

СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ ЕКСПЕРТИЗИ, РЕГУЛЮВАННЯ ТА БЕЗПЕКИ ГОСПОДАРСЬКИХ СИСТЕМ

УДК 628.4:546.26:502

Нагурський О. А.,

oleg.a.nahursky@lpnu.ua, ORCID ID: 0000-0002-5549-5296,

*д. т. н., професор, завідувач кафедри Безпеки праці і життєдіяльності людини,
Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів*

Марфутін А. Б.,

anatolii.b.marfutin@lpnu.ua, ORCID ID: 0009-0009-5171-5974,

аспірант, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів

АНАЛІЗ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ РАДОНУ У ВИРОБНИЦТВІ ТРОТУАРНОЇ БРУКІВКИ

Анотація. У статті досліджено закономірності формування, міграції та трансформації радону на всіх стадіях виробництва тротуарної бруківки – від надходження мінеральної сировини до отримання готової продукції. Актуальність роботи зумовлена необхідністю забезпечення радіаційної безпеки при використанні природних будівельних матеріалів, що містять природні радіонукліди (уран, торій, калій-40), які є джерелами утворення радону. Метою дослідження є встановлення закономірностей зміни об'ємної активності радону на різних етапах технологічного процесу та оцінка потенційних ризиків для персоналу і споживачів продукції. Методи досліджень включали аналіз літературних джерел, експериментальні вимірювання та порівняльну оцінку отриманих результатів. Контроль здійснювали за допомогою приладу AlphaE із 30-хвилинним інтервалом вимірювання впродовж 30 діб на основних технологічних стадіях. Основні результати. Встановлено, що максимальні значення об'ємної активності радону спостерігаються на стадії механічної обробки сировини (145 Бк/м³), тоді як у процесі формування та твердіння виробів відбувається поступове зниження концентрації до 85 Бк/м³ у готовій продукції. Отримані результати свідчать про визначальну роль технологічних факторів у формуванні радонового навантаження. Практичне значення полягає у можливості ідентифікації критичних стадій виробництва та обґрунтування заходів зниження радіаційного впливу. Висновки. Дослідження підтверджує, що під час виробництва тротуарної бруківки є критичні етапи, які характеризуються максимальною концентрацією радону. На етапах тужавіння та сушіння виробів, де відбувається поступове вивітрювання радону, спостерігається зменшення його об'ємної активності в готовій продукції. Отримані результати доводять, що готові бетонні вироби є менш радіаційно небезпечними порівняно з початковими етапами виробництва.

Ключові слова: радон, радіаційна безпека, оцінка ризику, виробничий контроль, екологічна безпека, будівельні матеріали, експертиза будівельної продукції.

Nahursky O. A.,

oleg.a.nahursky@lpnu.ua, ORCID ID: 0000-0002-5549-5296,

Doctor of Technical Sciences, Professor; Head of the Department of Occupational Safety and Human Life Safety, Lviv Polytechnic National University, Lviv

Marfutin A. B.,

anatolii.b.marfutin@lpnu.ua, ORCID ID: 0009-0009-5171-5974,

PhD Student, Lviv Polytechnic National University, Lviv

LIFE CYCLE ANALYSIS OF RADON IN THE MANUFACTURE OF PAVING STONES

Abstract. *This article examines the patterns of radon formation, migration, and transformation at all stages of paving stone production—from the intake of mineral raw materials to the production of finished products. The relevance of this work stems from the need to ensure radiation safety when using natural building materials containing natural radionuclides (uranium, thorium, potassium-40), which are sources of radon formation. The aim of the study is to identify patterns in changes in radon volume activity at various stages of the technological process and to assess potential risks to personnel and product consumers. Research methods included a review of the literature, experimental measurements, and a comparative evaluation of the results obtained. Monitoring was performed using an AlphaE device with a 30-minute measurement interval over a 30-day period at the main technological stages. Main results. It was found that the maximum values of radon volume activity are observed during the mechanical processing of raw materials (145 Bq/m³), while during the molding and curing of products, the concentration gradually decreases to 85 Bq/m³ in the finished product. The results obtained indicate the decisive role of technological factors in the formation of radon exposure. The practical significance lies in the ability to identify critical production stages and justify measures to reduce radiation exposure. Conclusions. The study confirms that there are critical stages during the production of paving stones characterized by maximum radon concentration. During the setting and drying stages of the products, where gradual radon outgassing occurs, a decrease in its volume activity is observed in the finished products. The results obtained demonstrate that finished concrete products pose a lower radiation hazard compared to the initial stages of production.*

Key words: radon, radiation safety, risk assessment, production control, environmental safety, building materials, construction product expertise.

JEL Classification: Q53, Q55, Q56

DOI: <https://doi.org/10.32782/2522-1221-2026-46-12>

Виклад основного матеріалу. Радон (Rn-222) є природним радіоактивним інертним газом, що утворюється у результаті α -розпаду радію-226, який входить до радіоактивного ряду урану-238. Його наявність у сировині та будівельних матеріалах зумовлює формування додаткового радіаційного навантаження на працівників і, в окремих випадках, на населення. У контексті виробництва будівельних матеріалів, зокрема бруківки, радон розглядається як важливий фактор радіаційної безпеки, оскільки його утворення, вивільнення та міграція відбуваються на всіх етапах технологічного процесу. Під час виробництва бруківки радон проходить складний життєвий цикл, що включає стадії утворення, вивільнення, міграції, часткового утримання, розпаду та розсіювання

у доквіллі. Життєвий цикл радону у виробництві бруківки представлений на рис. 1.

На початковому етапі радон утворюється у мінеральній сировині, яка використовується для виробництва бруківки, зокрема у щебені, піску та цементі. Основним джерелом є природні радіонукліди, що містяться у гірських породах, особливо у гранітах та інших магматичних утвореннях. Вміст урану та радію в цих матеріалах визначає потенційну радоноутворювальну здатність сировини. Дослідження показують, що будівельні матеріали можуть бути суттєвим джерелом надходження радону в навколишнє середовище та виробничі приміщення [13, 9].

На етапі видобутку та механічної обробки сировини (дроблення, подрібнення, транспортування)

відбувається інтенсивне вивільнення радону. Руйнування кристалічної структури мінералів сприяє збільшенню питомої поверхні матеріалу та відкриттю пор, через які радон дифундує у повітря. Цей процес описується як екзальція радону і є ключовим фактором формування концентрацій у виробничому середовищі [12].

У виробничих умовах радон здатний мігрувати через пористі середовища та накопичуватися у повітрі робочих зон. Його поведінка визначається фізичними параметрами середовища, зокрема температурою, вологістю, тиском та інтенсивністю вентиляції. Особливу небезпеку становлять закриті або слабо вентилявані приміщення, де можливе накопичення підвищених концентрацій радону. За даними сучасних досліджень, рівні радону у промислових приміщеннях можуть значно варіювати залежно від технологічних умов та властивостей матеріалів [10].

На стадіях змішування, формування та твердіння бетонної суміші спостерігається часткове утримання радону у структурі матеріалу з подальшим зменшенням його концентрації внаслідок дифузії та радіоактивного розпаду. З урахуванням короткого періоду напіврозпаду значна частина радону елімінується ще до завершення процесу твердіння. Таким чином, готова продукція зазвичай не є значним джерелом радону за умови використання сировини, що відповідає нормативним вимогам [6].

Особливу увагу слід приділити стадії радіоактивного розпаду радону. У процесі розпаду утворюються короткоживучі дочірні продукти (полоній-218, свинець-214, вісмут-214), які мають

високу радіотоксичність. На відміну від газоподібного радону, ці продукти є твердими частинками, що адсорбуються на аерозолях і можуть потрапляти до організму людини при інгаляції. Саме вони є основним джерелом опромінення і визначають радіаційний ризик для працівників [13, 7].

На етапі експлуатації бруківки, особливо у відкритому середовищі, радон практично не накопичується через його швидке розсіювання в атмосфері. Дослідження підтверджують, що використання бетонних матеріалів у відкритих умовах не призводить до значущого підвищення радіаційного фону [9].

Завершальний етап життєвого циклу радону пов'язаний із його розсіюванням у довкіллі та подальшим радіоактивним розпадом до стабільних ізотопів свинцю. У природних умовах цей процес відбувається постійно і є складовою глобального радіаційного фону.

Експериментальні дослідження. Виробництво тротуарної бруківки базується на використанні мінеральних компонентів природного походження, які містять природні радіонукліди. За умов технологічної обробки це зумовлює можливість формування додаткового радіаційного навантаження.

Підприємство, на якому здійснювалося дослідження, розташоване у Львівській області та спеціалізується на виробництві плит, бруківки й бордюрного каменю. Сортамент підприємства відрізняється за формою, але процес їх виробництва дуже схожий, відрізняється лише рецептурами окремо для кожного випадку. Залежно від форми та об'єму всі ці вироби мають



Рис. 1. Життєвий цикл радону у виробництві бруківки

однакові компоненти в різних пропорціях, зазвичай це пісок, цемент, вода та іноді барвники (для кольорової бруківки). Підприємство дотримується технологій виробництва, що відповідає ДСТУ Б В.2.7-145: 2008 «Вироби бетонні тротуарні неармовані. Технічні умови» [1].

Дослідження включали контроль активності радону на робочих місцях під час таких основних виробничих процесів:

- надходження сировини – повітря над насипом;
- подрібнення – повітря в приміщенні подрібнення;
- змішування бетонної суміші – повітря навколо мішалки;
- формування бруківки (ще не затверділа) – вантажний відсік;
- у приміщенні витримки – повітря у приміщенні сушіння;
- у приміщенні готової продукції – повітря навколо виробів.

Вимірювання виконували за допомогою приладу AlphaE із дискретністю 30 хв упродовж 30 діб. Прилад розміщували у зоні дихання персоналу або в характерних точках технологічного процесу, що забезпечувало репрезентативність даних.

Для проведення дослідження були відібрані зразки основних компонентів, що відповідають всім вимогам і стандартам та використовуються у виробництві тротуарного каменю: пісок, щебінь різних фракцій та цемент. 1. *Пісок*. Для дослідження використано природний пісок, добутий з кар'єру методом вимивання. Пісок має однорідну зернисту структуру, світло-сірий колір, вологість на момент дослідження не перевищувала 2%. Основна маса зерен знаходиться у межах фракцій 0,16–2,5 мм. У піску присутня незначна кількість органічних домішок. 2. *Щебінь*. Для дослідження використано щебінь різних фракцій, отриманих із місцевих кар'єрів: фракція 5-10 мм; фракція 10–20 мм. Матеріал гранітного походження. Зерна мають гострокутну форму, поверхня шорстка, колір від світло-сірого до темно-сірого. Вологість щебеню перед випробуванням не перевищувала 1%. 3. *Цемент*. Для дослідження використано портландцемент Івано-Франківського цементного заводу (ПАТ «Івано-Франківськцемент»). Цемент відповідає марці ПЦ І-500 має сірий колір із зеленкуватим відтінком, дрібнодисперсну структуру, середню густину 3,1 г/см³. Склад цементу у незначних

кількостях включає клінкер, гіпс та мінеральні домішки [2].

Контроль активності радону Rn-222. Контроль активності радону сировини (щебінь, пісок, цемент) проводили після надходження матеріалів на підприємство [5, 8]. В бункерах після розвантаження матеріалу, у стороні, створювали насип стандартного розміру: 10÷30 см для піску та щебеню. Для цементу – до 30÷50 см, щоб прилад фіксував реалістичну концентрацію газу над матеріалом. Площу насипу робили досить широкою (40×40 см), щоб ALPHA E “бачив” повітря над усією поверхнею, а не лише маленьку ділянку.

Для контролю концентрації радону на робочих місцях прилад ALPHA E Radon встановлювали у зоні дихання працівників або поблизу основного обладнання. Розташування приладу визначається залежно від специфіки технологічного процесу, щоб фіксувати рівень газу у найбільш «гарячих точках», де концентрація радону може бути максимальною.

Прилад фіксував об'ємну активність радону-222 у Бк/м³ внутрішньою пам'яттю приладу, а потім знімалися на комп'ютер. Вимірювання проводилось для кожного матеріалу окремо, щодня по 48 точок (30 хв × 24 год) → потім усереднювали для добового значення. Прилад розміщувався на штативі, безпосередньо над насипом, щоб забезпечити точне відображення реальної концентрації радону.

Згідно з нормами, встановленими Державними санітарними правилами та нормами України [4], середньодобова концентрація радону на робочих місцях не повинна перевищувати 200 Бк/м³, а впродовж зміни допускаються короточасні пікові підвищення до 400 Бк/м³.

Узагальнені результати об'ємної активності радону-222 у складових сировини наведені у графічному виді на рис. 2.

Отримані значення демонструють, що найбільший внесок у радонову активність має цемент, що пояснюється його мінералогічним складом та наявністю природних радіонуклідів у клінкері. Пісок і щебінь характеризуються нижчими та стабільнішими значеннями.

Результати вимірювань об'ємної активності радону-222 на різних етапах виробництва упродовж 30 діб наведені у графічному виді на рисунку 3.

Аналіз отриманих результатів показав закономірну зміну об'ємної активності радону на різних етапах технологічного процесу виробництва

бруківки. Отримані дані свідчать про суттєву залежність концентрації радону від характеру фізико-механічного впливу на сировину та умов перебігу технологічних операцій.

На етапі вихідної сировини зафіксовано значення об'ємної активності радону на рівні 120 Бк/м³, що відповідає безпечному природному радіаційному фону [4]. Вміст радону на цьому етапі

визначається, передусім, концентрацією радію-226 у вихідній сировині та її мінералогічним складом.

Найбільше зростання концентрації радону спостерігається на стадії механічної обробки (дроблення), де значення досягає 145 Бк/м³. Така тенденція пояснюється інтенсифікацією процесів екзальції радону внаслідок руйнування структури

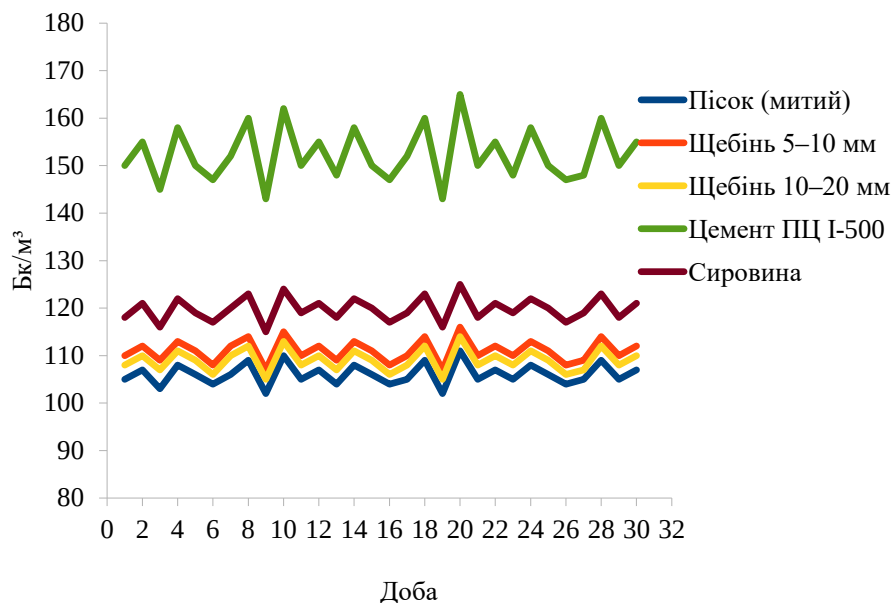


Рис. 2. Результати вимірювання об'ємної активності радону у складових сировини

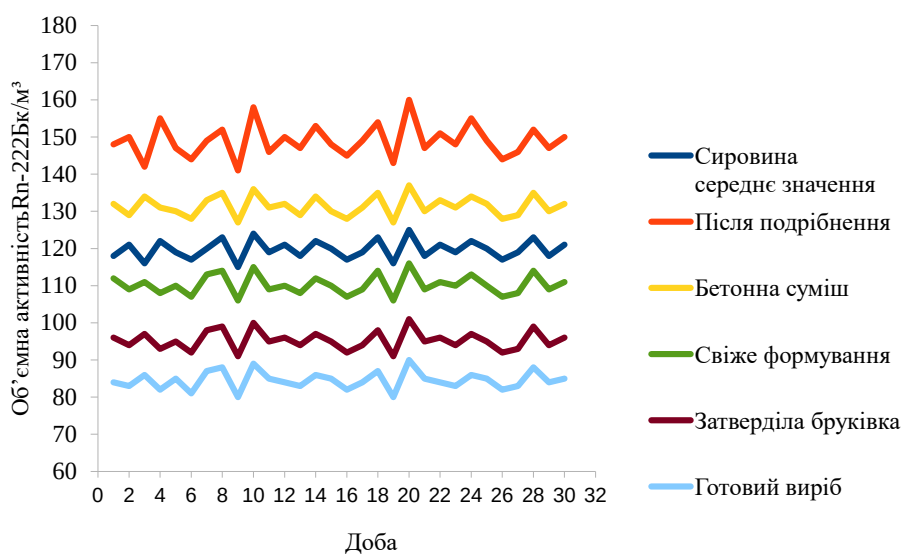


Рис. 3. Динаміка концентрації радону-222 на різних етапах виробництва

матеріалу, збільшення питомої поверхні частинок та відкриття додаткових порових каналів. Отримані результати узгоджуються з теоретичними уявленнями про залежність швидкості виділення радону від ступеня дисперсності матеріалу [11].

На стадії приготування бетонної суміші відзначено незначне зниження концентрації радону до 130 Бк/м³. Ймовірною причиною є вплив водної фази, яка частково обмежує дифузію газу та сприяє його тимчасовому утриманню у структурі суміші.

Подальше зменшення об'ємної активності радону спостерігається на етапах формування виробів (110 Бк/м³) та твердіння (95 Бк/м³). Це зумовлено сукупною дією процесів дифузійного вивітрювання та радіоактивного розпаду радону, що описується експоненційною залежністю [14].

Мінімальні значення об'ємної активності радону зафіксовано для готової продукції (85 Бк/м³), що свідчить про завершення основних процесів виділення та розпаду радону у матеріалі.

Зіставлення отриманих результатів із чинними нормативними вимогами (НРБУ-97, ОСПУ-2005) показало, що досліджені значення не перевищують допустимих рівнів для виробничих приміщень. Водночас зафіксовані концентрації на стадії дроблення наближаються до верхньої межі рекомендованих значень, що вказує на необхідність впровадження додаткових інженерно-технічних заходів, зокрема ефективної вентиляції та локалізації джерел пилогазовиділення [3].

У таблиці 1 наведено результати розрахунку середньорічної еквівалентної рівноважної об'ємної активності (ЕРОА) радону-222 для різних стадій виробничого процесу.

Наведені у табл. 1 результати дають змогу здійснити інтегральну оцінку радіаційного навантаження на персонал на різних стадіях виробничого процесу.

Аналіз отриманих даних свідчить, що значення ЕРОА змінюються залежно від технологічного етапу та умов перебігу процесів. Найвищі

значення, як правило, характерні для стадій, пов'язаних із механічною обробкою сировини, що обумовлено інтенсивною екзальцією радону та підвищеною концентрацією його дочірніх продуктів у повітрі робочої зони. Це підтверджує визначальну роль фізико-механічного впливу на матеріал у формуванні радіаційного фактору.

Важливим є те, що розрахунок ЕРОА, на відміну від миттєвих значень об'ємної активності радону, враховує рівноважний стан між радоном і його короткоживучими дочірніми продуктами. Саме тому отримані показники більш адекватно відображають реальне інгалаційне навантаження на організм людини та можуть бути використані для розрахунку ефективної дози опромінення. Підвищені значення ЕРОА на окремих стадіях вказують на необхідність посилення контролю за параметрами виробничого середовища, зокрема ефективністю вентиляції та тривалістю перебування персоналу у відповідних зонах.

Висновки і перспективи подальших досліджень у даному напрямі. Проведене дослідження із застосуванням підходу аналізу життєвого циклу дало змогу комплексно оцінити формування, трансформацію та міграцію радону на всіх етапах виробництва тротуарної бруківки. Встановлено, що найбільш інтенсивне вивільнення радону відбувається на стадіях підготовки та подрібнення сировини, тоді як у процесах формування та твердіння виробів його емісія поступово знижується внаслідок ущільнення структури матеріалу.

Аналіз життєвого циклу показав, що основні радіаційні ризики зосереджені на ранніх виробничих етапах, тоді як на стадії експлуатації готової продукції рівень емісії радону є низьким і не становить суттєвої небезпеки. Отримані результати підтверджують доцільність використання життєво-циклового підходу для ідентифікації критичних точок контролю та обґрунтування заходів зниження радіаційного впливу.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх використання для підвищення екологічної безпеки підприємств будівельної галузі, удосконалення систем виробничого контролю та мінімізації впливу іонізуючого випромінювання на працівників і навколишнє середовище.

ЛІТЕРАТУРА

1. ДСТУ Б В.2.7-145:2008. Будівельні матеріали. Вироби бетонні тротуарні неармовані. Технічні умови. Київ: Мінрегіонбуд України, 2008.

Таблиця 1

Середньорічна еквівалентна рівноважна об'ємна активність (ЕРОА)

Етап	СРн, Бк/м ³	ЕРОА, Бк/м ³
Сировина	120	48
Після подрібнення	145	58
Бетонна суміш	130	52
Свіже формування	110	44
Затверділа бруківка	95	38
Готовий виріб	85	34

2. Загребя В. П., Дудар І. Н. Формування бетонних і залізобетонних виробів методом пульсуючого пресування бетонних сумішей: монографія. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2009. 104 с.

3. Зубко К. Ю. Оцінка наслідків антропогенного впливу на природу і суспільство. Економіка і суспільство. 2017. № 9. С. 826–831.

4. Методика контролю радіаційних показників та супровідні документи: наказ МОЗ України від 13.10.2023. № 1786. Київ: Міністерство охорони здоров'я України, 2023.

5. Bulut H. A., Sahin R. Radon, concrete, buildings and human health – a review study. Buildings. 2024. Vol. 14. 510.

6. Chen J. Radon emanation and exhalation from building materials: recent advances. Radiation Physics and Chemistry. 2021.

7. Darby S., та ін. Radon exposure and lung cancer risk: updated analysis. Environmental Health Perspectives. 2020.

8. Fior L., Nicolosi Correa J., Paschuk S. A. та ін. Measurement of radon activity in building materials. Applied Radiation and Isotopes. 2012. Vol. 70. P. 1407–1410.

9. Radiation Protection and NORM Residues in Building Materials / International Atomic Energy Agency. Vienna : IAEA, 2022.

10. Ivanova K. et al. Exposure Due to Indoor Radon in Bulgarian Schools. Aerosol and Air Quality Research. 2022. Vol. 22. Article 220279. <https://doi.org/10.4209/aaqr.220279>

11. Jabbade M., Nachab A., Nourreddine A.-M., Errami E., Benjelloun M. A study of grain size effect on radon exhalation rate and uranium content of a phosphate rock. Acta Geophysica. 2022. Vol. 70. P. 2805–2812.

12. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation : report 2020/2021 / United Nations Scientific Committee on the Effects of Ionizing Radiation. New York : United Nations, 2021.

13. WHO Handbook on Indoor Radon: Updated Guidance and Recent Studies / World Health Organization. Geneva : WHO, 2021.

14. Zhukovsky M., Onishchenko A., Vasilyev A., Malinovskiy G. Factors influencing temporal variations of radon concentration in high-rise buildings. Journal of Environmental Radioactivity. 2021. Vol. 232. 106575.

REFERENCES

1. DSTU B V.2.7-145:2008. Budivelnі materialy. Vyroby betonni trotuarni narmovani. Tekhnichni umovy. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy, 2008.

2. Zahreba V. P., Dudar I. N. Formuvannia betonnykh i zalizobetonnykh vyrobiv metodom pul'suiuchoho presuvannia betonnykh sumishej: monohrafiia. Vinnytsia: UNIVERSUM-Vinnytsia, 2009. 104 s.

3. Zubko K. Yu. Otsinka naslidkiv antropohennoho vplyvu na pryrodu i suspil'stvo. Ekonomika i suspil'stvo. 2017. № 9. S. 826–831.

4. Metodyka kontroliu radiatsijnykh pokaznykiv ta suprovidni dokumenty: nakaz MOZ Ukrainy vid 13.10.2023. № 1786. Kyiv: Ministerstvo okhorony zdorov'ia Ukrainy, 2023.

5. Bulut H. A., Sahin R. Radon, concrete, buildings and human health – a review study. Buildings. 2024. Vol. 14. 510.

6. Chen J. Radon emanation and exhalation from building materials: recent advances. Radiation Physics and Chemistry. 2021.

7. Darby S., та in. Radon exposure and lung cancer risk: updated analysis. Environmental Health Perspectives. 2020.

8. Fior L., Nicolosi Correa J., Paschuk S. A. та in. Measurement of radon activity in building materials. Applied Radiation and Isotopes. 2012. Vol. 70. P. 1407–1410.

9. Radiation Protection and NORM Residues in Building Materials / International Atomic Energy Agency. Vienna : IAEA, 2022.

10. Ivanova K. et al. Exposure Due to Indoor Radon in Bulgarian Schools. Aerosol and Air Quality Research. 2022. Vol. 22. Article 220279. <https://doi.org/10.4209/aaqr.220279>

11. Jabbade M., Nachab A., Nourreddine A.-M., Errami E., Benjelloun M. A study of grain size effect on radon exhalation rate and uranium content of a phosphate rock. Acta Geophysica. 2022. Vol. 70. P. 2805–2812.

12. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation : report 2020/2021 / United Nations Scientific Committee on the Effects of Ionizing Radiation. New York : United Nations, 2021.

13. WHO Handbook on Indoor Radon: Updated Guidance and Recent Studies / World Health Organization. Geneva : WHO, 2021.

14. Zhukovsky M., Onishchenko A., Vasilyev A., Malinovskiy G. Factors influencing temporal variations of radon concentration in high-rise buildings. Journal of Environmental Radioactivity. 2021. Vol. 232. 106575.

Дата першого надходження статті до видання: 03.07.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 04.08.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 12.10.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)

