

РАДІАЦІЙНА ГІГІЄНА

RADIATION HYGIENE

<https://doi.org/10.32402/hygiene2023.73.104>

УДК 351.78:613.648.4:546.79(.296):316.77

ДО ПИТАННЯ МОНІТОРИНГУ КОНЦЕНТРАЦІЙ АКТИВНОСТІ РАДОНУ В КОНТЕКСТІ РЕАЛІЗАЦІЇ ДЕРЖАВНОГО ПЛАНУ ЗАХОДІВ

Фризиук М.А., Павленко Т.О.

ДУ «Інститут громадського здоров'я ім. О.М. Марзєєва НАМН України», м. Київ, Україна
e-mail: m.friziuk@gmail.com

Фризиук М.А. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0764-010X>

Павленко Т.О. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0615-3123>

Стаття аналізує міжнародний досвід щодо запровадження первинного моніторингу концентрацій активності радону в Україні як інструменту реалізації державної політики стосовно зменшення опромінення населення від цього джерела.

Мета. Наукове обґрунтування підходів до проведення моніторингу радону в Україні в рамках реалізації державного плану заходів щодо зменшення рівнів опромінення населення від радону в повітрі житлових та громадських будівель.

Розглянуто методологію проведення дослідження рівнів радону у повітрі приміщень. Визначено два основних підходи до проведення загальнонаціонального первинного моніторингу радону в будинках, які включають оцінку середнього опромінення населення радоном та визначення радононебезпечних територій (зон). Встановлено, що слід проводити окремі дослідження у житлових та робочих приміщеннях, особливо в дитячих навчальних закладах через значні відмінності в конструкції та вентиляції будинків. Розглянуто різні підходи до визначення радононебезпечності територій. Доведено необхідність застосування відносно простих методів ремедіації (здійснення протирадонових заходів) з точки зору забезпечення ефективного цільового використання ресурсів.

Проведено попередній аналіз стану вивчення проблеми радону в Україні. Виявлено, що проблема забезпечення стратегій захисту населення від впливу опромінення радоном, як і моніторинг цього джерела, все ще знаходиться у стадії розвитку.

Встановлено, що зниження радонових ризиків в житлі є загальною проблемою власників житла, держава має здійснювати просвітницьку роботу з населенням, забезпечити радонові сервіси, консультації тощо, щоб спонукати саме населення вживати захисних заходів. Зниження радонових ризиків на робочих місцях є сферою відповідальності держави, включаючи і безпеку мешканців, відвідувачів чи працівників таких будинків.

Визначено, що в умовах війни необхідно запровадити протирадонові заходи у нових і відновлених будинках та бомбосховищах, що потребує вимірювань концентрацій радону в їх приміщеннях.

Встановлена загальна потреба у розробці нормативних документів, методик, рекомендацій щодо будівництва та реконструкції будинків, вимог до систем очищення повітря, і, в першу чергу, це стосується дитячих садочків, шкіл та лікарень.

Висновок. Запровадження первинного моніторингу радону в повітрі житлових та громадських будинків дозволить оцінити ступінь радононебезпечності будівель на окремих територіях України, надати цю інформацію в органи місцевого самоврядування для інформування населення про наявні радіаційні ризики та оптимізувати витрати на реалізацію протирадонових заходів з урахуванням соціально-економічних умов окремих регіонів.

Ключові слова. Радон в приміщенні, план дій щодо радону, моніторинг радону, радіаційний захист.

TO THE ISSUE OF MONITORING RADON ACTIVITY CONCENTRATIONS IN THE CONTEXT TO IMPLEMENTATION OF STATE ACTION PLAN

M. Fryziuk, T. Pavlenko

SI "O.M. Marzieiev Institute for Public Health of the NAMS of Ukraine", Kyiv, Ukraine

The article analyses international experience on the introduction of primary monitoring of radon activity concentrations in Ukraine as a tool for implementing state policy to reduce exposure of the population from this source.

Objective. Scientific substantiation of approaches to radon monitoring in Ukraine as part of the implementation of the action plan to reduce the levels of exposure of the population from indoor radon in the residential and public buildings.

The methodology for conducting a study of indoor radon levels is considered. Two main approaches to conducting a radon primary monitoring in dwelling have been identified, which include assessing the average exposure of the population to radon and determining territories (zones) with high radon potential. It was established that separate studies should be carried out in residential and workplaces, especially in children's educational institutions due to significant differences in the design and ventilation of houses. Different approaches to the definition of territories with high radon potential. The necessity of using effective, reliable, cost-effective and relatively easy to implement methods of remediation from the point of view of ensuring effective targeted use of resources is proven.

A preliminary analysis of the state of studying the problem of radon in Ukraine has been carried out. It is revealed that the problem of providing strategies for protecting the population from the effects of radon exposure, as well as monitoring this source, is still in the development stage.

It is established that the reduction of radon risks in housing is generally a problem of homeowners, the state should carry out educational work with the population, provide radon services, consultations, etc., in order to encourage the population to take protective measures. Reducing radon risks at workplaces is the responsibility of the state, including the safety of residents, visitors or employees of such buildings.

It is determined that in conditions of war it is necessary to introduce remediation in new and restored houses and bomb shelters, which requires measurements of radon concentrations in their premises.

An urgent need has been established for the development of regulatory documents, methods, recommendations for the construction and reconstruction of houses, requirements for air purification systems, and, first of all, this applies to kindergartens, schools and hospitals.

Conclusions. The introduction of primary monitoring of indoor radon in dwellings and public buildings will allow to assess the degree of radon hazard of buildings in certain territories of Ukraine, to provide this information to local authorities to inform the population about the existing radiation risks and to optimize the costs for the implementation of remediation taking into account the socio-economic conditions of some regions.

Keywords. Indoor radon, radon action plan, radon monitoring, radiation protection.

Серед ключових завдань Плану заходів щодо зменшення опромінення населення від радону в повітрі приміщень є [1-3]:

- проведення вимірювань рівнів радону в житлових та громадських будинках і на робочих місцях для отримання інформації про їх величини та розподіл в будівлях;
- ідентифікація територій з підвищеними концентраціями активності радону в будинках – картування радононебезпечних територій (зон);
- запровадження програм протирадонових заходів у будинках;
- введення програм навчання для фахівців, які працюють у галузях будівництва, вимірювання радону та проведення ремедіації (протирадонових заходів);
- введення програм громадського інформування населення про радіаційні ризики;
- тощо.

Кожна держава запроваджує національний план заходів виходячи з існуючих реалій щодо стану вирішення проблеми радону в країні. Рівень радону в будівлях пов'язаний з характеристиками ґрунту і з низкою інших чинників, включаючи інженерно-планувальні особливості житлових та громадських будинків, клімат і звички мешканців. Тому рівні опромінення радоном населення відрізняються в різних країнах, обумовлюючи певну кількість ракових захворювань, пов'язаних з цим радіонуклідом і його дочірніми продуктами розпаду [4-8]. Наприклад, у Нідерландах з опроміненням радоном пов'язують біля 4% випадків раку легенів, тоді як у Швеції цей показник становить приблизно 20% [9].

Стан вирішення цієї проблеми в різних країнах також різний. В більшості Європейських країн є багаторічний досвід вивчення цього питання, налагоджені радонові сервіси (вимірювання, протирадонові заходи, надання консультацій з ризиків тощо), чітко визначена державна політика та затверджена нормативно-правова база. На сьогодні переважна більшість країн прийняла величину референтного рівня 300 Бк/м^3 . Ця величина є ефективним інструментом для зменшення ризику для осіб, які зазнають найбільшого опромінення, у випадках, коли здійснювати оптимізацію доречно з соціально-економічних причин. Такий підхід узгоджується з принципом оптимізації, запровадженим Міжнародною комісією з радіологічного захисту (МКРЗ) у публікації 103 [10]. Тобто оптимізація має бути виконана з пріоритетом для концентрацій радону, що перевищують референтний рівень, але вона може здійснюватись і для рівнів, нижчих за референтний. Попередня практика, що застосовувала "рівень дії", вимагала застосування коригувальних (захисних) заходів лише для концентрацій радону, вищих за певний рівень дії, і в цьому нюансі і є особливості нової системи Директиви Ради 2013/59/Euratom та Основних стандартів безпеки Міжнародного агентства з атомної енергії (BSS МАГАТЕ) [11-12], які впроваджують безпорогову концепцію для опромінення радоном [10,13-14].

Проте базою для прийняття рішень є наявна інформація про рівні опромінення, тому вимірювання концентрацій радону у будівлях (первинний моніторинг) на першому етапі є головним завданням, яке обґрунтовує подальшу політику з цього питання і є предметом оптимізації радіаційного захисту.

Метою роботи є наукове обґрунтування підходів до проведення моніторингу радону в Україні в рамках реалізації державного плану заходів щодо зменшення рівнів опромінення населення від радону в повітрі житлових та громадських будівель.

Методологія проведення дослідження рівнів радону у повітрі приміщень.

Для проведення загальнонаціонального первинного моніторингу радону в будинках використовуються два основних підходи [2,15]:

- оцінка середнього опромінення населення радоном та діапазону опромінення (шляхом вимірювання концентрацій радону у випадково вибраних будинках) для порівняння з опроміненням від інших джерел іонізуючого випромінювання та з іншими ризиками для здоров'я населення;
- визначення радононебезпечних територій (зон), де ймовірно буде виявлено вищі за середні концентрації радону у будинках (шляхом виконання географічної зйомки).

Отримані результати можуть бути використані для розробки карт радонового потенціалу.

Отримані результати визначають ступінь опромінення населення радоном та стануть основою для майбутніх рішень щодо розробки та реалізації національної радонової політики.

Для приміщень, де виявлено високі концентрації радону, основним джерелом надходження зазвичай є ґрунт безпосередньо під будівлею. У деяких випадках значний внесок у високі концентрації дає радон, який виділяється з будівельних матеріалів будинку та/або з домашнього водопостачання. Наприклад, Драбовський район Черкаської області, де в квартирах, які розташовувалися з 2 до 5 поверхів, були зафіксовані рівні радону, що в 2-3 рази перевищували норматив. Було встановлено, що джерелом його надходження в будинки була вода, яку використовували для господарських цілей [16].

Через відмінності в конструкції та вентиляції будинків концентрації радону на робочих місцях можуть сильно відрізнятися від того, що спостерігається в житлі. В ідеалі слід проводити окремі дослідження розподілу радону в робочих приміщеннях. Ці обстеження мають бути репрезентативними для всіх робочих місць у закритих приміщеннях та повинні бути спрямовані на визначення особливостей робочих місць, де можна очікувати вищі або нижчі за середні концентрації радону. Наприклад, на робочих місцях у підвальних приміщеннях або на робочих місцях із поганою вентиляцією можна очікувати, що концентрація радону буде вищою за середню. Для робочих місць, які за своєю конструкцією схожі на житлові будинки, тобто невеликих офісів і магазинів, дані, отримані в результаті національного моніторингу радону в будинках, можуть бути корисними в першу чергу для того, щоб допомогти визначитися з робочими місцями в радонебезпечних зонах.

У випадку дитячих навчальних закладів (шкіл, дитячих садків тощо) можна спостерігати велику варіабельність концентрацій радону в приміщеннях: наприклад, у межах однієї школи, а також між школами, і це також необхідно враховувати при розробці досліджень дитячих закладів [2,17].

За результатами проведеного національного радонового моніторингу можна буде встановити розподіл радону за регіонами. Це дозволить ідентифікувати радонебезпечні зони (території), тобто ті області, де, ймовірно, будуть виявлені концентрації радону в будівлях, вищі за середні, і де ймовірність виявлення високих концентрацій радону в окремих будинках підвищена.

Визначення радонебезпечних територій є складним рішенням, для чого необхідно враховувати багато факторів. До них належать середня національна концентрація радону, національний референтний рівень, заходи, які будуть потрібні на цих територіях, наявність ресурсів тощо.

Існують різні підходи до визначення радонебезпечних територій. Такими вважаються території, на яких [18]:

- близько 1% житлових будинків мають рівні радону, що в 10 разів перевищують середнє значення по країні [17];
- знаходяться будівлі, де концентрація радону, ймовірно, буде вище середнього значення по країні [10];
- знаходяться будівлі, де концентрація радону значно вища, ніж в інших регіонах країни (наприклад, географічний регіон чи адміністративний район) [14,19];
- у значній кількості будівель концентрація радону (як середньорічна величина) перевищує відповідний національний референтний рівень [11].

Наприклад, у Великій Британії радонебезпечною зоною вважається територія, де, за прогнозами, 1% або більше будинків матимуть середню концентрацію радону вище за референтний рівень 200 Бк/м^3 , прийнятий у країні; в Ірландії відповідною територією є райони, де 10% або більше будинків мають концентрації радону, які перевищують ірландський референтний рівень 200 Бк/м^3 . Різні визначення радонебезпечних територій відображають різний розподіл радону у цих країнах [2,15].

Важливим інструментом для географічної візуалізації стану навколишнього середовища щодо ресурсів, а також небезпек від радону є створення карт радонового потенціалу чи радонового ризику. Однак, оскільки у кожній країні такі карти створюються національними органами влади відповідно до індивідуально обраних критеріїв, їх нелегко порівнювати у регіональному, національному та міжнародному масштабах. Незважаючи на їх індивідуальну коректність, їх зовнішній вигляд може бути дуже різним, що ускладнює їх порівняння та можливість інтерпретації. Причинами цього є [20]:

- правові, політичні та економічні обмеження, пов'язані з визначенням величини, що картується, схемою вибірки та підтримкою картування;
- доступність даних (включаючи прогнозні дані, якщо застосовано);
- методологічний вибір алгоритмів оцінки тощо. Дисгармонія, яка в результаті виникає, погіршує зручність використання зацікавленими сторонами та підриває довіру.

Дисгармонія простежується з неузгодженості на рівні баз даних і планів дослідження, методології моделювання та проблем з картуванням. Складність узгодження може зростати з підвищенням рівня агрегації даних, які підтримують карти. Для вирішення проблеми дисгармонічних карт можуть знадобитися підходи, які включають перетворення на основі моделі (нормалізація до стандартної ситуації) або узгодження класифікованих карт з урахуванням сумісно розташованих прогностичних параметрів (предикторів) [20].

Після виявлення та окреслення радононебезпечних територій (картування) необхідно визначити конкретні протирадонові заходи, які слід застосовувати в цих зонах. Варто також зазначити, що в міру появи більшої кількості результатів вимірювання радону, може виникнути потреба змінити окреслення визначених таким чином територій.

Метою визначення радононебезпечних територій є забезпечення ефективного цільового використання ресурсів. Наприклад, інформаційні, консультативні та вимірювальні кампанії, спрямовані на радононебезпечні території, швидше за все, призведуть до виявлення більшої кількості будинків з високими концентраціями радону, ніж кампанії, спрямовані на зони, де прогнозований відсоток будинків з високими концентраціями радону низький. Також може бути більш рентабельним вимагати встановлення протирадонових профілактичних засобів у нових будинках лише в радононебезпечних районах, а не у всіх нових будинках. Єдиним способом істотно знизити середню концентрацію радону в національному будівельному фонді є запровадження будівельних норм та будівельних практик, які обмежують надходження радону в нові будівлі [2-3].

Наявність ефективних, надійних, рентабельних та відносно простих у впровадженні методів ремедіації (здійснення протирадонових заходів) має важливе значення для успішної реалізації національного радонового плану дій. Ефективність усіх методів має бути доведена в реальних робочих умовах, а також повинна бути оцінена їх довгострокова ефективність за допомогою повторних вимірювань концентрацій радону після проведення захисних заходів. Досвід показав, що при впровадженні технологій зниження рівня радону в будинках, що будуються, для досягнення високого ступеня успіху необхідне дотримання національних будівельних норм та правил [2,21].

Усе вищезазначене свідчить про те, що регулярний радоновий моніторинг об'єктів є невід'ємним компонентом національного радонового плану дій, реалізація якого з часом допоможе зменшити середні дози від опромінення радоном та знизити вплив радону на здоров'я населення.

Аналіз стану вивчення проблеми радону в Україні. В Україні проблема забезпечення стратегій захисту населення від впливу опромінення радоном, як і моніторинг цього джерела, знаходиться у стадії розвитку.

Нормативи щодо вмісту радону в повітрі приміщень були затверджені 1997 році у «Нормах радіаційної безпеки (НРБУ-97)». Для контролю радону на даний час застосовується еквівалентна рівноважна об'ємна активність (ЕРОА) радону, а рівень дій (норматив) для існуючих будинків складає 100 Бк/м³ [22]. Контроль за дотриманням цих регламентів делегувався радіологічним відділам Санепіднагляду, які були розформовані 2013 році. В

2017 році були скасовані Державні будівельні норми (ДБН), які стосувалися безпосередньо контролю радону: «Система норм та правил зниження рівня іонізуючих випромінювань природних радіонуклідів в будівництві» [23]. На даний час в нових ДБН «Будинки і споруди. Житлові будинки. Основні положення» [24] про радіаційний контроль стосовно радону та природних радіонуклідів лише згадується у трьох пунктах (пп. 10.13-10.15).

За новими міжнародними стандартами, для радону в повітрі приміщень має застосовуватись величина "референтний рівень", який виражений в одиницях ОА радону (в англійському варіанті – концентрації радону або газу радону). ОА радону відрізняється від його ЕРОА величиною коефіцієнта рівноваги, тобто співвідношенням між активностями радону та його дочірніми продуктами розпаду (ДПР) (рекомендований МКРЗ коефіцієнт рівноваги становить 0,4). По суті «референтний рівень» – це верхній ліміт, перевищувати який заборонено [14]. Нормативи мають бути меншими за 300 Бк/м³, проте рішення про величину їхнього кількісного значення кожна країна вирішує самостійно, в залежності від соціальних та економічних умов, відношення громадськості до радіаційних ризиків тощо.

Саме поняття «норматив» передбачає жорсткий контроль його виконання. Проте, сучасна система радіаційного захисту щодо радону в повітрі будинків пропонує м'який контроль на підґрунті процедур оптимізації та референтних рівнів, які за своєю суттю є верхньою межею нормативу. Для радону в повітрі приміщень пропонується величина "референтного рівня" в одиницях ОА радону (в англійському варіанті – концентрації радону або газу радону) у 300 Бк/м³ [11].

Нова система пропонує і нову стратегію захисту населення, яка має спиратися на його обізнаність та розуміння власних ризиків для здоров'я.

Так, в Публікації 126 МКРЗ, зазначено, що "стратегія захисту від радону повинна починатися з програми, націленої на те, щоб спонукати відповідних осіб, що приймають рішення, сприяти самостійним захисним діям, таким як проведення вимірювань та при необхідності зниження опромінення. Цей процес може бути реалізований за допомогою інформування, консультацій, надання допомоги та пред'явлення більш формальних вимог. Застосування та ступінь обов'язковості цих заходів залежить від характеру юридичної відповідальності за ситуацію та цілей національної стратегії захисту від радону" [14].

Іншими словами, опромінення радоном – це проблема приватного житла і її рішення, в першу чергу, залежить від усвідомлення та прийняття населенням величини ризиків для власного здоров'я. Тому більшість заходів сучасних національних радонових планів дій орієнтовано саме на просвітницьку роботу з населенням та спонуканням його з боку держави вживати всіх заходів щодо зниження цих ризиків. Для цього держава має забезпечити населення радоновими сервісами (вимірювання, протирадонові заходи), надати доступну інформацію щодо загроз здоров'ю, консультаціями щодо протирадонових заходів та ін.

Проте громадські будівлі (державні школи, дитячі установи, лікарні та інш.) є сферою відповідальності держави, включаючи і безпеку мешканців, відвідувачів чи працівників цих будинків. В цьому випадку саме держава має забезпечити неперевищення референтних рівнів: здійснити вимірювання концентрацій радону та провести ремедіацію, якщо це потрібно.

Війна порушила нормальний хід життя населення та внесла свої корективи в реалізацію Плану заходів щодо радону на 2020-2024 роки в Україні [25]. Лише за перші місяці війни внаслідок щоденних бомбардувань та обстрілів пошкоджено понад 1,5 тисячі тільки дитячих навчальних закладів, а 102 – повністю зруйновані, зруйновані 10 тисяч об'єктів інфраструктури та житлових будинків. Програми відновлення дитячих закладів, шкіл, лікарень, повинні здійснюватися за стандартами ЄС та вимогами Директиви Ради 2013/59/Euratom [11]. Ці вимоги пов'язані з підвищеними ризиками для здоров'я дітей щодо захворювання на лейкемію, та подальшої реалізації раку легенів у дорослих [26] від хронічного опромінення радоном у будівлях. Для українців ці ризики значно зростають в умовах хронічного стресу та пандемії COVID-19, захворювання, яке також вражає бронхолегеневу систему [27].

Практика показала, що рівні радону у підвальних приміщеннях (і, відповідно, в бомбосховищах) можуть бути у десятки разів вищими за нормативи (максимальні зафіксовані значення в Україні становили порядку 8000 Бк/м³), а це – додаткові ризики захворюваності на рак. Ці ризики можна істотно зменшити, якщо запровадити у нових будинках та бомбосховищах протирадонові заходи. А таке завдання насамперед потребує вимірювань концентрацій радону у згаданих приміщеннях як до здійснення ремедіації, так і після проведення протирадонових заходів для оцінки їх ефективності [27].

Необхідно розробити нормативні документи, методики, рекомендації щодо будівництва та реконструкції будинків, вимог до систем очищення повітря, і, в першу чергу, це стосується дитячих садочків, шкіл та лікарень. Розробити методики оцінки ефективності запровадження таких контрзаходів на стадії будівництва. Ефективність такого підходу підтверджує світова практика, яка оцінила витрати на ці захисні заходи у 3% від їх вартості при ремедіації будівель, що експлуатуються [28].

Висновок

Запровадження первинного моніторингу радону в повітрі житлових та громадських будинків дозволить оцінити ступінь радононебезпечності будівель на окремих територіях України, надати цю інформацію в органи місцевого самоврядування для інформування населення про наявні радіаційні ризики та оптимізувати витрати на реалізацію протирадонових заходів з урахуванням соціально-економічних умов окремих регіонів.

Внески авторів:

Фризюк М.А. – визначення мети, здійснення літературного пошуку щодо проблеми статті, участь у написанні статті, редагування.

Павленко Т.О. – аналіз міжнародних вимог щодо здійснення моніторингу радону, участь у написанні статті, висновок, переклад анотації.

Фінансування. Без фінансування, тема ініціативна.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

REFERENCES

1. Bochicchio F, Fenton D, Fonseca H, et al. National Radon Action Plans in Europe and Need of Effectiveness Indicators: An Overview of HERCA Activities. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022;19:4114. doi: <https://doi.org/10.3390/ijerph19074114>
2. Colgan PA, McGarry AT. Radon monitoring and control of radon exposure: IRPA 12 final text, 2008. RPII 08/01 [Internet]. Dublin; 2008. 19 p. Available from: <https://www.irpa.net/members/54302/%7BDE71E3E1-3BF9-48DE-9DE8-34C6C88239C4%7D/RC%2015%20Radon%20Monitoring%20and%20Control%20of%20Radon%20Exposure.pdf>
3. Nunes LJR, Curado A, da Graça LCC, et al. Impacts of Indoor Radon on Health: A Comprehensive Review on Causes, Assessment and Remediation Strategies. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022;19:3929. doi: <https://doi.org/10.3390/ijerph19073929>
4. Axelsson G, Andersson EM, Barregard L. Lung cancer risk from radon exposure in dwellings in Sweden: How many cases can be prevented if radon levels are lowered? *Cancer Causes Control*. 2015;26:541-7.
5. Ruano-Ravina A, Varela Lema L, Garcia Talavera M, et al. Lung cancer mortality attributable to residential radon exposure in Spain and its regions. *Environ. Res*. 2021;199:111372. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111372>
6. Catelinois O, Rogel A, Laurier D, et al. Lung cancer attributable to indoor radon exposure in France: Impact of the risk models and uncertainty analysis. *Environ. Health Perspect*. 2006;114:1361-6.

doi: <https://doi.org/10.1289/ehp.9070>

7. Menzler S, Piller G, Gruson M, et al. Population attributable fraction for lung cancer due to residential radon in Switzerland and Germany. *Health Phys.* 2008;95:179-89.
doi: <https://doi.org/10.1097/01.HP.0000309769.55126.03>
8. Bochicchio F, Antignani S, Venoso G, Forastiere F. Quantitative evaluation of lung cancer risk due to residential radon: Methods and results for all the 21 Italian Regions. *Radiat. Meas.* 2013;50:121-6.
doi: <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2012.09.011>
9. Leenhouts HP, Brugmans MJ. Calculation of the 1995 lung cancer incidence in The Netherlands and Sweden caused by smoking and radon: Risk implications for radon. *Radiat. Environ. Biophys.* 2001;40:11-21.
doi: <https://doi.org/10.1007/s004110000084>
10. ICRP (International Commission on Radiological Protection). The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Annals of the ICRP.* 2008;37. 332 p.
11. Council Directive 2013/59/Euratom of 5 December 2013 Laying Down Basic Safety Standards for Protection against the Dangers Arising from Exposure to Ionizing Radiation, and Repealing Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom and 2003/122/Euratom. *Official Journal of the European Union.* 2014;57:L13. 73 p.
12. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. International Atomic Energy Agency. General Safety Requirements Part 3 (No. GSR Part 3). Vienna: IAEA; 2014. 436 p.
13. Bochicchio F, Venoso G, Antignani S, Carpentieri C. Radon reference levels and priority areas considering optimisation and avertable lung cancers. *Radiat. Protect. Dosim.* 2017;177:87-90.
doi: <https://doi.org/10.1093/rpd/ncx130>
14. Radiological Protection against Radon Exposure. ICRP Publication 126. *Annals of the ICRP.* 2014;43(3). 73 p.
15. Protection against Radon-222 at Home and at Work. ICRP Publication 65. *Annals of the ICRP.* 1994;23(2). 78 p.
16. Pavlenko TA. [Scientific substantiation of the system of radiation protection of the population of Ukraine from radon-222] [Dissertation]. Kyiv; 1996. 125 p. Russian.
17. Synnott H, Hanley O, Fenton D, Colgan PA. Radon in Irish schools: the results of a national survey. *J. Radiol. Prot.* 2006;26:85-96.
doi: <https://doi.org/10.1088/0952-4746/26/1/005>
18. [Scientific substantiation and development of the main provisions of the State Action Plan for the protection of the population of Ukraine from radon in the context of the implementation of the Council Directive 2013/59/EURATOM: Report (final)]. Kyiv: O.M. Marzieiev Institute for Public Health of NAMSU. 2021. 257 p. Ukrainian.
19. Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon. ICRP Publication 115. *Annals of the ICRP.* 2010;40(1). 64 p.
doi: <https://doi.org/10.1016/j.icrp.2011.08.011>
20. Bossew P, Čeliković I, Cinelli G, et al. On harmonization of radon maps. *Journal of the European Radon Association.* 2022;3:7554.
doi: <https://doi.org/10.35815/radon.v3.7554>
21. Wooliscroft M. Field trials on the effectiveness of radon protection measures in new dwellings. *Rad. Prot. Dos.* 1994;56:33-40.
doi: <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a082418>
22. [Radiation safety standards of Ukraine (NRBU-97): State hygienic standards. SHS 6.6.1.-6.5.001-98]. Kyiv; 1998. 135 p. Ukrainian.
23. [The system of standards and rules for reducing the level of ionizing radiation of natural radionuclides in construction: State Building Standards of Ukraine (SBN V.1.4-0.01-97, (SBN

- B.1.4-0.02-97, (SBN B.1.4-1.01-97, (SBN B.1.4- 2.01-97)]. Kyiv: State Committee for Urban Development of Ukraine. 1997. 98 p. Ukrainian.
24. [Buildings and structures. Residential buildings. Main provisions: State Building Norms of Ukraine (SBN V.2.2-15:2019). Kyiv: Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine. Inf. Bulletin. 2019;8. 44 p. Ukrainian.
25. [On the approval of the plan of measures to reduce the level of exposure of the population to radon and its decay products, to minimize long-term risks from the spread of radon in residential and non-residential buildings, at workplaces for 2020-2024: Order of the CMU of November 27, 2019 No. 1417] [Internet]. Ukrainian. Available from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1417-2019-%D1%80#Text>
26. Mancini S, Vilnitis M, Guida M. A Novel Strategy for the Assessment of Radon Risk Based on Indicators. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2021;18:8089. doi: <https://doi.org/10.3390/ijerph18158089>
27. Pavlenko TO, Fryziuk MA, Mykhailenko OV. [Anti-radon measures in buildings in the post-war period as part of the implementation of the radon action plan in Ukraine]. In [Current issues of public health and environmental safety of Ukraine (18 Marzieiev readings): A collection of abstracts of reports of the scientific and practical conference. Vol. 22 (Kyiv, October 20-21, 2022); SI "IPH NAMSU". Kyiv; 2022:231-2. Ukrainian.
28. Uglow CE. Background Ventilation of Dwellings: Building Research Establishments Report BR162. Garston: BRE; 1989:87-92.

Надійшла до редакції / Received: 06.09.2023