованим науковим підреєстром ДРУ. З 318 988 учасників ЛНА, серед яких 196 423 осіб чоловічої статі брали участь у ліквідації наслідків аварії в 1986-1987 рр., була сформована когорта, що містить 68 145 осіб — учасників ЛНА на ЧАЕС 1986-1987 рр. — віком від 18 до 60 років на момент аварії, щодо яких наявна інформація про дози зовнішнього опромінення всього тіла. Аналіз даних про непухлинну захворюваність проведено за п'ятирічними періодами спостереження [30]. Встановлено, що стан здоров'я учасників ЛНА на ЧАЕС істотно погіршився у післяаварійному періоді за рахунок непухлинних захворювань. Частка здорових та практично здорових осіб знизилася з 68 % (1988 р.) до 5,5 % (2012 р.), доля осіб, які мають хронічні захворювання, зросла відповідно з 32,4 до 94,5 % [30]. У структурі захворюваності домінували хвороби системи кровообігу, органів травлення, дихання, нервової системи та органів чуття, ендокринної системи. Основний підйом захворюваності мав місце в

період 11-22 років після аварії. Для ряду форм і класів хронічної непухлинної патології встановлено статистично достовірні відносні ризики й ексцеси ризиків при дозах зовнішнього опромінення всього тіла в діапазоні 0,25-0,7 Гр. Аналіз відносних радіаційних ризиків за даними поглибленого клініко-епідеміологічного обстеження (1992-2004 рр.) в ННЦРМ 7665 учасників ЛНА на ЧАЕС 1986-1987 рр. чоловічої статі з різними дозами зовнішнього опромінення всього тіла хворих на ХОЗЛ виявив достовірний зв'язок розвитку цієї патології з впливом іонізуючого опромінення в дозах вище 0,25 Зв (контроль склали пацієнти з дозами нижче 0,05 Зв). У структурі причин смерті учасників ЛНА провідну роль відіграють хвороби системи кровообігу, питома вага яких у структурі смертності становить понад 80 %, а також хвороби органів травлення й дихання, нервової системи [17]. Найвищі рівні смертності зареєстровано серед осіб, які отримали дози зовнішнього опромінення всього тіла в діапазоні від 0,05 до 0,7 Гр, насамперед це стосується дозової субкогорт 0,25-0,7 Гр.

#### **Клінічні особливості соматичної патології після опромінення**

Аварія на Чорнобильській АЕС вперше поставила перед науковцями-медиками принципово нову проблему — клінічне визначення, оцінка і лікування наслідків зовнішнього та внутрішнього опромінення великих контингентів учасників ліквідації аварії внаслідок надходження радіонуклідів реакторного походження. Інгаляційної дії радіонуклідів зазнали щонайменше 200 000 постраждалих різних категорій [26].

Бронхолегенева система стала однією з основних тканин-“мішеней”, що в подальшому реалізувалось хронічними обструктивними захворюваннями легень (ХОЗЛ), маніфестація яких відбулася протягом перших 3-5 років після участі пацієнтів у виконанні післяаварійних робіт [28, 33, 84].

Встановлено дозову залежність між показниками респіраторної функції, в тому числі і стосовно дифузійної спроможності легень (DLco), показниками клітинного імунітету та дозою опромінення для групи пацієнтів з числа учасників ЛНА на ЧАЕС, опромінених у дозах більше 500 мЗв. Для постраждалих категорій хворих характерними є більш тяжкий перебіг та наявність кількох супутніх захворювань, тобто ХОЗЛ є складовою поліорганної патології, яка істотно спричинена порушеннями систем забезпечення гомеостазу [28].

За даними ендоскопічних досліджень верифікований хронічний дифузний атрофічний ендобронхіт зі значними фібротичними змінами слизової оболонки бронхів морфологічно відповідний хронічному

запальному процесу з виразними порушеннями регенерації, пошкодженням мукоциліарного апарату війчастих епітеліоцитів, патологією мікроциркуляції й епітеліально-сполучнотканинних взаємовідносин, трансформованим фібрилогенезом, неспроможністю місцевих механізмів захисту та ознаками інтенсифікації інволюційних реакцій. Ендобронхіальне середовище контаміноване 2-4 видами представників резидентної й патогенної мікрофлори з різною чутливістю до антибактеріальних препаратів та типовою інвазією мікроорганізмів у власну пластинку слизової оболонки бронхів [27].

В групі постраждалих з дозами опромінення більше 500 мЗв у віддаленому післяаварійному періоді встановлене вірогідне зростання частоти раку легень (2,43 % порівняно з 0,60 % при дозах менше 500 мЗв, ( $P < 0,01$ )). Доза опромінення в учасників ЛНА чоловічої статі, у яких в подальшому розвинувся рак легень, була вища — ( $368,7 \pm 90,8$ ) мЗв, ніж у тих, в кого рак легень був відсутнім — ( $204,2 \pm 5,6$ ) мЗв, ( $P < 0,05$ ) [25].

Структура морфологічних характеристик раку легень в учасників ЛНА на ЧАЕС (суттєва перевага плоскоклітинної метоплазії (49,37 %) та аденокарциноми (25,32 %)) відповідає наслідкам інгаляційної дії радіонуклідів реакторного походження та зовнішнього опромінення [85].

Науковцями ННЦРМ вивчені особливості клінічного перебігу найпоширеніших хвороб системи кровообігу в учасників ЛНА на ЧАЕС, а саме гіпертонічної хвороби (ГХ), ішемічної хвороби серця (ІХС) [39, 41, 44, 62], порушень серцевого ритму та серцевої недостатності [62]. Визначено, що в осіб, які зазнали дії іонізуючого опромінення в дозах більше 50-250 мГр, формування кардіальної патології відбувається на 5-7 років раніше, ніж у неопроміненого населення таких самих вікових груп з аналогічним складом факторів ризику. Участь в ліквідації наслідків Чорнобильської аварії підвищувало ризик розвитку ГХ та ІХС у 2,1-4,9 рази [7, 19].

Визначені гендерні особливості перебігу ГХ та ІХС в УЛНА 1986-1987 рр., які полягали в тому, що ГХ розвивалася в чоловіків та жінок учасників ЛНА в більш молодому віці, ніж у відповідних неопромінених осіб, без істотної різниці між собою. Ознаки ІХС з'являлися у чоловіків-учасників ЛНА на 5-7 років вірогідно раніше, ніж у жінок-учасниць ЛНА та неопроміненому контролі [5].

Показана роль спадковості у формуванні серцево-судинної патології. Вивчення поліморфізму rs966221 гена фосфодіестерази 4D дозволило визнати носіїв генотипу ТТ як групу ризику розвитку інфаркту міокарда в будь-якому віці [23, 42, 74]. Крім того, генотип ТТ гена PDE4D був фактором, що асоційований зі зниженою функцією ендоген-

ної мобілізації CD34(+)CD31(+) клітин, їх гіпоактивністю в ішемізованій тканині міокарда в учасників ЛНА з ІХС і дозою опромінення до 50 сГр [6]. В учасників ЛНА з ІХС закономірним було вірогідне зниження більшості статистичних і спектральних показників варіабельності серцевого ритму, посилення симпатичного та зменшення парасимпатичного контролю, особливо при стенокардії і постінфарктному кардіосклерозі [62].

Основними патофізіологічними механізмами розвитку патології системи травлення визначені порушення органної гемодинаміки у слизовій оболонці шлунка та дванадцятипалої кишки, зниження артеріального кровотоку, підвищення тонуусу і зниження еластичності вен та судин мікроциркуляторного русла печінки, а також виражені порушення рівноваги прооксидантно-антиоксидантої системи [20, 50].

#### **Психічне здоров'я та цереброорганічні розлади у постраждалих**

Міжнародні дослідження показали наявність у населення, постраждалого від аварії на Чорнобильській АЕС, довгострокових психічних розладів, у тому числі депресії, тривожності та посттравматичних стресових розладів. Ці ефекти було зареєстровано в описативних міжнародних програмах ІРНЕСА та Франко-Німецької ініціативи, однак зв'язку з дозою опромінення визначено не було. Експертами Чорнобильського форуму ООН окреслено чотири головні нейропсихіатричні наслідки катастрофи: 1) пов'язані зі стресом розлади; 2) ефекти на головний мозок, що розвивається; 3) органічне ураження мозку в учасників ЛНА на ЧАЕС і 4) суїциди, та зазначено зростання серцево-судинних захворювань в УЛНА, які зазнали дії значних доз опромінення [56]. Головними механізмами виникнення нервово-психічних розладів внаслідок радіаційної надзвичайної ситуації є такі: 1) стресорний/психосоматичний (внаслідок психогенного впливу надзвичайної ситуації); 2) соматопсихічний та церебрально-органічний (внаслідок виникнення соматоневрологічної, особливо цереброваскулярної, патології) та 3) радіоцеребральні ефекти [14, 68].

Міжнародне епідеміологічне психіатричне дослідження УЛНА з використанням стандартизованого психіатричного інтерв'ю показало наявність довготривалих порушень психічного здоров'я учасників ЛНА за рахунок депресії, тривоги, ПТСР, суїцидальної ідеї, а також головного болю. Встановлено, що найбільш експоновані до катастрофи учасники ЛНА мали гірше психічне здоров'я, зокрема найбільшу соматизацію [71].

Емоційні наслідки радіаційних аварій включають депресію, тривогу, ПТСР та медично нез'ясо-



вані соматичні симптоми. Порушення психічного здоров'я призводить до розладів фізичного здоров'я. Сприйняття радіаційного ризику є основним чинником занепокоєння здоров'ям, пов'язаним з аварією [45, 46].

Таким чином, психічні розлади, асоційовані зі стресом, тобто психогенним впливом як самої радіаційної надзвичайної ситуації, так і соціальних змін, викликають не тільки порушення психічного здоров'я та психологічної адаптації, але й за психосоматичним механізмом — окреслені соматоневрологічні захворювання. Це потребує організації державної системи охорони психічного здоров'я при надзвичайних ситуаціях.

Соматоневрологічні захворювання можуть викликати соматогенні психічні або соматопсихічні розлади. Церебрально-органічні психічні розлади у постраждалих переважно мають судинне, дисметаболічне, демієлінізаційне та аутоімунне походження. Для цереброваскулярної патології встановлені радіаційні ризики при дозах > 0,1 Гр [35], >0,15 Гр [60] та >0,25 Гр [48, 49].

У Міжнародному проекті з ЄС “CEREBRAD” визначені певні молекулярні механізми цереброваскулярної патології і нейрокогнітивного дефіциту після опромінення, а саме скорочення довжини теломер, зміни експресії генів та апоптозу при дозах > 0,25 Гр [37].

У перші післяаварійні роки вегетосудинна дистонія була діагностована приблизно у чверті УЛНА. У подальшому вона трансформувалася до цереброваскулярної патології (хронічна ішемія головного мозку, МКХ-10: I67.8, церебральний атеросклероз, I67.2 і гіпертонічна енцефалопатія, I67.4), яка традиційно діагностується як “дисциркуляторна енцефалопатія” [15, 69, 70].

Підтверджена радіочутливість головного мозку при опроміненні у малих дозах, особливо у кортико-лімбічній системі домінуючої півкулі та зоні Верніке. Знайдені нові дозозалежні ефекти для психофізіологічних змін у людей при дозах > 0,05 Гр; нейропсихіатричних, нейрофізіологічних, нейропсихологічних і нейровізуалізаційних — > 0,3 Гр, а нейрофізіологічні і нейровізуалізаційні радіаційні маркери — > 1 Гр [3, 15, 16, 47, 64, 69].

Встановлені нові патогенетичні механізми радіоцеребральних ефектів — інгібіція нейрогенезу (переважно у гіпокампі), зміни теломер і експресії генів, апоптоз, нейрозапалення, аутоімунні процеси, мультиорганна дисфункція та ін. [3, 37, 15, 64, 69, 73].

Вперше встановлена роль поліморфних варіантів 5HTTLPR/rs25531 гена транспортера серотоніну SLC6A4 — у носіїв проміжного L'S та низькофункціонального S'S поліморфізмів, підвищено

ризик виникнення нейропсихіатричних ефектів після опромінення [1].

Після внутрішньоутробного опромінення внаслідок Чорнобильської катастрофи вперше виявлено дозозалежну дисгармонію інтелекту за рахунок зменшення вербального коефіцієнта інтелектуальності внаслідок порушення розвитку домінуючої півкулі головного мозку, а також збільшену частоту межових нервово-психічних розладів [13, 67, 76]. Розроблено експериментальну модель внутрішньоутробного опромінення радіоактивним йодом. Порушення гіпокампального нейрогенезу при опроміненні *in utero* можуть бути біологічним базисом радіонейроембріологічних ефектів [29].

Вперше запропоновано розглядати синдром хронічної втоми (СХВ) як сполучений ефект малих доз іонізуючого випромінювання і стресу [65]. Після робіт з перетворення об'єкту “Укриття” ЧАЕС на екологічно безпечну систему виявлено розвиток когнітивного варіанту СХВ [72].

Дискусійним залишається вплив іонізуючої радіації на розлади спектра шизофренії [66].

#### Фундаментальні механізми

Стратегічним завданням радіаційної медицини після Чорнобилю є визначення фундаментальних механізмів дії малих доз опромінення, вивчення ролі імунологічних, метаболічних та генетичних процесів, нейро-імунної взаємодії. За період 1987-2016 рр. в ННЦРМ проведено дослідження стану клітинного та гуморального імунітету у більше ніж 201 тис. постраждалих, здійснюється багаторічний імунологічний моніторинг пацієнтів, які вижили після гострої променевої хвороби, учасників ЛНА за програмою Клініко-епідеміологічного реєстру, дітей, які були опромінені внутрішньоутробно. У хворих, що потерпіли від гострої променевої хвороби, у віддаленому періоді зареєстровано відновлення деяких популяцій імунокomпетентних клітин — T-лімфоцитів, у тому числі цитотоксичних T-клітин, B-лімфоцитів та природних кілерних клітин. Разом з тим, у віддаленому періоді після опромінення в дозах понад 2 Гр зберігаються залежні від дози опромінення порушення субпопуляцій та їх функціональної активності, виснаження компенсаторних клітинних резервів.

За завданнями МінЧорнобилю України проведено селективний цитогенетичний моніторинг груп пріоритетного спостереження (близько 3500 осіб) — учасників ЛНА з різними дозами опромінення, включаючи осіб, які перенесли гостру променево хворобу; працівників ЧАЕС; персоналу об'єкту “Укриття”; евакуйованих, дитяче і доросле населення радіаційно забруднених територій; деяких професійних груп (лісники, механізатори сільсько-



го господарства), які проживають і працюють в зонах інтенсивного забруднення радіонуклідами, самоселів з 30-км зони відчуження. Встановлено, підвищену частоту цитогенетичних маркерів опромінення, зростання хромосомної нестабільності. Проведені дослідження підтвердили зростання інтенсивності соматичного хромосомного мутагенезу у людини не лише в найближчі, але й у віддалені терміни після аварії на ЧАЕС, що можна вважати одним із факторів ризику реалізації патології з генетичним компонентом — онкологічних та спадкових захворювань, народження дітей з вадами розвитку, соматичної патології [22]. Крім мінісателітних досліджень, збільшилося число доказів ролі геномної нестабільності, послаблення імунітету та інших немішених ефектів, але кількість досліджень є недостатньою. Пріоритетними можуть стати результати широкомасштабного міжнародного дослідження геномних порушень у дітей, народжених від опромінених батьків.

У наукових дослідженнях, які проводяться в лабораторії імунології ННЦРМ використовують декілька біодозиметричних технологій, серед них — дослідження експресії гістону H2AX, який, як відомо, швидко фосфорилується по серину 139 в результаті подвійних розривів ДНК, що викликані впливом іонізуючого випромінювання. У віддаленому періоді після опромінення в учасників ЛНА на ЧАЕС спостерігається тенденція до підвищення експресії фосфорильованої форми гістону  $\gamma$ -H2AX у лімфоцитах периферичної крові. Підвищення експресії  $\gamma$ -H2AX може бути асоційованим з дією радіації і відображати неефективність механізмів репарації та наявність вторинної нестабільності геному [18].

За 2006-2017 рр. сучасними методами поглибленого аналізу радіобіологічних ефектів — генної регуляції довжини теломер, апоптозу, клітинного старіння обстежено більше 1000 учасників ЛНА. Встановлено зв'язок радіаційних ефектів в імунній системі з дозою та віком на момент опромінення. Визначено скорочення відносної довжини теломер лімфоцитів периферичної крові учасників ЛНА на ЧАЕС по відношенню до неопромінених осіб відповідного віку [2, 11]. Результати досліджень показали наявність молекулярних механізмів, що сприяють розвитку когнітивного дефіциту у віддаленому періоді після опромінення [10, 59]. Встановлена негативна кореляція між довжиною теломер та рівнем когнітивного дефіциту (шкала MMSE), а також між віком і рівнем когнітивного дефіциту. Спільно з фахівцями Інституту Густава Руассі (Франція) розроблено метод визначення та проведено дослідження кількості “надкоротких” теломер, з якими пов'язується розвиток радіацій-

ного старіння [43]. Теломери та генна регуляція їх функціонування відіграють роль у регуляції судинного старіння, а скорочення довжини теломер на сьогодні розглядається як маркер кардіоваскулярних захворювань та пов'язаної з ними смертності.

Дослідження на протязі післяаварійних років вказують, що опромінення в низьких дозах викликає системні клітинні реакції, що визначаються, як у ранньому, так і у віддаленому періоді. Співробітниками лабораторії імунології ННЦРМ доведено, що основу розвитку імунологічної недостатності та підвищення ризику клітинної трансформації віддаленого періоду після опромінення складають пов'язані з дозою порушення механізмів генної регуляції основних гомеостатичних систем клітини, які полягають у дисбалансі експресії про-та антиапоптотичних генів (*TP53*, *TP53I3*, *FASLG*, *BAX*, *BIRC5*) і незавершеності процесу апоптозу у дозовому інтервалі понад 500 мЗв; клітинному старінні та *TERT* пов'язаному ризику трансформації імунокомпетентних клітин за посередництвом *TP53*-опосередкованої регуляції; порушеннях циклін-кіназної регуляції клітинного циклу, диференціювання та сигнальної трансдукції (*CCND1*, *CDKN1A*, *CDKN2A*, *CDKN1B*, *TGFBR1*, *MAPK14*); збереженні радіогенних мутацій TCR і гіперекспресії генів *MAPK14*, *MKNK2*, *CDKN1A*, *CDKN1B*, *CDKN2A*, *TGFBR1*, *CSF2* в ефекторних субпопуляціях лімфоцитів (CD16+CD57+, HLA-DR+). У ранньому періоді після опромінення у межах професійних лімітів до 20 мЗв встановлено активацію захисно-компенсаторних процесів у комплексі з проявами радіаційного старіння імунокомпетентних клітин за рахунок підвищеної інтенсивності апоптозу, порушень генної регуляції теломеро-теломеразного комплексу (*TERF1*, *TERF2*, *TERT*, *DDB2*) та гіперекспресії антигенів, пов'язаних з противірусним імунітетом та протипухлинним наглядом.

Важливими є дослідження механізмів радіаційного канцерогенезу, що проводяться в інститутах НАМН України, зокрема при раку щитоподібної залози, сечового міхура та передміхурової залози і лейкемії. Встановлено включення деяких загальних механізмів: *TP53*, *BRAF*, *RET-PTC* та ін. Драйверні мутації встановлено у 96,9 % випадків раку щитоподібної залози, з них точкові мутації у 26,2 %, генні злиття — 70,8 %, у т. ч. химерні гени *POR-BRAF* та *STRN-ALK*. Середня доза йоду-131 для точкових мутацій становила 0,2 Гр, у суб'єктів з химерними генами — 1,4 Гр [81]. Після отримання доказів радіоіндукованості хронічної лімфоцитарної лейкемії, при цій патології розпочато повногеномні дослідження, точкових мутацій генів *SF3B1*, *NOTCH1*, *BIRC3*, *POT1*, *CDKN*, *Cyclin D1*.

Чорнобильський досвід дозволив отримати нові знання у радіаційній медицині та радіобіології. Продовження досліджень є дуже перспективним, передусім для пошуку нових біомаркерів малих доз іонізуючої радіації та забезпечення радіаційної безпеки, зокрема при довготривалих космічних польотах та в інтервенційній радіології.

#### Дози та ефекти у населення в зонах спостереження об'єктів ядерного циклу

До ядерно-небезпечних підприємств на території України відносяться видобувні і переробні підприємства природної уранової руди в Дніпропетровській області — в м. Жовті Води (Державне підприємство “Східний гірничо-збагачувальний комбінат” — ДП “Схід ГЗК” з двома працюючими з 1956 р. шахтами) та в м. Дніпродзержинськ — Виробниче об'єднання “Придніпровський хімічний завод” (далі — ДП “ПХЗ”), яке в період з 1949 по 1991 рр. переробляло доменний шлак, ураномісткі концентрати та уранову руду [24]. ДП “Схід ГЗК” є найбільшим в Європі підприємством такого типу. Дві діючі уранові шахти, що належать цьому комбінату, за своїм енергетичним еквівалентом рівноцінні 60 вугільним шахтам. На території ДП “ПХЗ” та за його межами створено сім хвостосховищ, два сховища відходів уранового виробництва і цех для отримання окису-закису урану з азотнокислих розчинів [63]. Все це розміщено в глиняних кар'єрах і балках, спеціально для цього не підготовлених. Створено дев'ять відкритих для атмосферних опадів хвостосховищ відходів уранового виробництва, що мають загальну активність  $2,7 \times 10^{15}$  Бк (середня питома активність 6,4 кБк/кг). Загальна площа цих хвостосховищ, в яких накопичено 42 млн тонн відходів переробки уранових руд, становить 270 га. Потужність експозиційної дози на цій території знаходиться в межах від 30 до 35 000 мкР/год. Щорічно з хвостосховищ в атмосферу потрапляє  $2,13 \times 10^{13}$  Бк радону і 23,9 тонни радіоактивного пилу з середньою питоною активністю 3,7 Бк/кг, із сховищ відходів уранового виробництва —  $2,3 \times 10^{13}$  Бк радону та 8,9 тонни радіоактивного пилу з середньою питоною активністю 2,9 мБк/кг. Хвостосховища є джерелом забруднення підземних вод на відстані 370-860 метрів від їх контуру. Річний винос природних радіонуклідів з наземними (р. Коноплянка, яка протікає поблизу) і підземними водами у р. Дніпро наведено в таблиці 1 [4].

Результати епідеміологічного та радіаційно-гігієнічного аналізу свідчать про тривале погіршення стану радіаційної безпеки на уранових шахтах України. Величина ризику захворюваності на рак легень для персоналу за 20 років підвищилася до  $6,44 \times 10^3$ /рік. Згідно з розрахунками такому зна-

ченню ризику відповідає доза більше 100 мЗв на рік при річному ліміті за НРБУ-97 у 20 мЗв на рік [12]. За результатами реконструктивних оцінок накопичених ефективних та еквівалентних доз на легені у 35 гірників уранових шахт з раком легень при підземному стажі 20 років середні значення накопичених доз становили 500 мЗв, а накопичені еквівалентні дози на легені — близько 2000 мЗв. У 37 % гірників еквівалентні дози перевищували 0,75 ліміту для категорії А, а у 17,2 % — відповідали граничним значенням, або перевищували їх [36].

Таблиця 1

Річний винос природних радіонуклідів (Бк) у р. Дніпро з території хвостосховищ ВО “ПХЗ” з загальною площею 2,7 км<sup>2</sup>

Радіоактивний елемент	З наземними водами	З підземними водами
Уран-238	$5,5 \times 10^{10}$	$1,6 \times 10^8$
Радій-226	$1,9 \times 10^{10}$	$2,5 \times 10^7$
Свинець-210	$4,4 \times 10^{10}$	$1,5 \times 10^6$
Полоній-210	$8,8 \times 10^9$	$1 \times 10^7$
Торій-230	$5,5 \times 10^9$	$2,5 \times 10^7$

За рахунок хвостосховищ відходів уранового виробництва додаткова ефективна доза індивідуального опромінення населення (категорія В) варіює у межах 0,45-2,7 мЗв/рік. Дослідженнями ННЦРМ встановлено, що частота усіх форм злоякісних новоутворень (ЗН) серед мешканців міст, розташованих поряд з вказаними об'єктами достовірно перевищує як національний так і регіональний рівні. Поміж окремих нозологічних форм має місце ексцес раку трахеї, бронхів та легенів, молочної залози, нирки та лейкемії (табл. 2). Не встановлено радіаційних ризиків раку щитоподібної залози [36].

Результати досліджень співпадають зі світовими, заснованими на когортних дослідженнях населення та персоналу, опроміненого на перших етапах впровадження ядерних технологій, коли їх застосування випереджало застосування необхідного радіаційного захисту та мало наслідком радіаційні ефекти. В Україні проведення таких дескриптивних досліджень стало можливим завдяки створенню та функціонуванню Національного канцер-реєстру МОЗ, бази даних якого містять персоналізовану інформацію з розподілом за нозологічними формами і роками реєстрації.

Основним фактором промислової небезпеки для близько 50 тис. персоналу категорії А є контакт з іонізуючим випромінюванням, мірилом якого є доза опромінення людини. На оцінці доз, які отримують у процесі виробничої діяльності працівники, базуються основні принципи радіаційного захисту, визначені у Нормам радіаційної безпеки України (НРБУ-97).

Таблиця 2  
**Захворюваність на злоякісні новоутворення населення міст  
 Дніпродзержинськ та Жовті Води за 2003-2008 рр.  
 по відношенню до національних показників  
 (стандартизовані співвідношення захворюваності — SIR, %)**

Форма ЗН та шифр МКХ-10	Об'єднані показники по Дніпродзержинську та Жовтих Водах			
	Фактичне число ЗН	Очікуване число ЗН	SIR, %	95 % ДІ
Всі форми ЗН (C00-C97)	7353	6568,8	111,9	109,4- 114,5
ЗН трахеї, бронхів, легень (C33, C34)	931	741,1	125,6	117,6- 133,7
ЗН молочної залози (C50)	770	671,8	114,6	106,5- 122,7
ЗН нирок (C64, C65)	246	198,9	123,7	108,2- 139,1
Лейкемія (C91-C95)	214	147,6	145,0	125,6- 164,4

Фактично, з трьох принципів радіаційного захисту НРБУ-97 частково виконується лише один (обмеження) і через відсутність засобів контролю не можуть виконуватись два інших (виправданості та оптимізації). Принцип обмеження виконується неповною мірою через те, що сьогодні технічні та організаційні можливості наявних дозиметричних служб дозволяють контролювати лише окремі критичні параметри, а саме — дози всього тіла від жорсткого гамма-випромінювання. Водночас, дози рентгенівського і нейтронного випромінювання, а також дози на шкіру, кінцівки та кришталик ока (усі нормуються і мають контролюватися згідно з НРБУ-97) не контролюються. Не контролюються також додаткові ліміти доз, зокрема дози жінок віком до 45 років. Відсутність центрального (національного) дозиметричного реєстру в умовах мобільності робочої сили не дозволяє здійснювати наскрізний контроль виконання основного дозового ліміту (100 мЗв за 5 років поспіль).

В той же час, в Україні існують передумови для створення єдиного медико-дозиметричного реєстру та існують локальні елементи, які можуть бути використаними. Індивідуальні дані накопичуються у медико-санітарних частинах та дозиметричних підрозділах об'єктів ядерної енергетики.

Національна система реєстрації раку включає локальні та централізований реєстри з достатньої якості ідентифікаційними та клініко-патологічними даними, але відсутніми даними щодо професійного опромінення. Прикладами регіональних реєстрів є реєстр, який підтримується Інститутом медичної радіології ім. О. С. Григор'єва, та реєстр ННЦРМ для персоналу об'єкту "Укриття", який

містить поглиблені клінічні та дозиметричні дані, включаючи дози від інкорпорації трансуранових елементів. Агрегована інформація доступна МОЗ України та НАЕК "Енергоатом" з локальних статистичних звітів. Аналіз, проведений МОЗ України у 2002 та 2004 рр., дозволив описати загальний стан дозиметричного моніторингу та визначити число персоналу під ризиком.

НАМН України спільно з Державною інспекцією ядерного регулювання розроблено проект Концепції Державної цільової програми створення єдиної державної системи контролю та обліку індивідуальних доз опромінення в Україні. Відповідно до статті 18 Закону України «Про захист людини від впливу іонізуючого випромінювання», пункту 4 (підпункт 28) Положення про Державну інспекцію ядерного регулювання України, затвердженого Указом Президента України від 06.04.2011 р. № 403/2011, запропоновані заходи покликані радикально поліпшити стан радіаційної безпеки в Україні та привести ситуацію з професійним опроміненням персоналу категорії А у відповідність до вимог законодавства України, а також норм Європейського союзу та МАГАТЕ. Пілотний проект з верифікації доз опромінення персоналу, який розпочато в 2012 р. в Одеській області, потребує подальшого розширення та впровадження.

#### Опромінення в гірничій та металургійній промисловості

НКДАР ООН [90] визнано вплив радіоактивних матеріалів, що звільняються при видобуванні корисних копалин на людину. Для оцінки рівня вивільнення радону було використано два підходи. Перший був заснований на припущенні, що 20 % радону, який міститься в руді, вивільнюється в процесі видобутку, та що рівень вивільнення радону при переробці руди в 2 рази вище, ніж при видобутку корисних копалин. Альтернативний підхід був заснований на масштабуванні вивільнення від уранових рудників, з урахуванням середнього коефіцієнта в 1000 між активністю  $^{226}\text{Ra}$  на одиницю маси уранової руди та вугілля. Ці підходи призвели до оцінок, нормованої колективної ефективної еквівалентної дози у  $6 \times 10^{-4}$  та  $1 \times 10^{-2}$  людино-Зв/ГВт, та активності радону від 30 до 800 ТБк, відповідно.

Концентрації активності радіонуклідів природного походження в летючій золі на порядок вищі, ніж у вугіллі, перш за все за рахунок згоряння органічної складової вугілля. Існує також очевидно збагачення  $^{210}\text{Po}$  і  $^{210}\text{Pb}$  у мікродисперсних частинках, які менш ефективно затримуються електрофільтрами та скруберами. У звіті 1988 р. розглянуто два типи вугільних електростанцій — з відносно

простими заходами з обмеження викидів (близько 10 % від загальної кількості золи) та з більш складними заходами контролю (викид 1 % золи). Застосовано фактори збагачення при фільтрації: 3 — для  $^{210}\text{Po}$  та  $^{210}\text{Pb}$ , 1 — для ізоотопів радію, урану і торію. Викиди  $^{222}\text{Rn}$  і  $^{220}\text{Rn}$  розглядалися окремо, оскільки ці нукліди не можуть бути зібрані пристроями уловлювання твердих частинок. Розрахункові річні дози від інгаляції становили 1 мкЗв та 20 мкЗв, для сучасних і старих підприємств, відповідно, на 1 ГВт електроенергії. Було відзначено, що вимірювання в навколишньому середовищі навколо вугільних електростанцій не показали істотного збільшення концентрації активності, а дози від продуктів харчування, швидше за все, є низькими.

### Медичне опромінення

Діагностика методами медичного, стоматологічного рентгенівського обстеження та ядерної медицини викликає опромінення з ефективною дозою 0,64 мЗв на душу населення. На медичне опромінення припадає близько 20 % від середньої річної дози, або приблизно 4,0 млн людино-Зв. Щорічно проводяться 3,1 млрд діагностичних досліджень та 0,46 млрд стоматологічних радіологічних обстежень.

Медичне опромінення за рахунок діагностичної, інтервенційної радіології та ядерної медицини в розвинутих суспільствах стало найбільшим зі штучних джерел радіаційного опромінення, нараховуючи в середньому ефективну дозу 3,0 мЗв на душу населення на рік, що є співставним за радіологічним ризиком з 150 рентгенографіями грудної клітки, та в 3 рази перевищує ліміти доз безпечного проживання на радіоактивно забруднених територіях. Застосування методів візуалізації за допомогою іонізуючої радіації призводять до значних ефективних доз у пацієнтів. В Україні, за даними МОЗ (2010), проводиться щорічно більше 16 000 000 рентгенологічних досліджень, 16 000 000 флюорографій, радіаційну терапію отримують понад 92 000 хворих. Відкриваються нові центри комп'ютерної томографії та інтервенційної кардіології. Дозові навантаження та якість дозиметрії при застосуванні цих процедур повинні ретельно контролюватися, в тому числі й у персоналу.

Радіологи або кардіологи при проведенні інтервенційних рентгенівських обстежень зазнають впливу кумулятивних доз радіації, які набагато вищі, ніж у лікарів і в інших областях радіології. Інтервенційна кардіологія, надаючи пацієнту важливу допомогу, призводить до опромінення органів поряд із серцем. У французькому дослідженні 2095 хворих доза на легені при коронарній ангіографії становила 34 мГр у чоловіків та 22 мГр у

жінок; на кістковий мозок — відповідно 8 та 4 мГр. При трансскірній коронарній ангіопластиці дози були вдвічі вищими. Додатковий радіаційний ризик фатальних раків для пацієнтів, вперше опромінених у віці старше 60 років, становив від 0,4 до 4 %. Негативні наслідки професійного опромінення повинні стати об'єктом наукового узагальнення. Впроваджуватися повинні підходи, засновані на останніх висновках про радіаційні ризики онкологічних і непухлинних захворювань.

Проведений аналіз свідчить, що в Україні існує цілий комплекс проблем, породжених аварійним опроміненням внаслідок Чорнобилю та опроміненням при щоденній виробничій практиці. Першочерговим завданням є впровадження в реальність правил радіаційної безпеки для забезпечення захищеності жителів країни від можливого несприятливого впливу на їхнє здоров'я джерел іонізуючої радіації. Ця захищеність визначається наявністю необхідних законів, нормативних та інструктивно-методичних документів і контролем їх виконання.

Викликами часу є:

- зростання передчасної смертності ліквідаторів від непухлинних захворювань, у першу чергу — серцево-судинних: ішемічної хвороби серця та цереброваскулярних захворювань;
- зростання у ліквідаторів частоти онкологічних захворювань, насамперед раку щитоподібної залози, сечовидільної системи, молочної залози та легенів, з гематологічних захворювань — множинної міеломи та мієлодиспластичного синдрому;
- підвищення захворюваності в евакуйованого населення, що зазнало дії радіоактивного йоду внутрішньоутробно, у дитячому та дорослому віці;
- зростання частоти ефектів від джерел неаварійного походження: об'єктів ядерної спадщини, медичного та професійного опромінення.

Для протистояння цим викликам часу українська радіаційна медицина має:

- досвід радіаційно-гігієнічного контролю;
- систему спеціалізованих диспансерів, відділень та кабінетів радіаційного захисту населення, ННЦРМ та інші установи, висококваліфікований персонал установ МОЗ та НАМН України;
- Національну комісію радіаційного захисту при Верховній Раді України;
- Державний реєстр постраждалих внаслідок Чорнобильської катастрофи та Національний канцер-реєстр.

В умовах реформи системи охорони здоров'я необхідно не руйнувати, а розвивати існуючу систему надання медичної допомоги постраждалим. Спільними зусиллями МОЗ, Національної академії медичних наук та інших відомств необхідно забезпечити:

- сучасну діагностику, диспансеризацію та ефективне лікування захворювань, що загрожують життю постраждалих;
- модернізацію Державного реєстру;
- радіаційний контроль на територіях з аномально високими рівнями інкорпорації радіонуклідів.

Основні потенційні загрози радіаційній безпеці включають старіння матеріальної бази АЕС з продовженням строків роботи атомних реакторів, у яких закінчився термін експлуатації; існування “ядерної спадщини” колишнього СРСР на територіях підприємств з видобування та переробки уранових руд. Близько п’яти тисяч установ та підприємств використовують загалом більше 25 000 джерел іонізуючого випромінювання. Зростає обсяг використання радіоактивних речовин і джерел іонізуючого випромінювання в медицині, зокрема навантаження на пацієнтів і персонал при інвазивних кардіохірургічних втручаннях. Це потребуватиме значних зусиль у забезпеченні належного радіаційного медичного захисту населення, з урахуванням досвіду ліквідації медичних наслідків Чорнобилю. Не зникла загроза зло-

вмисного використання ядерних технологій. Завданням радіаційної медицини продовжують залишатися фундаментальні дослідження ефектів опромінення у широкому діапазоні доз і розробка та впровадження технологій лікування і радіаційного захисту населення. Фундамент майбутнього закладено успішним виконанням спеціальної програми медичного та біофізичного контролю персоналу в процесі перетворення об’єкта “Укриття” на екологічно безпечну систему, Загальнодержавної соціальної програми поліпшення стану безпеки, гігієни праці та виробничого середовища на 2014-2018 роки; багаторічне успішне співробітництво з Державною інспекцією ядерного регулювання, Національною комісією радіаційного захисту, НАЕК “Енергоатом”, відповідними підрозділами Міністерства охорони здоров’я, міжнародними організаціями — ВООЗ, НКДАР ООН, МАГАТЕ, IARC, Національним інститутом раку США, IRSN, університетами Нагасакі, Хіросіми, Фукусіми та іншими провідними світовими установами, успішне співробітництво з якими триває більше чверті століття.

### Список використаної літератури

1. Абраменко І. В., Білоус Н. І., Чумак С. А., Логановський К. М. Вплив поліморфних варіантів гена SLC6A4 на частоту виявлення депресивних станів у групі УЛНА на ЧАЕС у віддаленому періоді після Чорнобильської катастрофи // Проблеми радіаційної медицини і радіобіології. — 2017. — Вип. 22. — С. 282-291.
2. Бази́ка Д. А., Ільєнко І. М., Логановський К. М. та ін. Молекулярно-генетичні механізми порушення процесів апоптозу та клітинного старіння у хворих на цереброваскулярну патологію у віддаленому періоді після опромінення // Проблеми радіаційної медицини та радіобіології. — 2011. — Вип. 16. — С. 107-120.
3. Бази́ка Д. А., Логановський К. М., Ільєнко І. М. та ін. Порушення генної експресії, теломер та когнітивний дефіцит як функція дози у опроміненіх *in utero* та в дорослому віці внаслідок аварії на ЧАЕС // Проблеми радіаційної медицини та радіобіології. — 2015. — Вип. 20. — С. 283—310.
4. Бази́ка Д. А., Присяжнюк А. Є., Романенко А. Ю. та ін. Частота злоякісних новоутворень у мешканців міст України з радіаційно небезпечним виробництвом // Довкілля і здоров’я. — 2012. — № 2. — С. 17-22.
5. Белый Д. А., Настина Е. М., Сидоренко Г. В. и др. Гендерные особенности развития ишемической болезни сердца у участников ликвидации последствий Чернобыльской аварии // Украинський кардіологічний журнал. — 2017. — Додаток 1 (Мат-ли XVIII Національного конгресу кардіологів України. Київ, 20-21 вересня 2017 р.). — С. 169.
6. Беляева Н. В., Белый Д. А., Беляев О. А., Мазниченко О. Л. Экспрессия молекулы CD31 (PECAM-1) на циркулирующих лейкоцитах и клетках-предшественниках у пациентов с ишемической болезнью сердца // Медицина: актуальные вопросы и тенденции развития: Материалы международной (заочной) научно-практической конференции, Россия, Краснодар, 26 февраля-26 марта 2013. — Краснодар: НИЦ Априори, 2013. — С. 146-148.
7. Білий Д. О., Сидоренко Г. В., Ковальов О. С., Настіна О. М. Найбільш поширені хвороби системи кровообігу у учасників ліквідації наслідків аварії на Чорнобильській АЕС [Електронний ресурс] // Тридцять років Чорнобильської катастрофи: радіологічні та медичні наслідки: Національна доповідь України. — Київ, 2016. — С. 119-125. — ISBN 978-966-7656-0401. — Режим доступу: <https://drive.google.com/open?id=0B1bUIW1YACgZUWZoZm1vMGEyUnM>
8. Гайсенюк Л. О., Кулініч Г. В., Стадник Л. Л. та ін. Дози опромінення та клінічні особливості професійних раків у гірників уранових шахт // Український радіологічний журнал. — 2010. — 18. — С. 426-431.
9. Енергетична стратегія України на період до 2030 року: Постанова КМ України від 15.03.2006, №145-р.
10. Ільєнко І. М., Бази́ка Д. А., Чумак С. А., Логановський К. М. Особливості експресії генів-регуляторів апоптозу та клітинного циклу лімфоцитів периферичної крові при порушеннях когнітивних функцій у учасників ліквідації наслідків аварії на Чорнобильській АЕС // Проблеми радіаційної медицини та радіобіології. — 2012. — Вип. 17. — С. 163-176.
11. Ільєнко І. М., Лясківська О. В., Бази́ка Д. А. Дослідження довжини теломерних послідовностей та апоптозу у лімфоцитах периферичної крові людини у ранній та віддалений періоди після опромінення // Журн. АМН України. — 2012. — 18, № 1. — С. 115-120.
12. Ковалевський Л. І., Оперчук А. П., Лось І. П. Состояние радиационной безопасности на урановых шахтах Ук-

- раини // Довкілля та здоров'я. — 2008. — 45, № 2. — С. 4-8.
13. *Логановська Т. К.* Психічні розлади у дітей, які зазнали внутрішньоутробного опромінення внаслідок аварії на Чорнобильській АЕС: дис. ... канд. мед. наук / Науковий центр радіаційної медицини АМН України. — Київ, 2005. — 253 с.
  14. *Логановський К. М., Петриченко О. О., Морозов О. М.* та ін. Охорона психічного здоров'я при радіаційних аваріях на ядерних реакторах застосуванні “брудної бомби” і тактичної ядерної зброї: методичні рекомендації 178.14/317.14. — Київ: МОЗ України, НАМНУ, Український центр наукової медичної інформації і патентно-ліцензійної інформації, 2015. — 28 с.
  15. *Логановський К. М., Чумак С. А., Бомко М. О.* та ін. Цереброваскулярні захворювання та інші ураження головного мозку у постраждалих внаслідок Чорнобильської катастрофи // Журнал Національної академії медичних наук України. — 2016. — 22, № 2. — С. 163-178.
  16. *Логановський К., Куц К.* Когнітивні викликані потенціали P300 після опромінення // Проблеми радіаційної медицини і радіобіології. — 2016. — Вип. 21. — С. 264-290.
  17. *Медичні наслідки Чорнобильської катастрофи: 1986-2011 / за ред. А. М. Сердюка, В. Г. Бебешка, Д. А. Базики.* — Тернопіль: ТДМУ, 2011. — 1092 с.
  18. *Музалевська К., Базика Д.* Дослідження експресії  $\gamma$ -H2AX гістону у лімфоцитах персоналу об'єкту “Укриття” ЧАЕС при опроміненні у професійних лімітах // XI Міжнародна наукова конференція студентів і аспірантів “Молодь і поступ біології” (м. Львів, 20-24 квітня 2015 року). — Львів: СПОЛОН, 2015. — С. 425.
  19. *Настіна О. М., Сидоренко Г. В., Курсіна Н. В.* та ін. Особливості розвитку хвороб системи кровообігу в учасників ліквідації наслідків Чорнобильської аварії // Журн. НАМН України. — 2016. — 22, № 2. — С. 179-186.
  20. *Носач О. В., Овсяннікова Л. М., Чумак А. А.* та ін. Особливості показників прооксидантно-антиоксидантної рівноваги у хворих на неалкогольну жирову хворобу печінки, які зазнали дії іонізуючого випромінювання внаслідок аварії на ЧАЕС // Проблеми радіаційної медицини та радіобіології. — 2015. — Вип. 20. — С. 420-431.
  21. *Павленко Т. А., Лось І. П.* Существующие дозы облучения населения Украины // Ядерна та радіаційна безпека. — 2009. — № 1. — С. 18-22.
  22. *Пілінська М. А.* Цитогенетичні ефекти // Тридцять років Чорнобильської катастрофи: радіологічні та медичні наслідки: Національна доповідь України / за ред. Д. А. Базики, М. Д. Тронька, Ю. Г. Антипкіна, А. М. Сердюка, В. О. Сушка. — Київ, 2016. — С. 95-96.
  23. *Плескач Г. В., Настіна О. М., Білий Д. О., Чумак А. А.* Асоціація поліморфізму гена фосфодіестерази 4D з ризиком розвитку інфаркту міокарда в учасників ліквідації наслідків аварії на Чорнобильській АЕС // Український медичний часопис. — 2014. — № 3. — С. 126-130.
  24. *Про результати здійснених Рахунковою палатою аудитів ефективності використання коштів державного бюджету, спрямованих на забезпечення екологічної безпеки та захисту населення від шкідливого впливу іонізуючого випромінювання [Електронний ресурс] // Бюлетень Рахункової палати України.* — Режим доступу: <http://www.ac-rada.gov.ua/control/main/uk/publish/article/1492984>
  25. *Сушко В. О., Апостолова О. В., Базика К. Д.* та ін. Ураження бронхолегеневої системи в учасників ліквідації наслідків аварії на Чорнобильській АЕС (1988-2016 рр.) [Електронний ресурс] // Тридцять років Чорнобильської катастрофи: радіологічні та медичні наслідки: Національна доповідь України / за ред. Д. А. Базики, М. Д. Тронька, Ю. Г. Антипкіна, А. М. Сердюка, В. О. Сушка. — Київ, 2016. — Розд. 4.4. — С. 126-129. — Режим доступу: <https://drive.google.com/file/d/0B1bUIW1YACgZnWlZyXRmejZhc2M/view>.
  26. *Сушко В. О., Перевозніков О. М., Нечаєв С. Ю.* Радіаційно-гігієнічні передумови розвитку бронхолегеневої патології при дії зовнішнього опромінення та інгаляції радіонуклідів в умовах Чорнобильської катастрофи // Медичні наслідки аварії на Чорнобильській атомній електростанції / за ред. О. В. Возіанова, В. Г. Бебешка, Д. А. Базики. — Київ: ДІА, 2007. — С. 288-291.
  27. *Сушко В. О., Терещенко В. П., Піщиков В. А.* та ін. Хронічні неспецифічні захворювання легень у ліквідаторів наслідків Чорнобильської катастрофи / за ред. В. П. Терещенко, В. О. Сушка. — Київ: Медінформ, 2004. — 252 с.
  28. *Сушко В. О., Швайко Л. І., Базика К. Д.* та ін. Результати тридцятирічного дослідження стану бронхолегеневої системи в учасників ліквідації наслідків Чорнобильської катастрофи // Журн. НАМН України. — 22, № 2. — 2016. — С. 193-197.
  29. *Талько В. В., Логановський К. М., Дрозд І. П.* та ін. Вплив пренатального опромінення <sup>131</sup>I на головний мозок: експериментальна модель клінічних нейрорадіо-ембріологічних ефектів // Проблеми радіаційної медицини і радіобіології. — 2017. — Вип. 22. — С. 238-269.
  30. *Тридцять років Чорнобильської катастрофи: радіологічні та медичні наслідки: Національна доповідь України / за ред. Д. А. Базики, М. Д. Тронька, Ю. Г. Антипкіна, А. М. Сердюка, В. О. Сушка.* — Київ, 2016. — 177 с.
  31. *Федірко П. А., Бабенко Т. Ф.* Ризик розвитку хвороб ока в когорті радіаційно опромінених внутрішньоутробно осіб // Проблеми екологічної та медичної генетики і клінічної імунології: зб. наук. праць. — Київ-Луганськ, 2013. — 115. — С. 22-29.
  32. *Федірко П. А.* Віддалені наслідки радіаційного впливу на кришталик: результати епідеміологічного дослідження // Проблеми радіаційної медицини. — 2000. — Вип. 7. — С. 20-25.
  33. *Фещенко Ю. І., Сушко В. О., Рекалова О. М., Чернушенко К. Ф.* Хронічні бронхолегеневі захворювання в осіб, які постраждали внаслідок Чорнобильської катастрофи (20 років досліджень) // Журн. АМН України. — 2006. — 12, № 1. — С. 134-147.
  34. *Ainsbury E. A., Bakhanova E., Barquinero J. F.* et al. Retrospective dosimetry techniques for external radiation exposures // Radiat. Prot. Dosim. — 2011. — 147, № 4. — P. 573-592.
  35. *Azizova T. V., Haylock R. G., Moseeva M. B.* et al. Cerebrovascular diseases incidence and mortality in an extended Mayak Worker Cohort 1948-1982 // Radiat. Res. — 2014. — 182, № 5. — P. 529-544.
  36. *Bazyka D. A., Prysyzhnyuk A. Ye., Romanenko A. Ye.* et al. Cancer incidence and nuclear facilities in Ukraine: A community-based study // Exp. Oncol. — 2012. — 34, № 2. — P. 116-120.

37. Bazyka D., Buzunov V., Ilyenko I., Loganovsky K. Epidemiology and molecular studies in cerebrovascular disease at the late period after radiation exposure in Chernobyl [Electronic resource] // Biological responses, monitoring and protection from radiation exposure / ed. by K. P. Mishra. — New York: Nova Science Publishers Inc, 2015. — P. 69-84. — Mode of access: [https://www.novapublishers.com/catalog/product\\_info.php?products\\_id=53310%7b5%7d10&osCsid](https://www.novapublishers.com/catalog/product_info.php?products_id=53310%7b5%7d10&osCsid).
38. Bazyka D., Gudzenko N., Dyagil I. et al. Incidence of multiple myeloma among cleanup workers of the Chernobyl accident and their survival // Exp. Oncol. — 2016. — **38**, № 4. — P. 267-271.
39. Belyi D. A., Bebesko V. G., Weiss M., Fliedner T. M. The cardiovascular system: observations in Chernobyl accident victims // Chronic Irradiation: Tolerance and Failure in Complex Biological Systems: Proceeding of The Advanced Research Workshop on Protracted, Intermittent or Chronic Irradiation: Biological Effects and Mechanisms of Tolerance, held on 14-17 May 2001 at the Science Conference Center Schloss Reisenburg of the University of Ulm, Germany // Br. J. Radiol. — 2002. — Suppl. 26. — P. 258-264.
40. Belyi D., Kovalenko A., Bazyka D. Acute radiation syndrome survivors after Chernobyl accident: history of irradiation, diagnostic mistakes and death reasons in long-term period // Radiation Emergency Medicine. — 2013. — **2**, № 2. — P. 5-12.
41. Belyi D., Kovalenko A., Bazyka D., Bebesko V. Non-cancer effects in acute radiation syndrome survivors in Ukraine // Health Phys. — 2010. — **98**, № 6. — P. 876-884
42. Belyi D., Pleskach G., Nastina O. et al. Features of coronary heart disease development in emergency workers of the Chernobyl accident depending on the action of radiation and non-radiation risk factors and genotypes of single nucleotide polymorphism rs966221 of phosphodiesterase 4D gene // Probl. Radiac. Med. Radiobiol. — 2016. — **21**. — P. 204-217.
43. Benadjaoud M. A., Ilyenko I., Loganovsky K. et al. Association between telomere length distribution and risk of neurocognitive dementia: the possibilities of the functional data analysis // ISRR 2015, 15th International Congress of Radiation Research, May 25-29, Kyoto, Japan. — Kyoto, 2015. — P. 13.
44. Bilyi D. O., Nastina O. M., Gabulavichene Z. M. et al. Radiation and non-radiation factors and their impact on the natural history of coronary heart disease in Chernobyl accident clean-up workers // Probl. Radiac. Med. Radiobiol. — 2014. — **19**. — P. 213-222.
45. Bromet E. J. Emotional consequences of nuclear power plant disasters // Health Phys. — 2014. — **106**, № 2. — P. 206-210.
46. Bromet E. Mental health research after Chernobyl: lessons learned and suggestions for future directions. Cooperation on Chernobyl Health Research (CO-CHER), Mental Health and Risk Communication Expert meeting, 23-24 June 2015, Lyon, France. — Lyon: IARC WHO, 2015.
47. Burlakova E. B., Grodzinsky D. M., Loganovsky K. N. et al. Chernobyl and new knowledge about the impact of low doses of ionizing radiation. Chapter 3 // The Chernobyl disaster / ed. by M. Peterson. — Hauppauge, New York: Nova Science Publisher's, Inc., 2016. — P. 63-106.
48. Buzunov V. O., Voychulene Y. S., Domashevska T. Y. et al. Postaccident changes in health status of the Chernobyl cleanup workers 1986-1987 (period of observation 1988-2012) // Probl. Radiac. Med. Radiobiol. — 2015. — **20**. — P. 157-173.
49. Buzunov V., Tereshchenko V., Krasnikova L. et al. Effects in the Chernobyl clean-up workers of 1986-1987 // Health Effects of the Chernobyl Accident: a Quarter of Century Aftermath / ed. by A. Serdiuk, V. Bebesko, D. Bazyka, S. Yamashita. — Kyiv: DIA, 2011. — P. 321-346.
50. Chumak A., Sarkisova E., Gasanova O., Gasanov A. Fiature of digestive system diseases in persons exposed to ionizing radiation upon the Chernobyl NPP accident // Health effects of Chernobyl accident thirty years aftermath. — 2016. — P. 306-319.
51. Chumak V. V. Retrospective dosimetry of populations exposed to reactor accident: Chernobyl example, lesson for Fukushima // Radiat. Meas. — 2013. — **55**, Special issue. — P. 3-11.
52. Chumak V., Morgun A., Bakhanova E., Voloskyi V. Study of doses to hippocampus of interventional cardiologists and their implication for dosimetric monitoring // Rad. Prot. Dos. — 2016. — **170**, № 1-4. — P. 382-386
53. Chumak V., Morgun A., Bakhanova E. et al. Problems following hippocampal irradiation in interventional radiologists — doses and potential effects: a Monte Carlo simulation // Probl. Radiac. Med. Radiobiol. — 2015. — **20**. — P. 241-256
54. Day R., Gorin M. B., Eller A. W. Prevalence of lens changes in Ukrainian children residing around Chernobyl // Health Phys. — 1995. — **68**, № 5. — P. 632-642
55. Gudzenko N., Hatch M., Bazyka D. et al. Non-radiation risk factors for leukemia: A case-control study among Chernobyl cleanup workers in Ukraine // Environ. Res. — 2015. — **140**. — P. 72-76
56. Health effects of the Chernobyl accident and special health care programmes. Report of the UN Chernobyl Forum Expert Group "Health" (EGH) [Electronic resource] / ed. by B. Bennet, M. Repacholi, Zh. Carr. — Geneva: WHO, 2006. — 160 p. — Mode of access: [http://www.who.int/ionizing\\_radiation/pub\\_meet/chernobyl-accident-health-effects/en/](http://www.who.int/ionizing_radiation/pub_meet/chernobyl-accident-health-effects/en/)
57. Health effects of the Chernobyl accident — a quarter of century aftermath / ed. by A. Serdiuk, V. Bebesko, D. Bazyka, S. Yamashita. — Kyiv: DIA, 2011. — 658 p.
58. Health effects of the Chernobyl accident — thirty years aftermath / ed. by D. Bazyka, V. Sushko, A. Chumak, V. Chumak, L. Yanovych. — Kyiv: DIA, 2016. — 524 p.
59. Ilyenko I., Bazyka D., Liaskovska O. Analysis of relative telomere length and apoptosis in humans exposed to ionising radiation // Exp. Oncol. — 2012. — **33**, № 4. — P. 235-238.
60. Ivanov V. K. Late cancer and noncancer risks among Chernobyl emergency workers of Russia // Health Phys. — 2007. — **93**, № 5. — P. 470-479.
61. Ivanov V. K., Maksioutov M. A., Chekin S. Y. et al. The risk of radiation induced cerebrovascular disease in Chernobyl emergency workers // Health Physics. — 2006. — **90**, № 3. — P. 199-207.
62. Khomazuk I., Gabulavichene Zh., Kursina N., Sidorenko G. Arterial hypertension // Health effects of the Chernobyl accident — a quarter of century aftermath / ed. by A. Serdiuk, V. Bebesko, D. Bazyka, S. Yamashita. — Kyiv: DIA, 2011. — P. 372-386.
63. Leuraud K., Schnelzer M., Tomasek L. et al. Radon, smoking and lung cancer risk: results of a joint analysis of Three European Case Control Studies among uranium miners // Radiat. Res. — 2011. — **176**. — P. 375-387



64. Loganovsky K. Do low doses of ionizing radiation affect the human brain? [Electronic resource] // Data Science Journal. — 2009. — № 8. — P. BR13-BR35. — Mode of access: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/dsj/8/0/8\\_BR-04/\\_article](https://www.jstage.jst.go.jp/article/dsj/8/0/8_BR-04/_article)
65. Loganovsky K. N. Vegetative-vascular dystonia and osteoalgetic syndrome or Chronic Fatigue Syndrome as a characteristic after-effect of radioecological disaster: the Chernobyl accident experience // J. Chronic Fatigue Syndr. — 2000. — 7, № 3. — P. 3-16.
66. Loganovsky K. N., Loganovskaja T. K. Schizophrenia spectrum disorders in persons exposed to ionizing radiation as a result of the Chernobyl accident // Schizophr. Bull. — 2000. — 26, № 4. — P. 751-773.
67. Loganovsky K. N., Loganovskaja T. K., Nechayev S. Yu. et al. Disrupted development of the dominant hemisphere following prenatal irradiation // J. Neuropsychiatry Clin. Neurosci. — 2008. — 20, № 3. — P. 274-291.
68. Loganovsky K. N., Zdanevich N. A. Cerebral basis of post-traumatic stress disorder following the Chernobyl disaster // CNS Spectrums. — 2013. — 18, № 2. — P. 95-110.
69. Loganovsky K., Bomko M., Chumak S. et al. Mental health and neuropsychiatric effects [Electronic resource] // Health effects of Chernobyl accident — thirty years aftermath / ed. by D. Bazyka, V. Sushko, A. Chumak, V. Chumak, L. Yanovych. — Kyiv: DIA, 2016. — P. 320-381. — Mode of access: [http://nrcrm.gov.ua/downloads/2017/monograph\\_last.pdf](http://nrcrm.gov.ua/downloads/2017/monograph_last.pdf).
70. Loganovsky K., Buzunov V., Napryeyenko A. et al. Mental health and neuropsychiatric effects in the clean-up workers // Health effects of the Chornobyl accident — a quarter of century aftermath. Chapter 17. Nervous System and Psychosocial Aspects / ed. by A. Serdiuk, V. Bebesko, D. Bazyka, S. Yamashita. — Kyiv: DIA, 2011. — P. 472-490.
71. Loganovsky K., Havenaar J. M., Tintle N. L. et al. The mental health of clean-up workers 18 years after the Chernobyl accident // Psychol. Med. — 2008. — 38, № 4. — P. 481-488.
72. Loganovsky K., Perchuk I., Marazziti D. Workers on transformation of the Shelter Object of the Chernobyl Nuclear Power Plant into an ecologically-safe system show qEEG abnormalities and cognitive dysfunctions: a follow-up study // The World Journal of Biological Psychiatry. — 2016. — 17, № 8. — P. 600-607.
73. Marazziti D., Piccinni A., Mucci F. et al. Ionizing radiation: brain effects and related neuropsychiatric manifestations // Probl. Radiac. Med. Radiobiol. — 2016. — 21. — P. 64-90.
74. Nastina O., Pleskach G., Kursina N. et al. Structural and functional state of heart left ventricle depending on polymorphism rs966221 phosphodiesterase 4D gene in emergency workers of the Chornobyl NPP suffering from coronary heart disease gene // Probl. Radiac. Med. Radiobiol. — 2016. — 21. — P. 312-321.
75. National Council on Radiation Protection and Measurements. Guidance for Emergency Response Dosimetry [Electronic resource]. NCRP REPORT No. 179. 2017. Mode of access: <https://www.ncrppublications.org/Reports/179>
76. Nyagu A. I., Loganovsky K. N., Pott-Born R. et al. Effects of prenatal brain irradiation as a result of the Chernobyl accident // Int. J. Rad. Med. — 2004. — 6, № 1-4, Special Iss. — P. 91-107.
77. Ostroumova E., Gudzenko N., Brenner A. et al. Thyroid cancer incidence in Chornobyl liquidators in Ukraine: SIR analysis, 1986-2010 // Eur. J. Epidemiol. — 2014. — 29, № 5. — P. 337-342.
78. Preston D. I., Shimizu Y., Mabuchi K. Studies of mortality of atomic bomb survivors: Report 13: Solid cancer and non-cancer disease mortality: 1950-1997 // Radiat. Res. — 2003. — 160. — P. 381-407.
79. Prysyzhnyuk A. Ye., Bazyka D. A., Romanenko A. Yu. et al. Results of 30 years of research on cancer effects of Chornobyl disaster in Ukraine in national and international projects // Health effects of Chornobyl accident, thirty years aftermath. — Kyiv, 2016. — P. 104-117.
80. Romanenko A. Y., Finch S. C., Hatch M. et al. The Ukrainian-American study of leukemia and related disorders among Chernobyl cleanup workers from Ukraine: III. Radiation risks // Radiat. Res. — 2008. — 170. — P. 711-720.
81. Rothkamm K., Beinke C., Romm H. et al. Comparison of established and emerging biodosimetry assays // Radiat. Res. — 2013. — 180. — P. 111-119.
82. Shimizu Y., Kodama K., Nishi N. et al. Radiation exposure and circulatory disease risk: Hiroshima and Nagasaki atomic bomb survivor data, 1950-2003 // BMJ. — 2010. — 340. — b5349.
83. Sholom S., Chumak V. EPR emergency dosimetry with plastic components of personal goods // Health Physics. — 2010. — 98, № 2. — P. 395-399.
84. Sushko V., Bazyka D., Shvayko L. et al. Bronchopulmonary pathology // Health effects of the Chornobyl accident — A quarter of century aftermath / ed. by A. Serdjuk, V. Bebesko, D. Bazyka, S. Yamashita. — Kyiv: DIA, 2011. — Chp. 15. — P. 434-450.
85. Sushko V., Ustinov S., Klymenko S. et al. Retrospective clinico-morphological and dosymetry charac-terisation of lung cancer patients - clean-up workers of Chernobyl NPP accident in remote postaccidental period // Abstracts of ERS International Congress 2017, 9-13 September 2017, Milan, Italy // Eur. Respirat. J. — 2017. — 50, Supl. 61. — P. 4932.
86. Teles P., Nikodemová D., Bakhanova E. et al. A review of radiation protection requirements and dose estimation for staff and patients in CT fluoroscopy // Radiat. Prot. Dosimetry. — 2017. — 174. — P. 518-534.
87. Thome C., Chambers D. B., Hooker A. M. et al. Deterministic effects to the lens of the eye following ionizing radiation exposure: is there evidence to support a reduction in threshold dose? // Health Phys. — 2018. — 114, № 3. — P. 328-343.
88. Tronko M., Brenner A. V., Bogdanova T. et al. Thyroid neoplasia risk is increased nearly 30 years after the Chernobyl accident // Int. J. Cancer. — 2017. — 141, № 8. — P. 1585-1588.
89. United Nations. Sources and effects of ionizing radiation. Volume I: Sources; Volume II: Effects / United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. — UNSCEAR 2008 Report: United Nations sales publications E.10.XI.3 (2010) and E.11.IX.3. New York: United Nations, 2011.
90. United Nations. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 1988 Report to the General Assembly, with annexes. United Nations sales publication E.88.IX.7. — New York: United Nations, 1988.
91. Worgul B. V., Kundiye Y. I., Sergiyenko N. M. et al. Cataracts among Chernobyl clean-up workers: implications regarding permissible eye exposures // Radiat. Res. — 2007. — 167, № 2. — P. 233-243.

92. *Zablotska L., Bazyka D., Lubin J. H. et al. Radiation and the risk of chronic lymphocytic and other leukemias among Chernobyl cleanup workers // Environ. Health Persp. — 2013. — 121, № 1. — P. 59-65.*

Одержано 12.03.2018

## РАДИАЦИОННАЯ МЕДИЦИНА УКРАИНЫ — ЧЕТВЕРТЬ ВЕКА ПРОГРЕССА И ПРИОРИТЕТЫ НА БУДУЩЕЕ

Д. А. Базыка, В. А. Сушко, А. Е. Присяжнюк, К. М. Логановский, Д. А. Белый,  
П. А. Федирко, И. М. Ильенко, Л. А. Янович

Государственное учреждение “Национальный научный центр радиационной медицины  
НАМН Украины”, 04050 Киев

В статье проведен научный анализ достижений украинской радиационной медицины учреждениями Национальной академии медицинских наук. Наряду с освещением вопросов радиационной безопасности и проблем дозиметрического контроля основное внимание в статье уделено анализу результатов исследований медицинских последствий аварии на ЧАЭС. Изучено детерминированные эффекты ионизирующего облучения на здоровье, в частности острую лучевую болезнь и радиационную катаракту. Приведены данные о состоянии здоровья разных групп пострадавших за счет опухолевой и неопухолевой патологии. Представлен анализ результатов эпидемиологических и клинических исследований онкологической и соматической патологии у пострадавших. Определение радиационных рисков рака щитовидной железы, хронической лимфоцитарной лейкемии, цереброваскулярной патологии, радиационной катаракты, фундаментальных механизмов действия малых доз облучения, изучения роли иммунологических, метаболических и генетических процессов, нейро-иммунного взаимодействия стали мировым приоритетом. Международные исследования показали наличие у населения, пострадавшего от аварии на Чернобыльской АЭС, долгосрочных психических расстройств, в том числе депрессии, тревожности и посттравматических стрессовых расстройств. Установлена связь радиационных эффектов в иммунной системе с дозой и возрастом на момент облучения. Проведенный цитогенетический мониторинг подтвердил рост интенсивности соматического хромосомного мутагенеза у человека в отдаленные сроки после аварии на ЧАЭС. В статье предложены меры по решению комплекса проблем минимизации негативных последствий Чернобыльской катастрофы, медицинского и профессионального облучения, направления исследований эффектов облучения в широком диапазоне доз и разработка и внедрение технологий лечения и радиационной защиты населения.

## RADIATION MEDICINE OF UKRAINE — QUARTER CENTURY OF PROGRESS AND PRIORITIES FOR THE FUTURE

D. A. Basyka, V. O. Sushko, A. Ye. Prysiazhniuk, K. M. Loganovsky, D. O. Bilyi,  
P. A. Fedirko, I. M. Ilyenko, L. A. Yanovych

State institution “National Research Center for Radiation Medicine NAMS Ukraine”, 04050 Kyiv

The article presents a scientific analysis of the achievements of Ukrainian radiation medicine by the institutions of the National Academy of Medical Sciences. Along with the coverage of radiation safety issues and dosimetric control problems, the article focuses on the analysis of the results of research on the medical consequences of the Chernobyl accident. The deterministic effects of ionizing radiation on health, in particular acute radiation sickness and radiation cataract, have been studied. The data on the health status of different groups of patients affected by tumor and non-tumor pathology was given. The analysis of the results of the epidemiological and clinical study of cancer and somatic pathology in the victims was presented. Determination of radiation risks of thyroid cancer, chronic lymphocytic leukemia, cerebrovascular pathology, radiation cataract, fundamental mechanisms of action of small doses of irradiation, the study of the role of immunological, metabolic and genetic processes, neuro-immune interaction became a world priority. International studies have shown the long-term mental disorder among people affected by the Chernobyl accident, including depression, anxiety and post-traumatic stress disorder. The association of radiation effects in the immune system with dose and age at the moment of irradiation was established. The cytogenetic monitoring has confirmed the growth of the intensity of somatic chromosomal mutagenesis in humans in the long term after the Chernobyl accident. The article proposes measures for solving a complex of problems of minimization of negative consequences of the Chernobyl disaster, medical and professional irradiation, directions of study of effects of radiation in a wide range of doses and development and introduction of technologies of treatment and radiation protection of the population.