

# TO THE ISSUE OF THE ESTIMATION OF RADON CONCENTRATIONS FOR RADON PROTECTION MEASURES

Aksionov N., Pavlenko T., Fryziuk M., German O., Fedorenko O., Mykhailenko O.

## ДО ПИТАННЯ ОЦІНКИ РІВНІВ РАДОНУ ДЛЯ ЗДІЙСНЕННЯ ПРОТИРАДОНОВИХ ЗАХОДІВ

# Н

ині у світі велика увага приділяється питанням забезпечення захисту населення від природного газу – радону, який є домінуючим джерелом у формуванні сумарної дози опромінення населення: його внесок може сягати понад 60%. При цьому радон є другим за значущістю (після куріння) фактором ризику виникнення раку легенів [1, 2].

За останні 10 років у світі було проведено понад 20 епідеміологічних досліджень впливу радону на здоров'я населення, виконаних методом «випадок – контроль». Це дозволило провести пряму оцінку ризику для населення від опромінення радonom у будівлях без необхідності екстраполяції параметрів ризику, отриманих у дослідженнях серед шахтарів уранових шахт. За результатами цих досліджень встановлено, що 3-14% випадків раку легенів обумовлено опроміненням населення радonom у житлі [3-6].

Обмеження опромінення населення радonom є важливою науково-практичною задачею, рішення якої нині набуває актуального значення у контексті громадського здоров'я.

Для виявлення радононебезпечних зон застосовується картування радонного ризику (як основний параметр використовується еквівалентна рівноважна об'ємна активність (ЕРОА) радону у повітрі будівель) або радонного потенціалу (як основний параметр використовується об'ємна активність (ОА) радону у ґрунтового повітрі) [7].

Метою картування радонних ризиків є виявлення територій, на яких розташовані будівлі з високими активностями радону у приміщеннях. Метою картування радонного потенціалу є виявлення радононебезпечних територій: географічних ареалів або адміністративних регіонів, виділених на підставі дослідження рівнів радону у повітрі ґрунтів [8].

<sup>1</sup> АКСЬОНОВ М.В.,  
<sup>1</sup> ПАВЛЕНКО Т.О.,  
<sup>1</sup> ФРИЗЮК М.А., <sup>2</sup> ГЕРМАН О.,  
<sup>1</sup> ФЕДОРЕНКО О.В.,  
<sup>1</sup> МИХАЙЛЕНКО О.В.

<sup>1</sup> ДУ "Інститут громадського здоров'я ім. О.М. Марзєєва НАМН України", м. Київ, Україна

<sup>2</sup> Шведська Агенція з радіаційного захисту (SSM), м. Стокгольм, Швеція

УДК 614.876 : 613.5(1-22) : 546.296

**Ключові слова:** радон у повітрі приміщень, ґрунтового повітря, природні радіонукліди.

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ УРОВНЕЙ РАДОНА  
ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПРОТИВОРАДОНОВЫХ  
МЕРОПРИЯТИЙ

<sup>1</sup>Аксенов Н.В., <sup>1</sup>Павленко Т.А., <sup>1</sup>Фризиук М.А.,  
<sup>2</sup>Герман О., <sup>1</sup>Федоренко Е.В.,  
<sup>1</sup>Михайленко А.В.

<sup>1</sup>ГУ "Институт общественного здоровья им. А.Н. Марзеева НАМН Украины", г. Киев, Украина

<sup>2</sup>Шведское Агентство по радиационной защите (SSM), г. Стокгольм, Швеция

**Цель работы:** оценка уровней радона в воздухе жилых зданий, в грунтового воздухе, а также оценка содержания естественных радионуклидов (ЕРН) в почве для выбора противорадонных мероприятий.

**Материалы и методы исследования.** Исследования включали измерения эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) радона-222 в воздухе жилых домов, а также объемной активности (ОА) радона-222 в грунтового воздухе и удельной активности естественных радионуклидов (ЕРН) в грунтах возле выбранных домов. Измерения ЭРОА радона-222 в воздухе помещений проводились методом пассивной трековой радонметрии с использованием в качестве детектора нитрат-целлюлозной пленки LR-115. Подсчет треков осуществлялся с помощью искрового счетчика.

Измерения ОА радона-222 в грунтового воздухе проводились экспрессным методом с помощью

портативного радон-монитора AlphaGUARD в полевых условиях. Для определения удельной активности ЕРН ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$ ) в почве применялся метод гамма-спектрометрии.

**Результаты.** Исследования проводились в селе Бакумовка Рокитнянского района Киевской области. Установлено, что уровни радона-222 в воздухе жилых домов превышают гигиенический норматив  $100 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$  в 71% случаев. Диапазон значений ЭРОА радона-222 составлял  $14-521 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$ , среднее арифметическое значение –  $159 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$ , среднее геометрическое –  $134 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$  при стандартном отклонении  $93 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$ . Величины ОА радона в грунтового воздухе составили  $13-32 \text{ кБк} \cdot \text{м}^{-3}$ . Удельная активность  $^{226}\text{Ra}$  составила  $10-34 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$  на поверхности грунта и  $22-37 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$  – на глубине. Таким образом, грунт, на котором расположены жилые дома, относится к грунтам с низким радонным потенциалом ( $<50 \text{ кБк} \cdot \text{м}^{-3}$ ) и низким содержанием  $^{226}\text{Ra}$  ( $<50 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$ ). Следовательно, высокие уровни радона-222 в жилых домах обусловлены их конструктивными особенностями. Для уменьшения облучения населения этого региона можно рекомендовать противорадонные меры, направленные на корректировку конструктивных характеристик зданий.

**Ключевые слова:** радон в воздухе помещений, грунтового воздух, естественные радионуклиды.

© Аксьонов М.В., Павленко Т.О., Фризиук М.А., Герман О., Федоренко О.В., Михайленко О.В. СТАТТЯ, 2017.

# TO THE ISSUE OF THE ESTIMATION OF RADON CONCENTRATIONS FOR RADON PROTECTION MEASURES

<sup>1</sup>Aksionov N., <sup>1</sup>Pavlenko T., <sup>1</sup>Fryziuk M.,  
<sup>2</sup>German O., <sup>1</sup>Fedorenko O., <sup>1</sup>Mykhailenko O.

<sup>1</sup> SI "O.M. Marzeiev Institute for Public Health, NAMSU", Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup> The Swedish Agency for Radiation Protection, Stockholm, Sweden

**Objective.** We assessed the indoor radon concentrations of residential buildings, radon concentrations in soil air, and natural radionuclides' (NORM) concentration in soil for the selection of radon protection measures.

**Materials and methods.** The measurements of the indoor equivalent equilibratory concentration of  $^{222}\text{Rn}$  (EERC) in indoor air of residential buildings,  $^{222}\text{Rn}$  concentration in soil air, and the concentration of natural radionuclides (NR) in soil near the selected buildings were included in the studies. Measurements of indoor radon-222 EERC were carried out with the help of passive track radonometry method with nitrate-cellulose film LR-115 as a detector. Calculation of the tracks was carried out with the help of spark counter. Measurements of radon-222 concentrations in soil air were carried

out by the express method with the help of portable radon monitor Alpha GUARD under field conditions. To determine the NORM ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  and  $^{40}\text{K}$ ) concentration in soil, we applied the gamma-spectrometry method.

**Results.** The studies were performed in the village of Bakumovka, Rokytno region, Kyiv region. The EERCs in the indoor air of residential buildings were established to be exceeded the hygienic standards of  $100 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$  in 71% of cases. The range of indoor EERC made  $14\text{--}521 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ , the arithmetic mean was  $159 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ , the geometric mean was  $134 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$  at a standard deviation of  $93 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ . Radon concentration values in soil air were  $13\text{--}32 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  concentrations accounted for  $10\text{--}34 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$  at soil surface and  $22\text{--}37 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$  at depth. Thus, the soil at the location of the buildings belongs to the area with a low radon risk ( $<50 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-3}$ ) and low concentration of  $^{226}\text{Ra}$  ( $<50 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ ). So, the high levels of  $^{222}\text{Rn}$  in residential buildings are due to their design features. For the reduction of the population's exposure in this region, the radon protection measures, directed on the correction of buildings' design features, may be recommended.

**Keywords:** indoor radon, soil air, NORM.

Основним підходом до картування радонового ризику є графічне відображення комбінованих геологічних даних щодо території та результатів вимірювання радону у повітрі будинків або повітрі ґрунтів [9].

**Метою роботи** є оцінка рівнів радону у повітрі житлових будівель, ґрунтовому повітрі, а також вмісту природних радіонуклідів (ПРН) у ґрунті для вибору протирадонових заходів.

**Огляд проблеми.** Радон-222 – це газ, який утворюється при радіоактивному розпаді природних радіонуклідів уранового ряду. Під час розпаду він утворює короткоіснуючі дочірні продукти розпаду (ДПР) – полоній, свинець, вісмут, які, приєднуючись до часток пилу чи вологи, утворюють радіоактивний аерозоль. Потрапляючи у легені, радіоактивний аерозоль опромінює бронхіальний епітелій. Це призводить до відносно високих доз опромінення, які спричиняють додатковий ризик захворювання на рак легенів.

Результати аналізу об'єднаних епідеміологічних досліджень у житлі, проведеного останніми роками у рамках радонового проекту ВООЗ, переконливо продемонстрували, що ризик раку легенів збільшується лінійно з довгостроковою радоною експозицією (30 років), при цьому немає свідчень наявності порогу, а ризик зростає статистично значуще навіть за помірних вмістів радо-

ну у житлових приміщеннях ( $50\text{--}100 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$ ) [2-5, 10].

За результатами цих досліджень 2015 року Міжнародна комісія з радіологічного захисту (МКРЗ) видала нові рекомендації (Публікація 126 [10]), в яких ризик від радону для бронхолегеневої системи людини майже вдвічі вищий за колишнє значення, рекомендоване у публікації 65 МКРЗ (1994) [11].

Згідно з новими європейськими стандартами безпеки [8] кожна країна повинна мати Національний план дій щодо радону, який має включати, зокрема, оцінку та картування радонових ризиків для проведення протирадонових заходів.

У концепції радонового ризику важливе значення має картування регіону. Першим кроком у створенні карт радонового ризику є збір усієї доступної інформації про геологічні та гідрологічні характеристики ґрунтів, їхні типи тощо. Далі проводяться вимірювання ЕРОА радону у повітрі будинків і ОА радону у воді. Ця інформація служить основою для планування польових досліджень з картування радону.

Наступним кроком є проведення гамма-спектрометричних вимірювань вмісту ПРН у ґрунті та ОА радону у ґрунтовому повітрі з зазначенням координат точок вимірювання за системою позиціонування GPS.

Картування рівнів радону у ґрунті застосовується з метою

прогнозування його вмісту у повітрі будівель, які плануються збудувати на конкретній ділянці, або для вибору тих чи інших протирадонових заходів для будинків, які вже експлуатуються.

Отримані дані обробляються комплексно. За результатами аналізу досліджувану територію відносять до однієї з трьох основних градацій зон ризику: високого, нормального або низького, що відображається на топографічній карті [12].

Разом з виявленням радононебезпечних зон необхідно досліджувати особливості інженерно-планувальних рішень будівель, які можуть обумовлювати високі рівні радону у повітрі приміщень навіть при розташуванні цих будівель у зонах низького радонового потенціалу [10].

**Матеріали та методи дослідження.** Дослідженнями передбачені вимірювання ЕРОА радону-222 у повітрі житлових приміщень методом пасивної трекової радонометрії, експресне вимірювання ОА радону-222 у ґрунтовому повітрі, гамма-спектрометричні вимірювання природних радіонуклідів (ПРН) ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{226}\text{Th}$  та  $^{40}\text{K}$ ) у ґрунтах.

**Вимірювання ЕРОА радону-222** у повітрі приміщень проводилися відповідно до вимог "Норм радіаційної безпеки України (НРБУ-97)". Методику вимірювань ЕРОА радону-222 у повітрі приміщень затверджено головним державним санітарним лікарем

України Постановою № 63 від 08.08.2000 року. Застосовувався метод пасивної трекової радонометрії з використанням в якості детектора нітрат-целюлозної плівки LR-115 (Kodak).

Вимірювання проводилися в опалювальний період. Час експонування радонових накопичувачів становив не менше 30 діб.

При встановленні радонових накопичувачів у будинку на кожен прилад заповнювався сертифікат, до якого заносилися дані щодо дат експонування, характеристик будівлі тощо.

По завершенні експонування детектори зазнавали хімічної обробки, після якої визначали кількість треків (щільність) методом іскрового підрахунку за допомогою іскрового лічильника (АИСТ).

**Вимірювання ОА радону-222 ( $^{222}\text{Rn}$ ) у ґрунтовому повітрі** були здійснені експресним методом за допомогою портативного радон-монітора AlphaGUARD RQ2000 PRO RnTn у польових умовах, безпосередньо на місці обраних точок вимірювання.

Принцип методу полягає у тому, що ґрунтове повітря через фільтри від вологи та дочірніх продуктів розпаду (ДПР) радону нагнітається до іонізаційної камери радон-монітора за допомогою насоса шляхом активного прокачування через забитий у ґрунт на глибину 70-80 см пробовідбірник.

Після прокачування 1 л ґрунтового повітря через іонізаційну камеру (детектор) починається процес вимірювання. Радон та його ДПР, що потрапили до камери, при розпаді випромінюють альфа-частинки, які створюють іонізаційний струм всередині камери. Імпульси напруги іонізаційного струму реєструються, посилюються і вимірюються: розраховується їхня площа та розподіляється за енергіями каналами аналізатора. На основі отриманих спектрів розраховується ОА радону, яка усереднюється за час циклу вимірювання. Величина ОА радону відображається на дисплеї. Усі отримані дані фіксуються у пам'яті радон-монітора.

Для вимірювання питомої активності ПРН ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ ) у ґрунті застосовувався метод гамма-спектрометрії з використанням портативного дозиметра (гамма-спектрометра) identiFINDER2-NGH (FLIR, США).

Метод ґрунтується на залежності інтенсивності гамма-випромінювання від питомої активності радіоактивного еле-

мента у зразку. У результаті взаємодії гамма-квантів з речовиною на виході детектора виникають електричні заряди, величина яких пропорційна енергії, втраченій гамма-квантом у детекторі. Амплітудний розподіл сигналів відповідає спектру випромінювань.

Гамма-спектрометричне вимірювання зразків відбувається у три етапи: одержання амплітудного розподілу випромінювання зразка за енергією (запис спектра); виявлення статистично значущих піків у спектрі та якісна ідентифікація радіонуклідів за цими піками; розрахунок активності радіонуклідів.

Для визначення питомої активності ПРН гамма-спектрометр встановлювався на поверхню ґрунту на час вимірювання 300-500 с. Наступне вимірювання здійснювалося на глибині 70-80 см у ґрунті в ямі. Це дозволило зробити поправку на внесені з добривами ПРН, порівнявши їх з відповідними значеннями на поверхні ґрунту. Отримані результати вимірювань питомої активності ПРН на глибині 70-80 см перераховувалися з поправкою на  $2\pi$  геометрію з урахуванням калібрувальних факторів.

Математична обробка передбачала розрахунок первинних статистичних показників (дескриптивна статистика). Основна частина математичної обробки виконувалася з застосуванням стандартного статистичного пакета "STATISTICA 10.0".

**Результати та обговорення.** Дослідження проводилися у

селі Бакумівка Рокитнянського району Київської області.

На першому етапі роботи були проведені вимірювання ЕРОА радону-222 у повітрі будинків (79 вимірювань).

ЕРОА радону-222 у повітрі приміщень житлових будинків у вигляді частотного розподілу по всьому масиву даних представлено на рисунку 1.

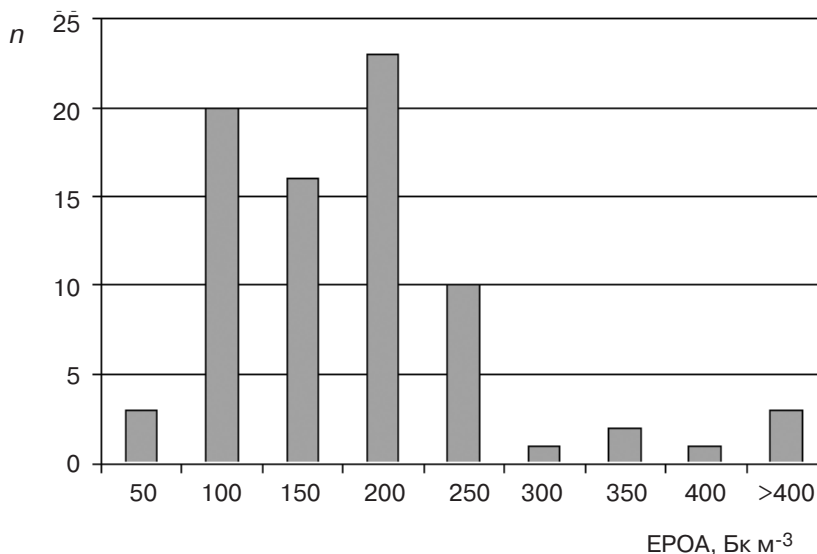
Діапазон значень ЕРОА радону-222 становив від  $14 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$  до  $521 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$ , середнє арифметичне значення ЕРОА склало  $159 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$ , середнє геометричне –  $134 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$  за стандартного відхилення  $93 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$ .

Загалом у даному населеному пункті зафіксовано перевищення гігієнічного нормативу для житлових будинків ( $100 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$ ) у 71% випадків. Крім того, встановлено, що у будівлях зустрічається перевищення рівня  $200 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$  у 22% випадків та рівня понад  $400 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$  – у 5% випадків.

На другому етапі дослідження за даними аналізу результатів вимірювань було обрано дві будівлі (об'єкти № 1 та № 2), в яких рівні ЕРОА радону-222 перевищують гігієнічний норматив у 2 рази ( $223 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$  та  $200 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$  відповідно). Поблизу цих об'єктів в обраних точках проведено вимірювання ОА радону-222 у ґрунтовому повітрі та вмісту ПРН у ґрунті для визначення радононебезпечності прилеглої території.

Паралельно вимірюванням, за згодою власників будинків, було проведено аналіз інженерно-планувальних рішень будинків,

Рисунок 1  
**Частотний розподіл ЕРОА радону-222 у повітрі житлових будинків с. Бакумівка Рокитнянського району Київської області**



Примітка: n — кількість будинків.



які є типовими для існуючої забудови Київщини.

**Основні характеристики об'єктів дослідження.** Об'єкт № 1 являє собою 4-кімнатний будинок з кухнею, збудований у 60-ті роки минулого століття з дерева та обкладений червоною цеглою по усьому фасаду. Цеглу виготовлено з місцевих глин. Глибина підпільного простору різна в усіх частинах будинку – від 25 см до 75 см. Дерев'яна підлога не ізолювана і має безліч щілин. Підпільний простір не вентилюється. Вікна відкриваються лише у деяких кімнатах. Для опалення використовується газовий котел. У будівлі немає систем водопостачання та каналізації.

Об'єкт № 2 являє собою 5-кімнатний будинок, збудований у 70-ті роки минулого століття з червоної цегли, виготовленої з місцевих глин. Фундамент збудований з гранітних каменів із місцевого кар'єру і має глибину близько 100 см. У фундаменті відсутні вентиляційні отвори, тобто немає провітрювання підпільного простору. Будинок опалюється газом. Хоча є стара пічка, але нею більше не користуються, і димар закритий. Дерев'яна підлога не ізолювана і має щілини між дошками. Вікна наглухо зачинені навіть у літню пору і ніколи не відкриваються. У будівлі немає систем водопостачання та каналізації.

На об'єкті № 1 середнє значення ОА радону-222 у ґрунтовому повітрі склало  $22 \text{ кБк} \cdot \text{м}^{-3}$  (діапазон значень  $13\text{--}32 \text{ кБк} \cdot \text{м}^{-3}$ ) за стандартного відхилення  $7 \text{ кБк} \cdot \text{м}^{-3}$ , на об'єкті № 2 –  $18 \text{ кБк} \cdot \text{м}^{-3}$  (діапазон значень  $13\text{--}20 \text{ кБк} \cdot \text{м}^{-3}$ ) і  $4 \text{ кБк} \cdot \text{м}^{-3}$  відповідно.

Графічне відображення результатів дескриптивної статистики щодо рівнів вмісту радону-222 у повітрі ґрунту на двох об'єктах надано на рисунку 2.

Вимірювання питомої активності  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  та  $^{40}\text{K}$  здійснювались у тих точках, де проводилися дослідження ОА радону-222 у ґрунтовому повітрі на поверхні ґрунту і на глибині 70–80 см.

Встановлено, що значення питомої активності  $^{226}\text{Ra}$  у ґрунті варіюють від  $10 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$  до  $34 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$  (на поверхні) та від  $22 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$  до  $37 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$  (на глибині).

Загалом у с. Бакумівка у середньому питома активність ПРН у ґрунті (на поверхні та на глибині) становила відповідно за  $^{226}\text{Ra}$  –  $23 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$  і  $29 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$ ,  $^{232}\text{Th}$  –  $36 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$  і  $41 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$  та  $^{40}\text{K}$  –  $550 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$  і  $604 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$ .

Виявилось, що розподіл ПРН у

ґрунті практично однаковий і на поверхні, і на глибині. Відсотковий внесок за величиною вмісту кожного радіонукліда у ґрунті представлено на рисунку 3.

Як видно з рисунка 3, найбільша частка за питомою активністю серед усіх ПРН припадає на  $^{40}\text{K}$  (90%).

Максимальне значення питомої активності  $^{40}\text{K}$  у ґрунті становить  $775 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$  (об'єкт № 2, точка на поверхні ґрунту). Максимальне значення активності  $^{226}\text{Ra}$  у ґрунті, продуктом розпаду якого є радон-222, становить  $37 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$  (об'єкт № 1, точка на глибині ґрунту).

Однак величини питомої активності ПРН у ґрунті на поверхні дещо менші, ніж на глибині: за  $^{226}\text{Ra}$  – на 21%,  $^{232}\text{Th}$  – 10%,  $^{40}\text{K}$  – 9%. На рисунку 4 представлено для порівняння усереднений вміст ПРН у ґрунті на поверхні та на глибині.

Співвідношення між питомою активністю ПРН на поверхні та на глибині за  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  та  $^{40}\text{K}$  становлять 0,79, 0,90 та 0,91.

В Україні відсутня класифікація ґрунтів за радононебезпечністю. Однак за міжнародною

ляції підпільного простору, наявність щілин у підлозі, наглухо зачинені вікна (відсутність провітрювання кімнат) тощо.

Таким чином, для зменшення дозового навантаження від радону-222 населення дослідженого регіону можна рекомендувати проведення досить простих протирадонових заходів, а саме: герметизацію підлоги, монтаж віддушин у підпільному просторі або встановлення там примусової вентиляції, встановлення вікон з режимом провітрювання тощо.

### Висновки

1. У досліджених житлових будинках у с. Бакумівка Рокитнянського району Київської області зафіксовано перевищення гігієнічного нормативу  $100 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$  щодо ЕРОА радону-222 у повітрі приміщень у 71% випадків, у тому числі перевищення рівня  $200 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$  – у 22% випадків та рівня понад  $400 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$  – у 5% випадків.

2. ґрунт, на якому розташовані досліджені будівлі, має низький радоновий потенціал (ОА радону-222 у повітрі ґрунту  $<50 \text{ кБк} \cdot \text{м}^{-3}$ ). Значення питомої активності  $^{226}\text{Ra}$  становлять 10–

Рисунок 2

Діапазон значень ОА радону-222 у ґрунтовому повітрі біля досліджених будинків

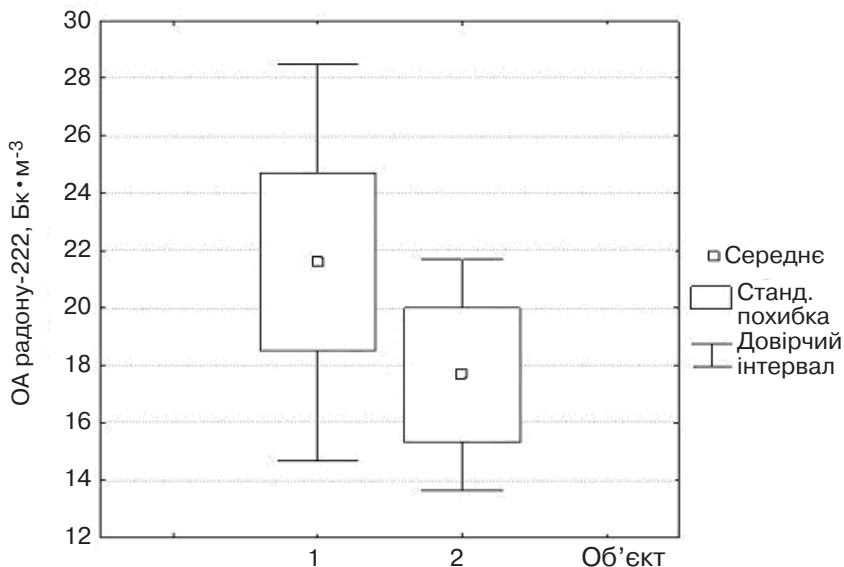
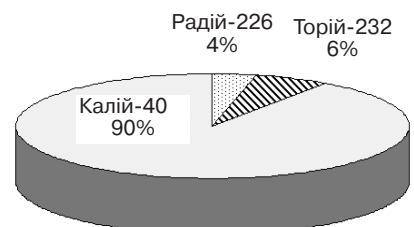


Рисунок 3

Структура вмісту ПРН  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  та  $^{40}\text{K}$  у ґрунті



34 Бк·кг<sup>-1</sup> на поверхні ґрунту та 22-37 Бк·кг<sup>-1</sup> – на глибині.

3. Високі рівні радону-222 у повітрі досліджених будівель обумовлені конструктивними особливостями.

4. Для зменшення опромінення населення дослідженого регіону від радону можна рекомендувати протирадонові заходи, спрямовані на коректування конструктивних характеристик будівель.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. United Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Exposure from Natural Radiation Sources. UNSCEAR 2000 Report : Annex B. New York : United Nations, 2000. 74 p.

2. United Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation . Source-to-effects Assessment for Radon in Homes and Workplaces. UNSCEAR 2006 Report : Annex E. New York : United Nations, 2009. 138 p.

3. Darby S., Hill D., Auvinen A. et al. Radon in Homes and Risk of Lung Cancer: Collaborative Analysis of Individual Data from 13 European Case-Control Studies. *British Journal of Medicine*, 2005. Vol. 330. 223 p.

4. Lubin J.H., Wang Z.Y., Boice J.D. et al. Risk of Lung Cancer and Residential Radon in China: Pooled Results of Two Studies. *International Journal of Cancer*, 2004. Vol. 109. 132-137.

5. Darby S., Hill D., Auvinen A. et al. Residential Radon and Lung Cancer – Detailed Results of a Collaborative Analysis of Individual Data on 7148 Persons with Lung Cancer and 14208 Persons without Lung Cancer from 13 Epidemiological Studies in Europe. *Scand. J. Work Environ. Health*, 2006. Vol. 32 (1). 1-84.

6. Zeeb H., Shannoun F. (eds.).

WHO Handbook on Indoor Radon: a Public Health Perspective. WHO, 2009. 94 p.

7. Clavensjo B., Akerblom G. Radon Book. Measures against Radon. Stockholm : Formas (BFR), SSI. 1994. 131 p.

8. 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*. 17.1.2014. 73 p. available at : <http://eur-lex.europa.eu/lexuriserv/lexuriserv.do?uri=oj:l:2014:013:0001:0073:en:pdf>.

9. Kemski J., Klingel R., Siehl A., Valdivia-Manchego M. From Radon Hazard to Risk Prediction — Based on Geological Maps, Soil Gas and Indoor Measurements in Germany. *Environ. Geol.* 2009. Vol. 56. 1269-1279.

10. Radiological Protection against Radon Exposure. ICRP Publication 126. *Annals of the ICRP*. 2014. Vol. 43 (3). 73 p.

11. Protection Against Radon-222 at Home and at Work. ICRP Publication 65. *Annals of the ICRP*. 1994. Vol. 23 (2). 78 p.

12. Sundin G., Maxe L., Leng L.-O. Regional цєрвєкнєг ав grundvattenkemi. Utvєrdering avdelprogram. SGU-rapport 2014:23. Stockholm, 2014. 54 p.

#### REFERENCES

1. United Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Exposure from Natural Radiation Sources. UNSCEAR 2000 Report : Annex B. New York : United Nations; 2000 : 74 p.

2. United Scientific Committee

on the Effects of Atomic Radiation . Source-to-effects Assessment for Radon in Homes and Workplaces. UNSCEAR 2006 Report : Annex E. New York : United Nations ; 2009 : 138 p.

3. Darby S., Hill D., Auvinen A. et al. Radon in Homes and Risk of Lung Cancer: Collaborative Analysis of Individual Data from 13 European Case-Control Studies. *British Journal of Medicine*. 2005 ; 330 : 223 p.

4. Lubin J.H., Wang Z.Y., Boice J.D. et al. Risk of Lung Cancer and Residential Radon in China: Pooled Results of Two Studies. *International Journal of Cancer*. 2004 ; 109 : 132-137.

5. Darby S., Hill D., Auvinen A. et al. Residential Radon and Lung Cancer – Detailed Results of a Collaborative Analysis of Individual Data on 7148 Persons with Lung Cancer and 14208 Persons without Lung Cancer from 13 Epidemiological Studies in Europe. *Scand. J. Work Environ. Health*. 2006 ; 32 (1) : 1-84.

6. Zeeb H. and Shannoun F. (eds.). WHO Handbook on Indoor Radon: a Public Health Perspective. WHO ; 2009 : 94 p.

7. Clavensjo B. and Akerblom G. Radon Book. Measures against Radon. Stockholm : Formas (BFR), SSI; 1994 : 131 p.

8. 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*. 17.1.2014 : 73 p. available at : <http://eur-lex.europa.eu/lexuriserv/lexuriserv.do?uri=oj:l:2014:013:0001:0073:en:pdf>.

9. Kemski J., Klingel R., Siehl A. and Valdivia-Manchego M. From Radon Hazard to Risk Prediction — Based on Geological Maps, Soil Gas and Indoor Measurements in Germany. *Environ. Geol.* 2009 ; 56 : 1269-1279.

10. Radiological Protection against Radon Exposure. ICRP Publication 126. *Annals of the ICRP*. 2014 ; 43 (3) ; 73 p.

11. Protection Against Radon-222 at Home and at Work. ICRP Publication 65. *Annals of the ICRP*. 1994 ; 23 (2) : 78 p.

12. Sundin G., Maxe L. and Leng L.-O. Regional цєрвєкнєг ав grundvattenkemi. Utvєrdering avdelprogram. SGU-rapport 2014:23. Stockholm ; 2014 : 54 p.

Надійшла до редакції 15.06.2017

Рисунок 4  
Питома активність <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th та <sup>40</sup>K у ґрунті  
с. Бакумівка Рокитнянського району Київської області

