DOI: https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2025.346158

УДК 550.42+551.24

ОЦІНЮВАННЯ РАДОНОВОГО РИЗИКУ НА ТЕРИТОРІЇ КИЇВСЬКОЇ АГЛОМЕРАЦІЇ ЗА ДАНИМИ НАТУРНИХ ВИМІРЮВАНЬ

RADON RISK ASSESSMENT IN THE KYIV AGGLOMERATION BASED ON FIELD MEASUREMENTS

К. М. Стародубець[1,2], В. О. Ковач[2], В. О. Куценко[2], Д. В. Тарадуда[3], В. Ю. Бондар[1]

Kyrylo M. Starodubets[1,2], Valeria O. Kovach[2], Volodymyr O. Kutsenko[2], Dmytro V. Taraduda[3], Volodymyr Yu. Bondar[1]

[1]Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine, 55-b O. Honchara St., Kyiv, 01601, Ukraine
[2]Center for Information-analytical and Technical Support of Nuclear Power Facilities Monitoring of the NAS of Ukraine, 34 Academician Palladin Ave., Kyiv, 03142, Ukraine
[3]Lviv State University of Life Safety, 35 Kleparivska St., Lviv, 79007, Ukraine

E-mail:
starodubets.kirill@ukr.net
https://orcid.org/0000-0002-0887-1543
valeriiakovach@gmail.com
https://orcid.org/0000-0002-1014-8979
kuts.vo@gmail.com
https://orcid.org/0000-0002-0577-2056
taraduda_dv@ukr.net
https://orcid.org/0000-0001-9167-0058
uldebon@gmail.com
https://orcid.org/0009-0006-4884-6381

Наведено результати першого системного оцінювання концентрації радону в ґрунтах Київської агломерації, території з високою щільністю населення, складною геологічною будовою та інтенсивною урбанізацією. Польові дослідження проведено у липні 2025 р. на 50 пунктах спостережень у межах площі 95 км² з використанням сцинтиляційного обладнання NC-482B та стандартної методики відбору ґрунтового газу на глибині 1 м. Виміряні концентрації радону варіювали від 0,015 до 9,723 кБк/м³, середнє значення — 2,21 кБк/м³. Просторовий розподіл радону має мозаїчний характер, з огляду на підвищені та низькі значення у межах усієї дослідженої території. Для інтерпретації потенційних ризиків застосовано шведську модель класифікації («шведські критерії»), згідно з якою виділено три категорії радонового ризику: низького (<10 кБк/м³), середнього (10–50 кБк/м³) і високого (>50 кБк/м³). Усі вищенаведені значення віднесено до категорії низького ризику, що не потребує обов'язкового впровадження протирадонових заходів у межах дослідженої території. За отриманими результатами сформовано базу для подальшого картування радонової небезпеки в межах території України.

Ключові слова: концентрація радону, ґрунти, рельєф, Київська агломерація.

Keywords: soil, radon concentration, relief, Kyiv agglomeration.

This study presents the first systematic assessment of soil radon concentration within the Kyiv agglomeration, a densely populated area with complex geological structure and active urbanization. Field investigations were conducted at 50 observation points across an area of 95 km² during July 2025, using scintillation equipment NC-482B and standardized soil gas sampling procedures at a depth of 1 m. Measured radon concentrations ranged between 0.015 and 9.723 kBq/m³, with a mean value of 2.21 kBq/m³. To interpret potential health risks, the Swedish classification model ("Swedish criteria") was applied, which distinguishes three categories of radon risk in soils: low (<10 kBq/m³), medium (10–50 kBq/m³), and high (>50 kBq/m³). According to this framework, all measured

© Видавець Інститут геологічних наук НАН України, 2025. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

© Publisher Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2025. This is an Open Access article under the CC BY-NC-ND license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

Цитування: Стародубець К. М., Ковач В. О., Куценко В. О., Тарадуда Д. В., Бондар В. Ю. Оцінювання радонового ризику на території київської агломерації за даними натурних вимірювань. Збірник наукових праць Інституту геологічних наук НАН України. 2025. Том 18. Вип. 2. С. 108–115. https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2025.346158.

Citation: Starodubets K. M., Kovach V. O., Kutsenko V. O., Taraduda D. V., Bondar V. Yu., 2025. Radon risk assessment in the Kyiv agglomeration based on field measurements. Collection of Scientific Works of the Institute of Geological Sciences NAS of Ukraine. Vol. 18. Iss. 2. Pp. 108–115. https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2025.346158.

values fall into the low-risk category, implying that mandatory radon protection measures are not required for construction within the investigated area. Nevertheless, given the known variability of radon distribution and possible influence of local geological conditions, further monitoring is recommended. The obtained results represent a baseline regional dataset that can support radon hazard mapping in Ukraine.

ВСТУП

Радон (^{222}Rn) — це природний радіоактивний газ, що утворюється внаслідок розпаду радію (^{226}Ra), який є продуктом розпаду урану (^{238}U). Відносно висока мобільність радону та його здатність до накопичення у підвалах і на перших поверхах житлових й виробничих приміщень є значущим чинником радіаційного впливу на населення. За оцінками наведеними у Європейському атласі природної радіації (Cinelli et al., 2019), на радон припадає приблизно 60% річної дози опромінення від природних джерел у Європі та близько 50% — на глобальному рівні.

Концентрація радону в повітрі будівель значною мірою залежить від геологічних умов і характеристик ґрунту (Chen et al., 2009; Nunes et al., 2023), тому важливим інструментом попередження та мінімізації ризиків для здоров'я населення є картування просторового розподілу концентрації радону в ґрунтовому шарі. Побудова радонових карт дає змогу визначати потребу у радонозахисних заходах під час нового будівництва, оптимізувати програми моніторингу в існуючих будинках і на робочих місцях, а також інформувати власників нерухомості про потенційний радоновий ризик на конкретній ділянці (Appleton, 2007).

Більшість міжнародних досліджень у різних галузях знань зосереджені на контролі концентрації радону в повітрі житлових і громадських будівель, результатами картування яких є *"indoor radon concentration" (IRC)* та *"Radon priority areas" (RPA)*. Дослідження *"geogenic radon potential" (GRP)* розглядають як додаткову інформацію або предиктор для *IRC* і *RPA* (Bossew et al., 2022; García-Talavera et al., 2013). Водночас за сучасними підходами до управління ризиками дедалі частіше увагу акцентують на побудові комплексних моделей концентрації радону, які включають оцінювання *GRP* для прогнозування накопичення радону в приміщеннях та розробки ефективних стратегій зменшення радіаційного ризику (Appleton et al., 2010; Gruber et al., 2013; Park et al., 2019; Petermann et al., 2021). Зокрема, після 2019 р. — року публікації Європейського атласу природної радіації (Cinelli et al., 2019) та початку імплементації оновленої Директиви 2013/59/Euratom (Council Directive, 2013) — в деяких країнах світу почалася активізація нормативних зусиль щодо картування *GRP*, визначення зон підвищеного ризику та оновлення будівельних норм.

У підходах до оцінювання *GRP* зазвичай поєднуються емпіричні польові вимірювання ґрунтового газу з іншими просторовими наборами даних: геологічними картами (Petersell et al., 2005; Masoumi et al., 2024), показниками проникності ґрунту (Kemski et al., 2001; Neznal et al., 2004), гамма-спектрометрією вмісту у ґрунтах урану, радію, торію (Petersell et al., 2005; Masoumi et al., 2024) та деякими іншими даними (Sundal et al., 2004; Fujiyoshi et al., 2006).

Попри значний прогрес у міжнародних дослідженнях *GRP*, територія України досі залишається білою плямою у контексті вимірювань концентрації радону в ґрунтовому газі та віднесення деяких територій країни до категорій радонового ризику. Існуючі методичні підходи до класифікації *GRP*, зокрема моделі, засновані на емпіричних концентраціях радону у ґрунтах на глибині до 1 м (Lara et al., 2015; Petersell et al., 2005; Kemski et al., 2001; Neznal et al., 2004), широко застосовуються в багатьох країнах світу але їх адаптація в Україні практично не здійснювалася.

Київська агломерація була обрана для проведення натурних досліджень з кількох ключових причин. По-перше, цей регіон характеризується високою щільністю населення та інтенсивним розвитком житлової й інфраструктурної забудови, що потребує актуальної оцінки потенційного радонового впливу. По-друге, регіон знаходиться у межах складної тектонічної структури Дніпровської зони розривних порушень, що теоретично може зумовлювати значні просторові варіації концентрації радону у ґрунтовому газі (Starodubets et al., 2025). З огляду на зазначене, виникла нагальна потреба у виконанні первинних натурних вимірювань концентрації радону в ґрунтовому шарі Київської агломерації, створенні вихідного набору даних для подальшого картування *GRP* і науково обґрунтованого оцінювання рівня радонового ризику території.

У цьому контексті метою даного дослідження є визначення просторового розподілу концентрації радону в ґрунтовому газі на глибині 1 м і первин-

не категоріальне оцінювання радонового ризику території Київської агломерації із застосуванням міжнародно визнаних підходів до класифікації.

МІСЦЕ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБСЯГИ

За адміністративно-територіальним розподілом район досліджень розміщується в межах Бучанського (Білогородська сільська громада, Борщагівська сільська громада, Вишнева міська громада), Фастівського (Гатненська сільська громада, Чабанівська селищна громада, Боярська міська громада) та Обухівського районів (Феодосіївська сільська громада) Київської області, на південний захід від м. Київ. Загальна площа території, охопленої дослідженнями, становить 95 км^2.

З 7 по 10 липня 2025 р. було виміряно концентрацію радону на 50 пунктах спостережень (рис. 1). Мережа пунктів спостереження була нерівномірною через щільну забудову житловими та виробничими приміщеннями і варіює в діапазоні від 0,8 до 3 км.

ГЕОЛОГІЧНА БУДОВА ДІЛЯНКИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Геологічна будова ділянки досліджень має двох'ярусну будову: нижній ярус складений слабодислокованими і глибоко метаморфізованими неоархей-палеопротерозойськими породами кристалічного фундаменту, верхній ярус складають осадові відклади мезокайнозойського чохла (Державна геологічна карта, 2001).

Згідно зі схемою районування Українського щита (Тектонічна карта України, 2007), територія ділянки знаходиться у межах Макарівського блока II порядку Росинсько-Тікицького мегаантиклінорію, з глибинами залягання фундаменту 200–250 м. Відповідно до тектонічної схеми 1:500 000 (Державна геологічна карта, 2001), район досліджень тяжіє до Дніпровської тектонічної зони, яка характеризується зміною нахилу кристалічного фундаменту в межах 0–15˚, що,

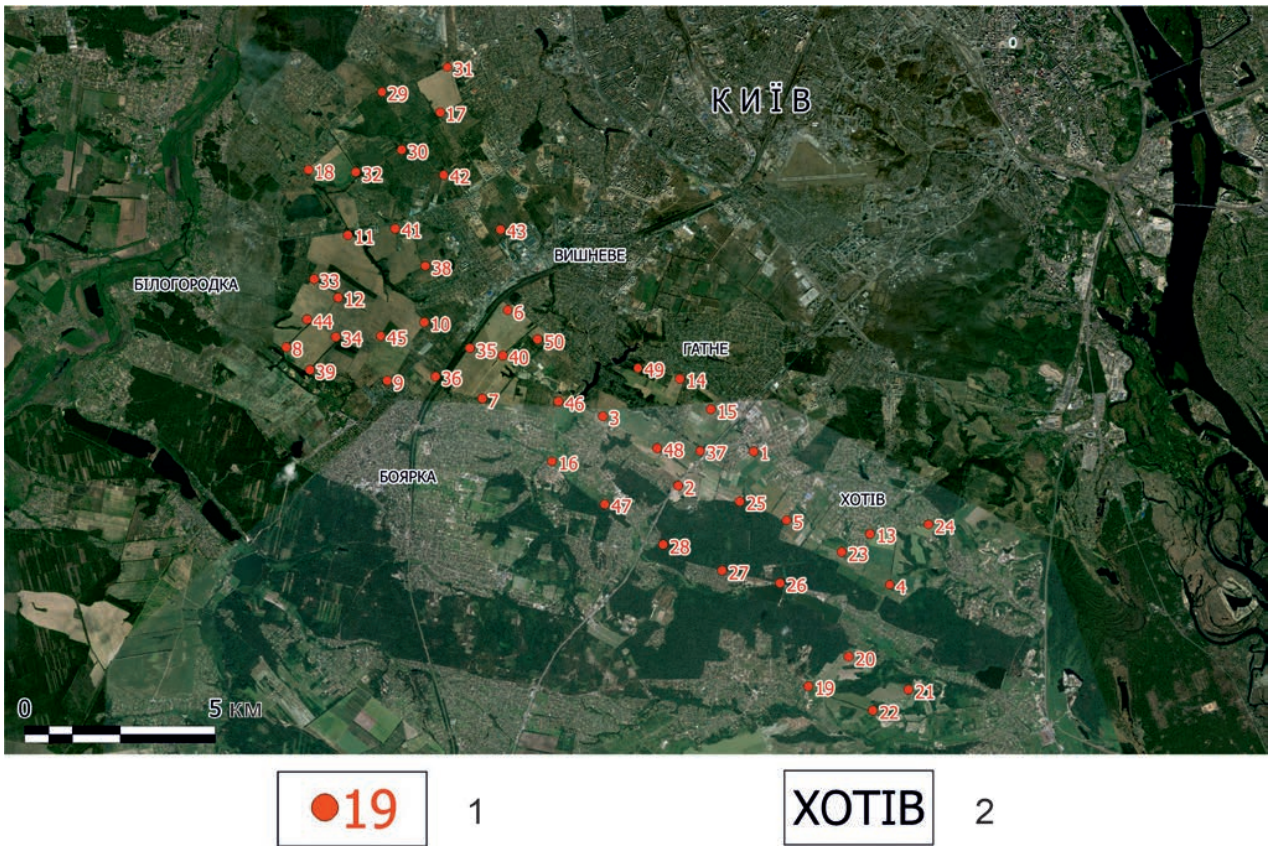

Рис. 1. Мережа досліджень концентрації радону в ґрунтах на космознімку Google:
1 — пункт спостереження (ПС) та його порядковий номер; 2 — назви населених пунктів

Fig. 1. Network of Soil Radon Concentration Survey on the Google Satellite Image:
1 — observation point (OP) and its identification number; 2 — names of settlements

ймовірно, значною мірою вплинуло на процеси осадо нагромадження. В межах ділянки зафіксовано розривні порушення.

ОБЛАДНАННЯ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Обладнання для проведення польових вимірювань складалось з двох основних груп приладів: для забезпечення еманаційних досліджень і для буріння шпурів.

До комплекту приладів для еманаційного знімання входили: вакуумний насос із пило- та вологовловлювальним фільтром; сцинтиляційна камера; модернізований прилад NC-482B (електронно-цифровий сцинтиляційний альфа-, бета-аналізатор, гамма-спектрометр).

Шпури на пунктах спостережень (ПС) бурили на глибину 1 м спіральним буром діаметром 12 мм. Прив'язку ПС до координатної мережі за глобальною системою позиціонування (GPS) здійснювали за допомогою приладу Garmin GPS-12.

З метою забезпечення репрезентативності результатів, пункти польових вимірювань були розміщені на відкритій території, максимально віддаленій від джерел антропогенного впливу, таких як дороги, споруди, підземні комунікації.

Послідовність вимірювань на пункті спостереження:

1. Буріння шпура завглибшки 1 м за допомогою електробура у обраній точці.

2. У пробурений шпур вставляли щуп-зонд який приєднували до комплекту приладів для еманаційного знімання.

3. Вимірювання концентрації радону приладом NC-482B: замір фонового альфа-випромінювання сцинтиляційної камери Nf; через щуп-зонд та сцинтиляційну камеру за допомогою насоса прокачування 2,5–3 л підґрунтового повітря. Сцинтиляційну камеру зачиняли за допомогою клапанів. У камері під час взаємодії α-частинок, що утворюються внаслідок радіоактивного розпаду радону, зі сцинтиляційною речовиною виникають світлові спалахи (фотони). Ці фотони реєструються фотоелектронним помножувачем, сигнал з якого передається на вимірювальний прилад. Зареєстрована кількості фотонів пропорційна кількості радону, що міститься в камері. Концентрацію радону розраховували за відліком кількості імпульсів: за 60 секунд — N_0 (миттєвий замір); відлік кількості імпульсів через 3 хв протягом 60 секунд — N_3.

4. По закінченню вимірювань насос від'єднували від щуп-зонда, а насосно-шлангову систему за допомогою насоса прокачували атмосферним повітрям.

5. За допомогою приладу Garmin GPS-12 відбувалася прив'язка ПС до координатної мережі за глобальною системою позиціонування GPS.

Розрахунок концентрації радону в підґрунтовому повітрі:

Концентрацію радону в підґрунтовому повітрі розраховано за формулою, наведеною у роботі (Багрій, 2013), для 3-хвилинного інтервалу часу:

$$C_{Rn} = j(N_3 - 0.13N_0)$$

де: C_{Rn} — вміст радону; j — еталонувальний коефіцієнт приладу; 0,13 — постійний коефіцієнт; N_0 — показання еманометра відразу після закачування підґрунтового повітря в робочу камеру; N_3 — показання еманометра по закінченні 3 хв після закачування підґрунтового повітря в робочу камеру.

Значення величин N_0 та N_3 застосовують з урахуванням фонових показників приладу.

ОТРИМАНІ РЕЗУЛЬТАТИ

За результатами досліджень на кожному пункті спостереження було зафіксовано висотну відмітку устя пробуреного шпура (за даними GPS) та виміряно концентрацію радону в ґрунтах на глибині 1 м.

З урахуванням складної тектонічної будови району дослідження і відносно незначною потужністю відкладів мезозою-кайнозою, в межах ділянки досліджень очікувалась наявність розломних зон підвищеної проникності (Багрій, 2013), у межах яких можуть бути зафіксовані "високі" значення концентрації радону. Однак за результатами досліджень такі зони не виявлено. Порівняння отриманого просторового розподілу концентрації радону з тектонічними елементами кристалічного фундаменту, розривними порушеннями дочетвертинних відкладів, а також зміною напрямку ізогіпс кристалічного фундаменту, дочетвертинних і четвертинних відкладів — закономірностей не виявило (рис. 2).

Виміряний розподіл радонового поля є мозаїчним. Високі та низькі значення концентрації радону розташовуються на всій території досліджень, що свідчить про відсутність сучасного зв'язку між підвищеними значеннями радону і структурно-тектонічною будовою, а також його сучасну геодинамічну пасивність. Максимальне значення концентрації радону в ґрунтовому шарі зафіксовано в південно-східній частині площі досліджень біля села Кременище на ПС21 та

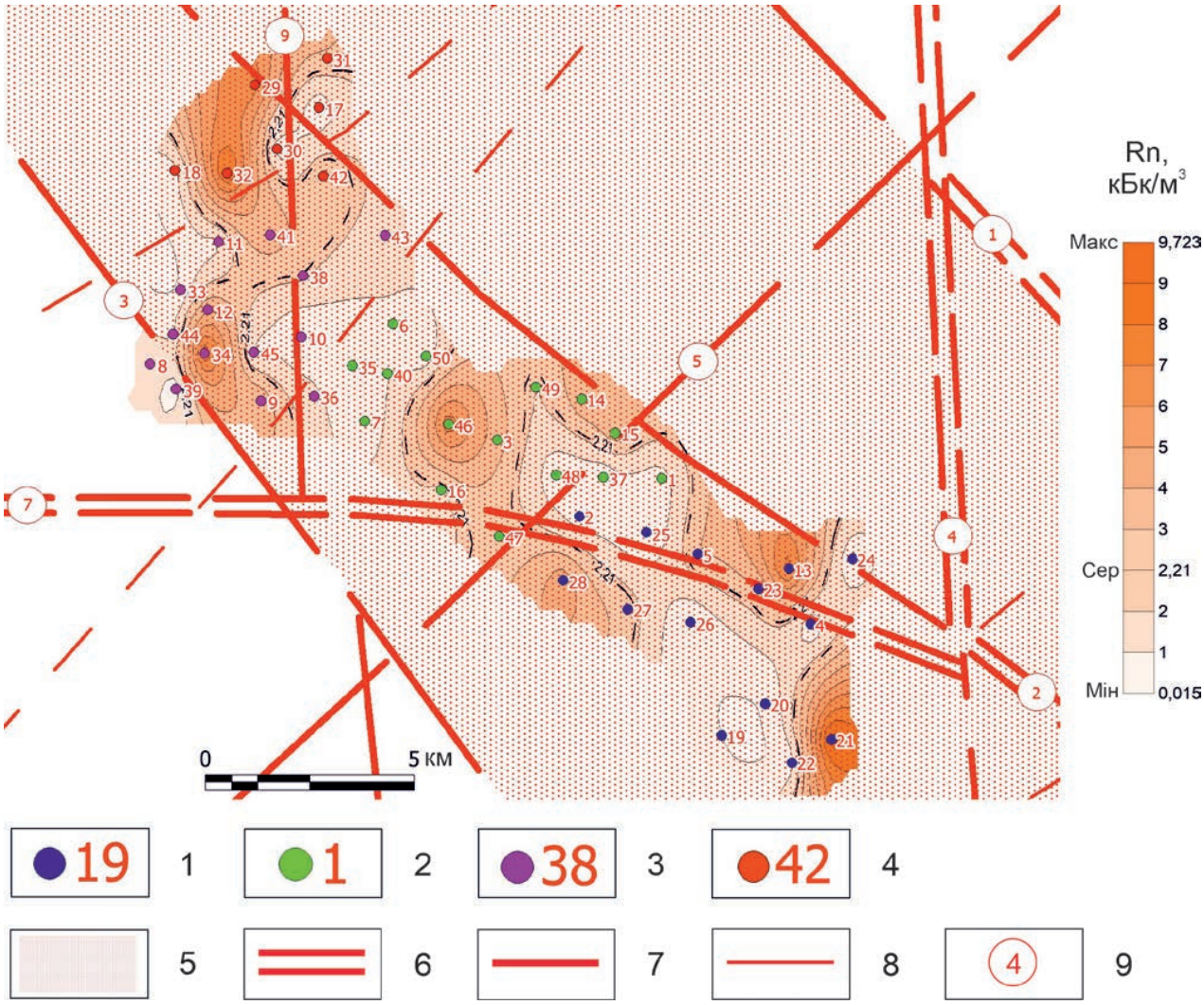

Рис. 2. Карта просторового розподілу концентрації радону в ґрунтах, визначеної на глибині 1 м з нанесеними елементами тектонічної схеми масштабу 1:500 000 (Державна геологічна карта, 2001):
1 — вимірювання проведено 7.07.2025 р.; 2 — вимірювання проведено 8.07.2025 р.;
3 — вимірювання проведено 9.07.2025 р.; 4 — вимірювання проведено 10.07.2025 р.;
5 — Дніпровська зона розривних порушень; 6 — міжблокові розривні порушення, що обмежують блоки III порядку; 7 — головні розривні порушення; 8 — другорядні розривні порушення; 9 — індекс розривних порушень

Fig. 2. Spatial Distribution Map of Soil Radon Concentration Measured at a Depth of 1 m, with Superimposed Elements of the Tectonic Scheme at a Scale of 1:500 000 (State Geological Map, 2001):
1 — measurements conducted on 7 July 2025; 2 — measurements conducted on 8 July 2025;
3 — measurements conducted on 9 July 2025; 4 — measurements conducted on 10 July 2025;
5 — Dnipro fault zone; 6 — interblock faults delineating third-order blocks;7 — major faults; 8 — minor faults; 9 — fault index

складає 9,723 кБк/м³; мінімальне значення зафіксоване в північно-західній частині біля м. Боярка на ПС10 та складає 0,015 кБк/м³. Середнє значення концентрації радону в межах площі досліджень — 2,21 кБк/м³.

Наступним кроком стало проведення оцінки радонового ризику з використанням міжнародних підходів класифікації. Для оцінки радонового ризику в ґрунтах Київської агломерації було застосовано шведську модель класифікації радонової небезпеки, відому як «шведські критерії» (Lara et al., 2015). На даному етапі дослідження, з огляду на відсутність значень щодо проникності ґрунту та результатів гамма-спектрометрії зразків ґрун-

ту, основна ідея застосування підходу полягає у віднесенні ґрунтів до певної категорії ризику на основі рівня концентрації радону.

Відповідно до застосованої класифікації (Lara et al., 2015), ґрунти поділяються на три категорії ризику:

Низький ризик (<10 кБк/м³). До цієї категорії належать території, де рівні радону в ґрунтовому газі є незначними й не потребують впровадження спеціальних протирадонових заходів під час будівництва.

Середній ризик (10–50 кБк/м³). У такій ситуації рекомендується застосування базових захисних заходів, що мінімізують проникнення радону в будівлі. Серед таких заходів найчастіше використовуються підвищена вентиляція підвальних приміщень, а також використання спеціальних радонозахисних мембран у конструкціях фундаменту.

Високий ризик (>50 кБк/м³). Ґрунти цієї категорії становлять найбільшу небезпеку, оскільки здатні спричиняти значне надходження радону у будівлі. Для таких територій передбачаються посилені заходи безпеки, серед яких герметизація підвальних і технічних приміщень, облаштування протирадонових бар'єрів та встановлення систем активного видалення радону.

Аналіз отриманих даних для території Київської агломерації показав, що концентрації радону в ґрунтовому газі варіюють у межах від 0,015 до 9,723 кБк/м³. Таким чином, відповідно до критеріїв шведської моделі, усі отримані значення належать до категорії низького радонового ризику (<10 кБк/м³). Це означає, що спеціальні радонозахисні заходи при будівництві нових будівель або експлуатації існуючих — не є обов'язковими. Водночас, з урахуванням встановлених просторових варіацій концентрації радону, доцільним є проведення подальших геологічних досліджень, спрямованих на виявлення факторів, що зумовлюють їх формування.

ВИСНОВКИ

Проведене дослідження стало першою спробою оцінити рівні радону в ґрунтовому газі в межах Київської агломерації, яка поєднує складну геологічну будову та високий рівень урбанізації. За результатами польових вимірювань, виконаних на 50 пунктах спостереження, встановлено, що концентрації радону у ґрунтах змінюються в діапазоні від 0,015 до 9,723 кБк/м³, при середньому значенні 2,21 кБк/м³. Просторовий розподіл радону має мозаїчний характер, без кореляції з основними тектонічними структурами району, що підтверджує складність впливу локальних геологічних чинників на формування радонового поля.

Застосування шведської моделі класифікації радонового ризику показало, що всі отримані значення належать до категорії низького ризику (<10 кБк/м³). Це вказує на відсутність необхідності у впровадженні спеціальних протирадонових заходів під час будівництва в межах дослідженої території.

Отримані дані доцільно розглядати як попередній етап у формуванні регіональної стратегії управління радоновим ризиком, що має значення як для наукової спільноти, так і для органів державної влади у сфері екологічної безпеки та містобудування.

ПОДЯКА

Автори висловлюють подяку співробітнику Інституту геологічних наук НАН України — кандидату геологічних наук Дубосарському Віктору Рудольфовичу за цінні методичні поради, які дозволили покращити якість дослідження.

Дослідження виконано в рамках гранту НАН України "Розроблення програмно-методичного забезпечення моніторингу радону в ґрунтах для мінімізації радіаційного впливу при будівництві інфраструктурних об'єктів на прикладі Київської агломерації" (державний реєстраційний номер: 0125U001622) дослідницьким лабораторіям/групам молодих вчених НАН України для проведення досліджень за пріоритетними напрямами розвитку науки і техніки на 2025–2026 рр.

REFERENCES

Appleton J. D., 2007. Radon: Sources, health risks, and hazard mapping. *A Journal of the Human Environment*. Vol. 36 (1). Pp. 85–89. https://doi.org/10.1579/0044-7447(2007)36[85:RSHRAH]2.0.CO;2.

Appleton J. D., Miles J. C. H., 2010. A statistical evaluation of the geogenic controls on indoor radon concentrations and radon risk. *Journal of Environmental Radioactivity*. Vol. 101 (10). Pp. 799–803. https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2009.06.002.

Bahriy I. D., 2013. Development of a Geological-Structural-Thermo-Atmogeochemical Technology for Mineral Exploration Forecasting and Assessment of the Geoecological State of the Environment. *Kyiv: Logos Publishing House*. P. 511. (In Ukrainian).

Bossew P., Čeliković I., Cinelli G., Ciotoli G., Domingos F., Gruber V., Leonardi F., Nikolov J., Pantelić G., Pereira A., Petermann E., Todorović N., Trevisi R., 2022. On harmonization of radon maps. *Journal of the European Radon Association*. https://doi.org/10.35815/radon.v3.7554.

Cinelli G., De Cort M., Tollefsen T. et al., 2019. European atlas of natural radiation. Luxembourg: Publication Office of the European Union. https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC116795.

Chen J., Falcomer R., Bergman L., Wierdsma J., Ly J., 2009. Correlation of soil radon and permeability with indoor radon potential in Ottawa. *Radiation Protection Dosimetry*. Vol. 136 (1). Pp. 56–60. https://doi.org/10.1093/rpd/ncp137.

Council Directive 2013/59/Euratom of 5 December 2013 laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising 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, L 13. Pp. 1–73. https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2013/59/oj/eng.

Fujiyoshi R., Sakamoto K., Imanishi T., Sumiyoshi T., Sawamura S., Vaupotic J., Kobal I., 2006. Meteorological parameters contributing to variability in ^{222}Rn activity concentrations in soil gas at a site in Sapporo, Japan. *Science of The Total Environment*. Vol. 370 (1). Pp. 224–234. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.07.007.

García-Talavera M., García-Pérez A., Rey C., Ramos L., 2013. Mapping radon-prone areas using γ-radiation dose rate and geological information. *Journal of Radiological Protection*. Vol. 33 (3). Pp. 605–620. https://doi.org/10.1088/0952-4746/33/3/605.

Gruber V., Bossew P., De Cort M., Tollefsen T., 2013. The European map of the geogenic radon potential. *Journal of Radiological Protection*. Vol. 33 (1). Pp. 51–60. https://doi.org/10.1088/0952-4746/33/1/51.

Kemski J., Siehl A., Stegemann R., Valdivia-Manchego M., 2001. Mapping the geogenic radon potential in Germany. *Science of The Total Environment*. Vol. 272 (1–3). Pp. 217–230. https://doi.org/10.1016/s0048-9697(01)00696-9.

Lara E., Rocha Z., Palmieri H. E. L., Santos T. O., Rios F. J., Oliveira A. H., 2015. Radon concentration in soil gas and its correlations with pedologies, permeabilities and ^{226}Ra content in

Appleton J. D., 2007. Radon: Sources, health risks, and hazard mapping. *A Journal of the Human Environment*. Vol. 36 (1). Pp. 85–89. https://doi.org/10.1579/0044-7447(2007)36[85:RSHRAH]2.0.CO;2.

Appleton J. D., Miles J. C. H., 2010. A statistical evaluation of the geogenic controls on indoor radon concentrations and radon risk. *Journal of Environmental Radioactivity*. Vol. 101 (10). Pp. 799–803. https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2009.06.002.

Багрій І. Д., 2013. Розробка геолого-структурно-термо-атмогеохімічної технології прогнозування пошуків корисних копалин та оцінки геоекологічного стану довкілля. *Київ: Логос*. 511 с.

Bossew P., Čeliković I., Cinelli G., Ciotoli G., Domingos F., Gruber V., Leonardi F., Nikolov J., Pantelić G., Pereira A., Petermann E., Todorović N., Trevisi R., 2022. On harmonization of radon maps. *Journal of the European Radon Association*. https://doi.org/10.35815/radon.v3.7554.

Cinelli G., De Cort M., Tollefsen T. et al., 2019. European atlas of natural radiation. Luxembourg: Publication Office of the European Union. https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC116795.

Chen J., Falcomer R., Bergman L., Wierdsma J., Ly J., 2009. Correlation of soil radon and permeability with indoor radon potential in Ottawa. *Radiation Protection Dosimetry*. Vol. 136 (1). Pp. 56–60. https://doi.org/10.1093/rpd/ncp137.

Council Directive 2013/59/Euratom of 5 December 2013 laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising 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, L 13. Pp. 1–73. https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2013/59/oj/eng.

Fujiyoshi R., Sakamoto K., Imanishi T., Sumiyoshi T., Sawamura S., Vaupotic J., Kobal I., 2006. Meteorological parameters contributing to variability in ^{222}Rn activity concentrations in soil gas at a site in Sapporo, Japan. *Science of The Total Environment*. Vol. 370 (1). Pp. 224–234. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.07.007.

García-Talavera M., García-Pérez A., Rey C., Ramos L., 2013. Mapping radon-prone areas using γ-radiation dose rate and geological information. *Journal of Radiological Protection*. Vol. 33 (3). Pp. 605–620. https://doi.org/10.1088/0952-4746/33/3/605.

Gruber V., Bossew P., De Cort M., Tollefsen T., 2013. The European map of the geogenic radon potential. *Journal of Radiological Protection*. Vol. 33 (1). Pp. 51–60. https://doi.org/10.1088/0952-4746/33/1/51.

Kemski J., Siehl A., Stegemann R., Valdivia-Manchego M., 2001. Mapping the geogenic radon potential in Germany. *Science of The Total Environment*. Vol. 272 (1–3). Pp. 217–230. https://doi.org/10.1016/s0048-9697(01)00696-9.

Lara E., Rocha Z., Palmieri H. E. L., Santos T. O., Rios F. J., Oliveira A. H., 2015. Radon concentration in soil gas and its correlations with pedologies, permeabilities and ^{226}Ra content in

the soil of the Metropolitan Region of Belo Horizonte — RMBH, Brazil. *Radiation Physics and Chemistry*. Vol. 116. Pp. 317–320. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2015.02.017.

Masoumi I., Maggio S., De Iaco S., 2024. An Advanced Spatial Approach Based on Multi-criteria Analysis and Geostatistical Simulation for a Comprehensive Geogenic Radon Hazard Index Mapping. *Journal of Agricultural*. https://doi.org/10.1007/s13253-024-00654-6.

Neznal M., Neznal M., Matolin M., Barnet I., Miksova J., 2004. The New Method for Assessing the Radon Risk of Building Sites. *Czech Geological Survey: Praga, Czech Republic*.

Nunes L. J. R., Curado A., Lopes S. I., 2023. The Relationship between Radon and Geology: Sources, Transport and Indoor Accumulation. *Applied Sciences*. Vol. 13 (13), 7460. https://doi.org/10.3390/app13137460.

Park N.-W., Kim Y., Chang B.-U., Kwak G.-H., 2019. County-level indoor radon concentration mapping and uncertainty assessment in South Korea using geostatistical simulation and environmental factors. *Journal of Environmental Radioactivity*. Vol. 208–209, 106044. https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.106044.

Petermann E., Bossew P., 2021. Mapping indoor radon hazard in Germany: The geogenic component. *Science of The Total Environment*. Vol. 780, 146601. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146601.

Petersell V., Åkerblom G., Ek B.-M., Enel M., Mõttus V., Täht K. 2005. Radon risk map of Estonia: Explanatory text to the radon risk map set of Estonia at the scale of 1:500000.

Starodubets K. M., Kovach V. O., Kutsenko V. O., Lahoiko A. M., 2025. Development of a research network for soil radon activity concentration in the Kyiv agglomeration based on a comprehensive analysis of geological heterogeneities. Scientific Horizons of the 21st Century: Multidisciplinary Research: Proceedings of the 2nd International Scientific Conference, Uzhhorod, May 6–7, 2025. Pp. 77–81. (In Ukrainian).

Sundal A., Henriksen H., Soldal O., Strand T., 2004. The influence of geological factors on indoor radon concentrations in Norway. *Science of The Total Environment*. Vol. 328 (1–3). Pp. 41–53. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.02.011.

State Geological Map of Ukraine at a Scale of 1:200,000, Sheet M-36-XIII (Kyiv), 2001. *Ministry of Ecology and Natural Resources of Ukraine, Northern State Regional Geological Enterprise "Pivnichgeologia"*. P. 78. (In Ukrainian).

Tectonic Map of Ukraine. Scale 1:1 000 000, 2007. *Kyiv: Ukrainian State Geological Research Institute (UkrSGRI)*. (In Ukrainian).

the soil of the Metropolitan Region of Belo Horizonte — RMBH, Brazil. *Radiation Physics and Chemistry*. Vol. 116. Pp. 317–320. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2015.02.017.

Masoumi I., Maggio S., De Iaco S., 2024. An Advanced Spatial Approach Based on Multi-criteria Analysis and Geostatistical Simulation for a Comprehensive Geogenic Radon Hazard Index Mapping. *Journal of Agricultural*. https://doi.org/10.1007/s13253-024-00654-6.

Neznal M., Neznal M., Matolin M., Barnet I., Miksova J., 2004. The New Method for Assessing the Radon Risk of Building Sites. *Czech Geological Survey: Praga, Czech Republic*.

Nunes L. J. R., Curado A., Lopes S. I., 2023. The Relationship between Radon and Geology: Sources, Transport and Indoor Accumulation. *Applied Sciences*. Vol. 13 (13), 7460. https://doi.org/10.3390/app13137460.

Park N.-W., Kim Y., Chang B.-U., Kwak G.-H., 2019. County-level indoor radon concentration mapping and uncertainty assessment in South Korea using geostatistical simulation and environmental factors. *Journal of Environmental Radioactivity*. Vol. 208–209, 106044. https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.106044.

Petermann E., Bossew P., 2021. Mapping indoor radon hazard in Germany: The geogenic component. *Science of The Total Environment*. Vol. 780, 146601. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146601.

Petersell V., Åkerblom G., Ek B.-M., Enel M., Mõttus V., Täht K. 2005. Radon risk map of Estonia: Explanatory text to the radon risk map set of Estonia at the scale of 1:500000.

Стародубець К. М., Ковач В. О., Куценко В. О., Лагойко А. М., 2025. Розробка мережі досліджень об'ємної активності радону в ґрунтах Київської агломерації на основі комплексного аналізу геологічних неоднорідностей. *Наукові горизонти XXI століття: мультидисциплінарні дослідження: збірник матеріалів II Міжнародної наукової конференції*, м. Київ, 6–7 листопада 2025 р. С. 77–81.

Sundal A., Henriksen H., Soldal O., Strand T., 2004. The influence of geological factors on indoor radon concentrations in Norway. *Science of The Total Environment*. Vol. 328 (1–3). Pp. 41–53. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.02.011.

Державна геологічна карта України масштабу 1:200 000 аркуша M-36-XIII (Київ), 2001. *Міністерство екології та природних ресурсів України, Північне державне регіональне геологічне підприємство "Північгеологія"*. 78 с.

Тектонічна карта України. Масштаб: 1:1 000 000, 2007. *Київ: УкрДГРІ*.

Manuscript received October 20, 2025;
revision accepted December 12, 2025.

Інститут геологічних наук НАН України,
Київ, Україна

Центр інформаційно-аналітичного та технічного
забезпечення моніторингу об'єктів
атомної енергетики НАН України, Київ, Україна

Львівський державний університет безпеки
життєдіяльності, Львів, Україна