

З.М. Шелест, к.б.н., доц.
М.Б. Корбут, к.т.н., доц.
О.Л. Герасимчук, к.п.н., доц.
С.В. Кальчук, к.т.н., доц.

Державний університет «Житомирська політехніка»

Оцінка радіаційного фону в житлових приміщеннях, зумовленого техногенно підсиленими джерелами природного походження

Природний радіаційний фон є важливим абіотичним фактором. Нині опромінення від природних джерел посилене техногенною компонентою. Зростання чисельності населення стимулює будівництво, для якого використовують природну мінеральну сировину. Уран та його дочірні радіонукліди, що містяться у будівельних матеріалах, підсилюють вплив природних джерел радіації на людину. Радон є головним дозоутворюючим радіонуклідом. Його вимірювання є складним завданням. Серед продуктів поділу радону є гамма-випромінювачі, які разом з іншими природними радіонуклідами формують радіаційний фон житлових приміщень. У роботі проаналізовано особливості формування потужності амбієнтного еквіваленту дози гамма-опромінення в повітрі житлових будинків у місті Житомирі. Встановлено, що рівень потужності еквівалентної дози в житлових приміщеннях залежить від висоти споруди та виду будівельних матеріалів. Виявлено, що найвищий рівень гамма-фону фіксується на перших поверхах панельних будинків. Він був на 16 % вищий, ніж на перших поверхах цегляних будинків, на 20 % вище, ніж на других та на 25 % вище, ніж на третіх поверхах панельних будинків. Різниця статистично достовірна. Також показано, що є тренд до збільшення гамма-фону у більш сучасних будинках порівняно зі старішими.

Ключові слова: *природний радіаційний фон; техногенно-підсилений радіаційний фон; радіоактивні ряди; радон; потужність амбієнтного еквіваленту дози гамма-опромінення; мінеральна будівельна сировина; радіоактивність житлових приміщень.*

Актуальність теми. Природний радіаційний фон – важлива компонента абіотичного середовища, у якому існують і еволюціонують всі живі організми. Сучасна цивілізація додала до природних додаткові техногенно-підсилені компоненти – глобальні випадіння, спалювання викопного палива, ядерну та теплову енергетику, медичні променеві технології, індустрію будівельних матеріалів, інтенсивне аграрне виробництво, наземний і повітряний транспорт тощо. За оцінками Програми ООН з навколишнього середовища, серед загальносвітових джерел радіоактивного опромінення людини 15,7 % забезпечує радіоактивність ґрунтів, 12,8 % – космічне випромінювання, 9,5 % – надходить з продуктами харчування, 20 % – спричиняють медичні процедури. Але головним природним джерелом внутрішнього опромінення людини в світі є радон – 42,6 % від середньої річної ефективної дози від природних та техногенно-підсиленних джерел [1]. За сучасними оцінками пересічний громадянин України щорічно отримує 63 % дози опромінення від різних штучних та природних джерел за рахунок радону у повітрі житлових приміщень, 3 % за рахунок радіоактивності будівельних матеріалів, 13 % формує медичне опромінення [2]. Ситуація в нашій державі дещо відрізняється від загальносвітової ще і за рахунок того, що суттєвий внесок у опромінення від природних та техногенно-підсиленних джерел роблять наслідки радіоактивного забруднення довкілля через аварію на Чорнобильській АЕС (3 % – для України, 0,07 % – в середньому у світі) [1–2]. Таким чином, радон у приміщеннях є основним компонентом, що формує ефективні дози опромінення населення як в Україні, так і у світі в цілому.

Радон входить до ланцюга перетворень радіонуклідів із радіоактивних родин (рядів), головним чином, родин радію та торію. За своїми фізичними особливостями, цей радіоактивний газ накопичується в приміщеннях, виділяючись з ґрунту та будівельних матеріалів, які містять природні радіонукліди. Другим за значенням джерелом у житлових приміщеннях є іонізуюче випромінювання від самих будівельних конструкцій. Обидва ці компоненти пов'язані між собою і виникають через наявність природних радіонуклідів у сировині, з якої виробляються будівельні матеріали. Житомирська область розташована у межах Українського кристалічного щита. Сировина для будівельної промисловості характеризується геологічними породами, що містять радіоактивні мінерали, а вміст урану і торію в них коливається в десятки разів, залежно від мінералогічних особливостей [3]. Наша держава доволі урбанізована країна [4–5]. Загальний міський житловий фонд України становить 624,9 млн м², а сільський – в 1,6 раза менше. В містах проживає 69,7 % населення, а в селах – 30,3 %. Міський житловий фонд у Житомирській області – 16557 тис. м², що становить 49 % від всього житлового фонду. Міське населення складає 59,6 % від населення області, або 707 193 особи (середньорічна чисельність за 2021 рік). Ця ситуація практично не змінюється з

початку 2000-х років. Для проживання такої кількості людей потрібні відповідні побутові умови, що є стимулом для розвитку будівельної галузі. Оцінка радіаційної ситуації в житлових приміщеннях є актуальним аспектом радіаційної безпеки та створення оптимальних умов для проживання населення, особливо в регіонах, що постраждали від радіоактивного забруднення довкілля.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, на які спираються автори. Відповідно до рекомендацій Міжнародної комісії з радіаційного захисту (МКРЗ) та Наукового комітету з дії атомної радіації ООН (НКДАР ООН) та досліджень вітчизняних науковців [1, 2, 6–10], середні значення сумарної річної ефективної дози опромінення населення за рахунок техногенно-підсилених джерел природного походження в Україні визначається сумою трьох складових:

$$H_{\text{сум.}} = H_{Rn} + H_{\text{пв}} + H_{\text{зов.}}$$

де $H_{\text{сум.}}$ – сумарна еквівалентна доза; H_{Rn} – внутрішня доза за рахунок ізотопів радону в повітрі; $H_{\text{пв}}$ – внутрішня доза за рахунок природних радіонуклідів у питній воді; $H_{\text{зов.}}$ – зовнішня доза за опромінення від будівельних матеріалів.

Всі інші складові природного радіаційного фону значно нижчі і суттєво не впливають на результат санітарно-гігієнічної оцінки. Всі складові, які враховуються у розрахунках сумарної річної ефективної дози, тісно пов'язані між собою походженням і особливостями поширення їх джерел у навколишньому середовищі.

Оцінка вмісту радону у приміщеннях – це методично досить складна процедура, яка вимагає спеціального обладнання. Але кількість безпосередніх вимірювань цього радіоактивного газу за останні роки суттєво зросла, особливо у соціально значущих будівлях. У дослідженнях, які проводили М.А. Фризюк та інші в дошкільних та шкільних навчальних закладах у м. Кропивницький, встановлено перевищення санітарно-гігієнічних нормативів [11]. Методом пасивної трекової діагностики за допомогою 250 каліброваних радонових накопичувачів Т.О. Павленко та співавтори встановили, що на перших поверхах дошкільних дитячих закладів Запорізької області (понад 50 % ДДЗ) дози опромінення від радону вищі, ніж на другому [12]. Дослідження також виявили випадки перевищення санітарно-гігієнічних регламентів. Дослідження Т.О. Павленко та інших, проведені в житлових будинках різних областей України, виявили перевищення діючих в Україні нормативів (100 Бк/м³ в одиницях еквівалентної рівноважної об'ємної активності радону) у 21 % обстежених будинків, а рекомендований МАГАТЕ референтний рівень (300 Бк/м³) перевищувався в середньому у 16 % випадків, коливаючись від 0,1 до 43 % [13]. В оглядовій публікації автори [14], узагальнюючи результати численних досліджень, наводять інформацію, що в Запорізькій області в середньому 25 % житлових будівель не відповідають санітарно-гігієнічним нормативам щодо вмісту радону у повітрі. За рахунок цього радіонукліда формується 76 % середньорічної ефективної дози опромінення населення області за рахунок природної складової. Для оцінки доз від радону використовувалися поєднання безпосередніх вимірювань та розрахункових методів [6, 8, 13, 15]. Багаторічні дослідження, які проводили І.П. Лось та Т.О. Павленко, дозволили зробити узагальнення щодо зменшення середньозважених ефективних доз опромінення за рахунок радону для населення України за останні десятиліття з 3,8 мЗв/рік до 2,4 мЗв/рік [6]. Але встановлено також, що приблизно 5 % населення України проживають в умовах, де значення ефективної дози перевищує 10 мЗв/рік.

Радіоактивність підземних джерел питної води пов'язана з розчиненням у ній радоном, попередником радієм (наприклад, $^{226}\text{Ra} \rightarrow ^{222}\text{Rn}$) та сумою активності інших ізотопів, похідних урану. Поверхневі джерела додатково забруднюються техногенними радіонуклідами різного походження. За твердженням фахівців Інституту гігієни та медичної екології ім. О.М. Марзєєва АМН України, виконання міжнародних рекомендацій та чинних нормативів щодо визначення радіоактивності природних вод накладає жорсткі вимоги до чутливості методів та рівня спеціалізованого обладнання, що зружує можливість проведення моніторингу [16, 17]. Дослідження, які проводили Т.О. Павленко та І.П. Лось, показали підвищені рівні радію, урану і радону у воді з артезіанських свердловин, розташованих в межах Українського кристалічного щита [6, 8]. Тривалі спостереження, які проводилися під керівництвом М.Г. Бузинного [16, 18–19], показали, що в Київській, Житомирській та Вінницькій областях вміст природних радіонуклідів у системі водопостачання на основі артезіанських свердловин становить відповідно за ^{222}Rn 24,3; 60,5; 21,1 Бк/л, за ^{226}Ra 0,04; 0,32; 0,02 Бк/л, за ураном 0,12; 0,27; 0,43 Бк/л. Визначення вмісту радіонуклідів у воді проводили з використанням рідких сцинтиляторів. Питома активність ^{222}Rn у воді на території Житомирської області коливалася від 0,4 до 388 Бк/л. В цілому по Україні за період 2003–2021 років величина питомої активності радону у пробах води з артезіанських свердловин не перевищувала 5 Бк/л у 46 % випадків; для 30 % випадків вона коливалася від 10 до 20 Бк/л; у 13 % випадків – від 30 до 80 Бк/л. Загалом у 11 % випадків вміст ^{222}Rn у зразках питної води зі свердловин перевищував державні нормативи (100 Бк/л). Найбільші значення питомої активності ^{222}Rn були виявлені на території Вінницької, Донецької, Житомирської, Київської, Кіровоградської, Миколаївської, Херсонської та Черкаської областей. Авторі пов'язують це із особливостями гірських порід (мінеральний склад, тріщинуватість, хімічні властивості тощо), в яких розташовані водоносні горизонти.

Економічно оптимальним є використання для житлового і громадського будівництва матеріалів місцевого походження. На прикладі населених пунктів Київської області встановлено, що дози опромінення від радону в житлових приміщеннях тим вище, чим ближче регіон розташований до Українського кристалічного щита [6]. Це дозволяє припустити, що будівельні матеріали із сировини, видобутої у таких геологічних умовах, будуть більш радіоактивними, ніж у інших. Природні радіонукліди, що містяться у будівельних матеріалах, спричиняють не лише дози внутрішнього опромінення (виділення радону у повітря приміщень), але і дози зовнішнього опромінення. Останні формуються за рахунок випромінювання, що виникає в стані вікової рівноваги від дочірніх радіонуклідів з родин радію ($^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb}$) і торію ($^{232}\text{Th} \rightarrow ^{208}\text{Pb}$) та від довгоживучого радіоактивного ізотопу калію (^{40}K). Для оцінки рівня радіоактивного забруднення будівельних матеріалів, відповідно до чинних в Україні нормативів, визначають питому ефективну активність природних радіонуклідів ^{226}Ra , ^{232}Th торію і калію:

$$A_{\text{еф.}} = A_{\text{Ra}} + 1,31A_{\text{Th}} + 0,08A_{\text{K}},$$

де A_{Ra} – питома активність ^{226}Ra , A_{Th} – питома активність ^{232}Th , A_{K} – питома активність ^{40}K .

Визначення питомої активності будівельних матеріалів проводиться спектрометричним методом з подрібненням зразків та іншими більш складними методами [20–25]. Отримані дані свідчать про високу варіабельність концентрації природних радіонуклідів у будівельній сировині. Радіоактивність гірських порід вулканічного походження (граніт, пемза, туф) вища, ніж осадових та метаморфічних (вапняки, мармур, гіпсовий камінь). Як вітчизняні, так і закордонні дослідники не лише оцінювали різні матеріали з точки зору радіаційної безпеки, але і пропонували технологічні шляхи, направлені на зниження радіоактивності будівельної сировини та проводили оцінку дозового навантаження на працівників кар'єрів і мешканців будинків. Виробничий контроль та результати наукових досліджень дозволяють забезпечити поточний контроль за станом радіаційної безпеки на будівництві. В той же час методичні рекомендації, які дозволили виявити в Україні щебеневі кар'єри із сировиною з підвищеним вмістом природних радіонуклідів, були впроваджені лише у 1989 році. Призупинення використання щебеневої сировини для житлового і громадського будівництва стосувалося Дніпропетровської (Токівський, Постепнянський, Мар'їнський, Усть-Кам'янський кар'єри), Полтавської (Орліковський кар'єр) та Житомирської (Березівський кар'єр) областей [7]. Відповідно до узагальнених даних, наведених у доповіді В.В. Швеця та співавторів [23], найвищу ефективну питому активність серед вітчизняної будівельної сировини мають щебінь (223–600 Бк/кг) та гранітний відсів (290–300 Бк/кг). Високу варіабельність показника демонструють пісок (68–400 Бк/кг) і важкий бетон (72–300 Бк/кг). Автори вказують на те, що мінеральна сировина, видобута в межах Українського кристалічного щита, характеризується підвищеною радіоактивністю.

Оцінка зовнішнього опромінення проводилася через вимірювання поглиненої дози у повітрі приміщень за допомогою різних типів дозиметрів. Багаторічний контроль гамма-фону на території Запорізької області показав, що усереднені величини потужності поглиненої дози в приміщеннях становлять 0,122 мкЗв/год, а на відкритій місцевості – 0,113 мкЗв/год [14]. Для вимірювання радіаційного фону у м. Кропивницький використовувалися не лише компактні дозиметри, але і бездротові датчики [26]. Такий детальний моніторинг виявив в окремих районах міста підвищений рівень радіаційного фону (0,72 ± 0,08 мкЗв/год і 1,54 мкЗв/год), який автори пов'язують із ризиками розвитку онкологічних патологій. У Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту був проведений детальний моніторинг студентського містечка [27]. Дозиметричні обстеження виявили підвищений радіаційний фон біля гранітних декоративних елементів (0,30; 0,33 і 0,41 мкЗв/год). Крім того, було виявлено, що потужність дози іонізуючого випромінювання в старих будівлях університету вища, ніж у нових. Узагальнені дані про вимірювання поглинутої дози в житлових будівлях ряду міст України [23] засвідчили, що рівень гамма-випромінювання в панельних і бетонних будівлях (за типом матеріалу стін) в 2–3 рази перевищує таку у будинках зі шлакоблоків, керамічної та силікатної цегли та дерева. В панельних будинках показники коливалися в межах 0,10–0,51 мкГр/год (середнє – 0,29 мкГр/год), а в бетонних – 0,13–0,33 мкГр/год (середнє 0,24 мкГр/год). Допустиме значення не має перевищувати 0,26 мкГр/год. Радіаційний фон у житлових будинках міст Київ, Харків, Дніпро і Полтава були вищими, ніж у містах Львів, Хмельницький, Черкаси і Вінниця.

Таким чином, узагальнюючи результати досліджень різних авторів, необхідно зауважити, що пряме визначення радону та інших природних радіонуклідів у повітрі, воді та будівельних матеріалах потребує спеціального складного обладнання та відповідних методик, доступних у спеціалізованих лабораторіях. В той же час природні радіонукліди, що містяться у мінеральній сировині, формують також у експозиційну дозу зовнішнього випромінювання, вимірювання у повітрі приміщень і на місцевості не несе особливих технічних складнощів і може бути виконане за допомогою різних дозиметрів-радіометрів. Такі дослідження проводилися в ряді міст України. В місті Житомирі на системній основі вимірювання не проводилися. Враховуючи методичні проблеми прямого вимірювання радону у приміщеннях і його фізичний зв'язок із радіонуклідами радіоактивних рядів, визначення рівня іонізуючого випромінювання може надати первинну загальну інформацію щодо стану радіаційної безпеки.

Метою статті є оцінка потужності амбієнтного еквіваленту дози гамма-опромінення в повітрі житлових приміщень міста Житомира залежно від типу будинків (поверховість), виду будівельних матеріалів та часу спорудження будівлі.

Викладення основного матеріалу. Методика проведення досліджень базується на радіаційно-гігієнічних рекомендаціях, затверджених Міністерством охорони здоров'я України [28]. Радіоактивність у житлових приміщеннях оцінювали за величиною потужності поглиненої в повітрі дози гамма-випромінювання [29]. Вимірювання проводили за допомогою побутового дозиметра-радіометра МКС-05 «ТЕРРА-П» з детектором типу лічильника Гейгера – Мюллера, який відповідно до інструкції пройшов калібрування на еталонних джерелах при випуску з виробництва і повірки не потребує. Прилад відкалібрований для вимірювання потужності амбієнтного еквівалента дози у зівертах з коефіцієнтом 1 по відношенню до одиниць вимірювання поглиненої дози. Потужність дози випромінювання вимірювали в трьох точках на висоті 1 м від підлоги площадок спільного користування (початок сходів першого, другого і третього поверхів) в трьох під'їздах кожного будинку. Обстеження радіаційної ситуації проводили в 17 панельних та 14 цегляних будинках житлового фонду м. Житомира. Будівлі різного віку забудови, розташовані у різних районах міста і відбиралися рандомно. Результати дослідження обраховувалися методами математичної статистики за допомогою пакета прикладних програм Microsoft Excel. Достовірність виявлених відмінностей оцінювалася за допомогою дисперсійного аналізу із застосуванням критерію Фішера з рівнем довірчої ймовірності 0,95 [30]. Результати вимірювання потужності дози гамма-випромінювання у повітрі житлових приміщень наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Результати визначення потужності дози гамма-опромінення в повітрі житлових приміщень

№ з/п	Рік будівництва	Потужність дози, мкЗв/год		
		1 поверх	2 поверх	3 поверх
Цегляні будинки				
1	1900	0,131 ±0,01	0,127 ±0,01	0,139 ±0,02
2	1940	0,102 ±0,01	0,114 ±0,01	0,112 ±0,01
3	1940	0,131 ±0,01	0,114 ±0,01	0,107 ±0,01
4	1946	0,111 ±0,01	0,106 ±0,01	0,106 ±0,01
5	1960	0,139 ±0,04	0,137 ±0,04	0,111 ±0,01
6	1975	0,117 ±0,01	0,122 ±0,01	0,120 ±0,01
7	1986	0,160 ±0,01	0,150 ±0,01	0,140 ±0,03
8	1986	0,118 ±0,01	0,101 ±0,01	0,090 ±0,01
9	1987	0,137 ±0,01	0,147 ±0,04	0,128 ±0,01
10	1988	0,140 ±0,01	0,151 ±0,03	0,139 ±0,02
11	1989	0,136 ±0,02	0,133 ±0,01	0,117 ±0,01
12	1998	0,102 ±0,03	0,116 ±0,01	0,106 ±0,01
13	2000	0,122 ±0,03	0,130 ±0,01	0,134 ±0,01
14	2005	0,164 ±0,01	0,166 ±0,02	0,143 ±0,01
Панельні будинки				
1	1966	0,168 ±0,01	0,187 ±0,02	0,150 ±0,02
2	1968	0,148 ±0,02	0,129 ±0,01	0,119 ±0,01
3	1968	0,149 ±0,03	0,124 ±0,01	0,123 ±0,01
4	1968	0,148 ±0,02	0,130 ±0,01	0,117 ±0,01
5	1970	0,152 ±0,01	0,128 ±0,01	0,121 ±0,01
6	1970	0,156 ±0,01	0,121 ±0,01	0,120 ±0,02
7	1970	0,151 ±0,01	0,117 ±0,01	0,120 ±0,02
8	1970	0,152 ±0,02	0,122 ±0,01	0,119 ±0,01
9	1972	0,152 ±0,03	0,118 ±0,01	0,113 ±0,01
10	1975	0,143 ±0,01	0,118 ±0,01	0,111 ±0,01
11	1975	0,147 ±0,02	0,114 ±0,01	0,112 ±0,01
12	1980	0,144 ±0,01	0,121 ±0,01	0,113 ±0,01
13	1980	0,149 ±0,01	0,118 ±0,01	0,110 ±0,01
14	1980	0,152 ±0,02	0,111 ±0,01	0,117 ±0,02
15	1980	0,149 ±0,01	0,113 ±0,01	0,108 ±0,01
16	1980	0,144 ±0,01	0,121 ±0,01	0,114 ±0,01
17	1989	0,150 ±0,01	0,141 ±0,02	0,149 ±0,01

Дослідження продемонстрували значну варіабельність потужності фонового радіоактивного випромінювання в житлових будинках. Величина еквівалентної дози в місцях спільного користування коливається від $0,09 \pm 0,01$ мкЗв/год до $0,187 \pm 0,01$ мкЗв/год. В цегляних будинках варіабельність більша,

ніж в панельних. Коливання показника становлять, відповідно від $0,09 \pm 0,01$ мкЗв/год до $0,166 \pm 0,02$ мкЗв/год та від $0,108 \pm 0,01$ мкЗв/год до $0,187 \pm 0,02$ мкЗв/год. Середнє значення еквівалентної дози в повітрі панельних будинків перевищувало таке у повітрі цегляних на 3,9 % і становить відповідно $0,132 \pm 0,04$ мкЗв/год та $0,127 \pm 0,03$ мкЗв/год. Дисперсійний аналіз виявив несуттєвість різниці в 95 % довірчому інтервалі ($F_{ф.} = 1,18 < F_{к.} = 1,64$).

Порівняння середніх значень потужності еквівалентної дози, виміряної на різних рівнях від поверхні, вказує на те, що найбільше значення показника відмічається на перших поверхах (рис. 1). Вимірювання на різній висоті від поверхні (перший, другий та третій поверхи) показали, що особливості коливання показника залежать від типу будівельних матеріалів, з яких споруджено будинки. Дисперсійний аналіз не виявив достовірних зв'язків між величиною потужності еквівалентної дози та поверхом, на якому проводилися вимірювання для будинків, споруджених із цегли ($F_{ф.} = 1,05 < F_{к.} = 3,24$). Відмінності у середніх значеннях показника (відповідно, $0,129 \pm 0,01$; $0,130 \pm 0,01$; $0,121 \pm 0,01$ мкЗв/год) знаходилися в межах статистичної похибки. Вимірювання, проведені на різних поверхах панельних будинків, показали, що середні значення величини потужності дози іонізуючого випромінювання становлять $0,150 \pm 0,03$ мкЗв/год для першого поверху, $0,125 \pm 0,02$ мкЗв/год для другого поверху і $0,120 \pm 0,01$ мкЗв/год для третього поверху. Порівняння середніх значень із застосуванням критерію Фішера показали, що рівень радіаційного фону на перших поверхах панельних будинків достовірно вищий на 20 % від такого на других поверхах і на 25 % від такого на третіх поверхах. Між радіаційним фоном, виміряним на других та третіх поверхах панельних будинків, достовірних відмінностей не виявлено.

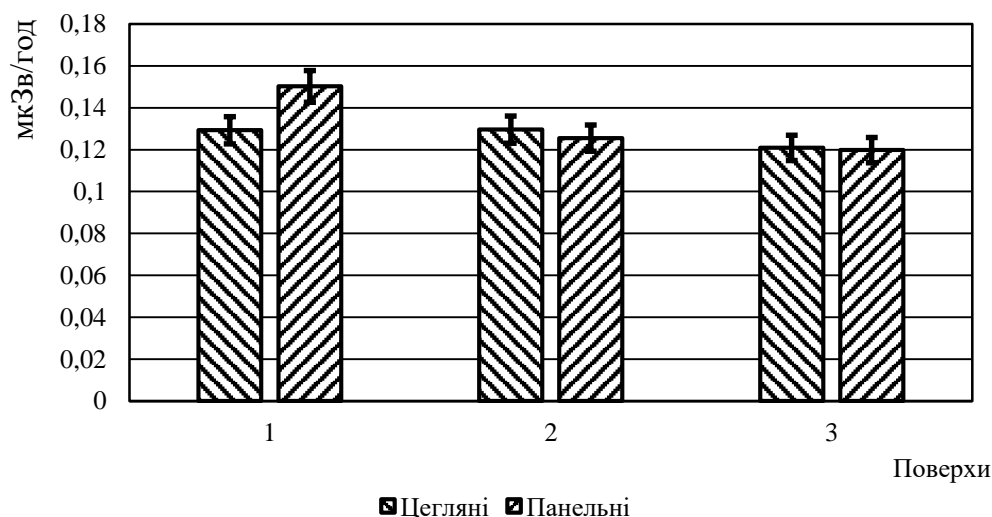


Рис. 1. Порівняння потужності амбієнтного еквіваленту дози гамма-опромінення в повітрі житлових будинків у місті Житомирі залежно від будівельних матеріалів і висоти

Середнє значення потужності амбієнтного еквіваленту дози на перших поверхах панельних будинків становить $0,150 \pm 0,03$ мкЗв/год, а на перших поверхах цегляних – $0,129 \pm 0,02$ мкЗв/год. Різниця у 16 % статистично достовірна ($F_{ф.} = 15,18 > F_{к.} = 1,47$) і цілком закономірна. Вона пояснюється не лише відмінностями у вмісті радіонуклідів у будівельних матеріалах, особливо тих, з яких зроблено фундаменти будинків. Як відомо з літератури, важкий бетон у середньому має більшу радіоактивність, ніж легкий бетон, а останній більш радіоактивний, ніж цегла [7, 20, 23]. При виробництві бетонів використовується гранітний щебінь, а при виробництві цегли – глини, які характеризуються меншим вмістом природних радіонуклідів. Але підвищений фон іонізуючого випромінювання на перших поверхах саме панельних будинків може бути опосередкованим свідченням того, що він пов'язаний саме з дочірніми продуктами розпаду радону. Відомо, що цей газ важчий за повітря, тому накопичується внизу. Період напіврозпаду найпоширенішого ізотопу ^{222}Rn становить 3,82 доби. Серед дочірніх радіонуклідів, які при цьому утворюються, є дуже короткоживучі гамма-випромінювачі – ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{210}Tl , ^{210}Pb , ^{210}Bi , ^{206}Tl . Фактор відмінностей у природних радіонуклідах у ґрунті можна не враховувати, адже будинки для досліджень вибиралися рандомно в різних районах міста, а результати вимірювань усереднювалися. Результати вимірювань потужності дози іонізуючого випромінювання у житлових будинках міста Житомира засвідчили, що всі показники знаходяться в межах санітарної норми. Однак, враховуючи те, що джерела гамма-випромінювання в будівельних матеріалах пов'язані з виділенням з них радону, можна припустити, що на нижніх поверхах, у напівпідвальних та підвальних приміщеннях панельних будинків концентрація

цього радіоактивного газу також може бути підвищеною. Враховуючи це, можна рекомендувати змінити тип користування цими приміщеннями і використовувати їх для розміщення торговельних закладів, офісів тощо. Категорично не допускається використовувати їх для перебування дітей (позашкільні, дошкільні заклади), адже діти – це вразлива щодо радону категорія населення, що підтверджують спеціалізовані дослідження [7, 11–12].

Традиційним будівельним матеріалом в місті Житомирі є цегла, яка виробляється з місцевої сировини. Наявність в місті житлових будинків, споруджених ще на початку ХХ століття, дозволяє оцінити загальну тенденцію у відмінностях величини потужності дози гамма-випромінювання залежно від року будівництва (рис. 2). Ці дані попередні і досить варіабельні. Але загальний тренд свідчить, що в будинках 2005 року спорудження величина показника перевищує таку у будинку 1900 року спорудження на 25 %. Одним із пояснень отриманих результатів може бути те, що на початку ХХ століття як сировину для виготовлення цегли використовували матеріали з меншим вмістом природних радіонуклідів або не було техногенно підсиленої компоненти. Оскільки вимірювався загальний гамма-фон, то ще одним можливим поясненням може бути додаткове забруднення, пов'язане із наслідками аварії на Чорнобильській АЕС. Але для більш ґрунтового висновку потрібні подальші дослідження.

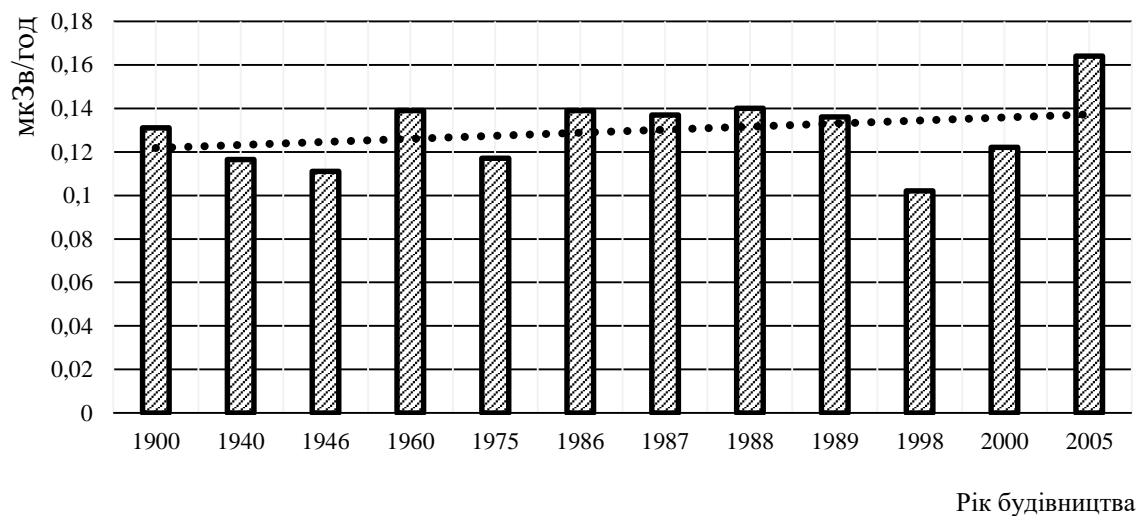


Рис. 2. Потужність амб'єнтного еквіваленту дози гамма-опромінювання в повітрі цегляних будівель залежно від року спорудження будинку

Висновки та перспективи подальших досліджень. Результати вимірювання потужності еквівалентної дози гамма-випромінювання в житлових приміщеннях міста Житомира показали, що достовірно її величина залежить від поверху та виду будівельних матеріалів, з яких споруджено будинок. Статистично достовірних відмінностей у величині потужності дози гамма-випромінювання на всіх поверхах цегляних та на верхніх поверхах панельних будинків не виявлено. Установлено, що найвищі значення потужності еквівалентної дози фіксувалися на перших поверхах панельних будинків. Радіаційний фон тут був на 16 % вищий, ніж на перших поверхах цегляних будинків, на 20 % вище, ніж на других та на 25 % вище, ніж на третіх поверхах панельних будинків. Причиною цього є використання для виготовлення панелей щебню з місцевих матеріалів, який містить більше природних радіонуклідів, ніж сировина для виготовлення цегли. В той же час відмова від місцевих будівельних матеріалів, які виробляються зі щебню, недоцільна економічно. Показники, отримані в результаті проведеного моніторингу, за своїми значеннями не перевищують санітарно-гігієнічних нормативів, але можуть опосередковано свідчити про накопичення на нижніх рівнях панельних будинків радону. В той же час Житомирська область належить до найбільш постраждалих від радіоактивного забруднення, спричиненого аварійними викидами Чорнобильської АЕС. Внаслідок цього радіаційне навантаження на населення в регіоні підвищене. Тому зменшення середньозваженої величини ефективної дози внутрішнього опромінювання, якого зазнають пересічні громадяни, сприятиме збереженню громадського здоров'я. Враховуючи проведені дослідження, можна рекомендувати використовувати підвальні приміщення виключно для господарських потреб та переведення приміщень перших поверхів з житлових на нежитлові (офіси, магазини тощо). На основі порівняння результатів у будинках, які споруджувались у різний час, починаючи з 1900 року, попередньо виявлено тренд до підвищення рівня радіаційного фону у більш сучасній забудові. Ці дані потребують більш детальних досліджень з розширенням як кількості вимірювань, так і особливостей будівельних матеріалів.

Список використаної літератури:

1. Radiation: effects and sources // United Nations Environment Programme. – 2016. – 64 p. [Electronic resource]. – Access mode : <http://surl.li/gzfq>.
2. Макаровська О. Радіація та космос: що потрібно знати? / О.Макаровська, Д.Чумак // Сайт з питань ядерної безпеки, радіаційного захисту та нерозповсюдження ядерної зброї [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://surl.li/gzfsn>.
3. Шумлянський Л.В. Ізотопний вік, геохімічні та мінералогічні особливості пегматитів в аногрозитах Володарсько-Волинського масиву, Коростенський плутон / Л.В. Шумлянський, В.М. Загітко // Мінералогічний журнал. – 2011. – Т. 33, № 1. – С. 15–29 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://surl.li/gzfsf>.
4. Статистичний щорічник України за 2021 рік / за ред. І.Є. Вернера. – К. : Державна служба статистики України, 2022. – 444 с.
5. Чисельність наявного населення України на 1 січня 2022 року / за ред. М.Тімоної. – К. : Державна служба статистики України, 2022. – 82 с.
6. Павленко Т.О. Існуючі дози опромінення населення України / Т.О. Павленко, І.П. Лось // Ядерна та радіаційна безпека. – 2009. – № 1. – С. 18–22.
7. Куцак А.В. Проблеми радіаційної безпеки населення, яке зазнає опромінення від природних джерел (огляд літератури) / А.В. Куцак // Проблеми радіаційної медицини та радіобіології. – 2018. – Вип. 23. – С. 49–60.
8. Павленко Т.О. Дози опромінення населення України, зумовлені техногенно- підсисленими джерелами природного походження / Т.О. Павленко // Довкілля і здоров'я. – 2008. – № 2. – С. 36–38.
9. Annals of the ICRP. ICRP Publication 65. Protection Against Radon-222 at Home and at Work. – Vienna : Pergamon, 1994. – 78 p. [Electronic resource]. – Access mode : <http://surl.li/gzfyf>.
10. Sources and Effects of Ionization Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation: UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly with Scientific Annex. – New York : UN, 2000. – 657 p. [Electronic resource]. – Access mode : <http://surl.li/gzfyf>.
11. Оцінка рівнів радону у дитячих навчальних закладах м. Кропивницький для впровадження протирадонових заходів / М.А. Фризюк, М.В. Аксьонов, О.В. Федоренко та ін. // Довкілля та здоров'я. – 2018. – № 3. – С. 56–62.
12. Радон у дошкільних закладах Запорізької області та дози опромінення дітей / Т.О. Павленко, М.І. Костенецький, А.В. Куцак та ін. // Довкілля та здоров'я. – 2013. – № 1. – С. 49–53.
13. Рівні опромінення населення України в контексті плану дій щодо зменшення рівнів радону в повітрі приміщень / Т.О. Павленко, А.М. Сердюк, А.П. Оперчук та ін. // Проблеми радіаційної медицини та радіобіології. – 2020. – Вип. 25. – С. 220–229.
14. Севальнева А.І. Проблеми радіаційної безпеки населення Запорізької області, яке зазнає опромінення від основних джерел (за оглядом літератури) / А.І. Севальнева, А.В. Куцак, І.А. Соколовська // Проблеми радіаційної медицини та радіобіології. – 2019. – Вип. 24. – С. 53–64.
15. Павленко Т.О. Рівні радону у повітрі будинків України / Т.О. Павленко // Довкілля та здоров'я. – 2007. – № 2. – С. 22–25.
16. Бузинний М.Г. Директива 98/83/ЄС і контроль радіоактивності питної води в Україні / М.Г. Бузинний // Довкілля та здоров'я. – 2017. – № 4. – С. 14–16.
17. Антомонов М.Ю. Інтегральна оцінка якості вод річки Дніпро з визначенням радіаційної активності у місцях питних водозаборів та питних водопровідних станцій / М.Ю. Антомонов, О.В. Зоріна // Проблеми радіаційної медицини та радіобіології. – 2018. – Вип. 23. – С. 82–95.
18. Дослідження природних радіонуклідів у підземній воді в Україні / М.Г. Бузинний, Л.Л. Михайлова, В.І. Сахно, М.О. Романченко // Довкілля та здоров'я. – 2011. – № 1. – С. 31–35.
19. Бузинний М.Г. Узагальнені дані 20-річного моніторингу радону-222 у питній воді України / М.Г. Бузинний, Л.Л. Михайлова // Ядерна та радіаційна безпека. – 2022. – Вип. 4 (96). – С. 29–38. DOI: 10.32918/nrs.2022.4(96).04.
20. Очеретний В.П. Шляхи зниження радіоактивності будівельних матеріалів та виробів / В.П. Очеретний, О.М. Друкований // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2011. – Т. 10, № 1. – С. 41–45.
21. Томчук М.А. Контроль радіоактивності житла в Україні / М.А. Томчук, В.В. Швець, В.В. Слівінський // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2019. – Т. 27, № 2. – С. 62–67.
22. Григор'єва Л.І. Дози опромінення працівників гранітодобувних підприємств від радону-222 / Л.І. Григор'єва, Ю.А. Томлін // Проблеми радіаційної медицини та радіобіології. – 2017. – Вип. 22. – С. 97–107.
23. Швець В.В. Аналіз радіоактивності будівельних матеріалів для житлового та громадського будівництва / В.В. Швець, А.В. Бондар, О.М. Друкований // Екологічна безпека та відновлювальні джерела енергії : збір. доп. Міжнародної наук.-техн. конф., 24–25 травня. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – С. 137–143.
24. Natural activities of ^{238}U , ^{232}Th and ^{40}K in some Indian building materials / A.Kumar, M.Kumar, B.Singh, S.Surinder // Radiation Measurements. – 2003. – Vol. 36, Issue 1–6. – P. 465–469. DOI: 10.1016/S1350-4487(03)00173-2.
25. Raghu Y. Statistical analysis of natural radioactivity data of clay samples in Tiruvannamalai, Tamilnadu, India / Y.Raghu, A.Chandrasekaran, R.Ravisankar // Acta Ecologica Sinica. – 2020. – Vol. 40, Issue 3. – P. 254–261. DOI: 10.1016/j.chnaes.2019.12.006.
26. Дослідження радіаційного фону в мікрорайонах м. Кропивницького за допомогою дозиметра-радіометра МКС-08-01 Гм «ДКС-96» та бездротових датчиків / Л.П. Суховірська, О.М. Лунгол, Д.В. Соменко, К.В. Гуменюк // Проблеми радіаційної медицини та радіобіології. – 2019. – Вип. 24. – С. 195–209.

27. Моніторинг радіоактивності студентського містечка ДНУЗТ / Л.Ф. Доліна, В.П. Кільовий, Д.В. Астахов, М.В. Калімбет // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – 2016. – № 3 (63). – С. 49–59. DOI: 10.15802/stp2016/74712.
28. Здійснення контролю за дотриманням радіаційно-гігієнічних параметрів у будівництві : методичні рекомендації. – К., 2007 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://surl.li/gzfk>.
29. Христич О.В. Параметри радіоактивності будівельних матеріалів / О.В. Христич, В.П. Ковальський, В.П. Бурлаков // Прикладні науково-технічні дослідження : матеріали III Міжнар. наук.-практ. конф., 3–5 квітня. – Івано-Франківськ : Симфонія форте, 2019. – С. 184.
30. Руденко В.М. Математична статистика / В.М. Руденко. – К. : Центр учбової літератури, 2012. – 304 с.

References:

1. «Radiation: effects and sources» (2016), *United Nations Environment Programme*, 64 p., [Online], available at: <http://surl.li/gzfqz>
2. Makarovska, O. and Chumak, D., «Radiatsiia ta kosmos: shcho potribno znaty?», *Sait z pytan yadernoi bezpeky, radiatsiinoho zakhystu ta nerozповsiudzhennia yadernoi zbroi*, [Online], available at: <http://surl.li/gzfsn>
3. Shumlinskiy, L.V. and Zahnitko, V.M. (2011), «Izotopnyi vik, heokhimichni ta mineralohichni osoblyvosti pehmatyv v anortozytakh Volodarsko-Volynskoho masyvu, Korostenskyi pluton», *Mineralohichni zhurnal*, Vol. 33, No. 1, pp. 15–29, [Online], available at: <http://surl.li/gzfsf>
4. Verneer, I. (ed.) (2022), *Statystychni shchorichnyk Ukrainy za 2021 rik*, Derzhavna sluzhba statystyky Ukrainy, K., 444 p.
5. Timonin, M. (ed.) (2022), *Chyselnist naiavnoho naseleння Ukrainy na 1 sichnia 2022 roku*, Derzhavna sluzhba statystyky Ukrainy, K., 82 p.
6. Pavlenko, T.O. and Los, I.P. (2009), «I snuiuchi dozy oprominennia naseleння Ukrainy», *Yaderna ta radiatsiina bezpeka*, No. 1, pp. 18–22.
7. Kutsak, A.V. (2018), «Problemy radiatsiinoi bezpeky naseleння, yake zaznaie oprominennia vid pryrodnykh dzherel (ohliad literatury)», *Problemy radiatsiinoi medytsyny ta radiobiologii*, Issue 23, pp. 49–60.
8. Pavlenko, T.O. (2008), «Dozy oprominennia naseleння Ukrainy, zumovleni tekhnohennno-pidsylenymy dzherelamy pryrodnoho pokhodzhennia», *Dovkillia i zdorovia*, No. 2, pp. 36–38.
9. Annals of the ICRP. ICRP Publication 65. Protection Against Radon-222 at Home and at Work. – Vienna : Pergamon, 1994. – 78 p. [Electronic resource]. – Access mode : <http://surl.li/gzfyf>.
10. *Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation: UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly with Scientific Annex* (2000), UN, New York, 657 p., [Online], available at: <http://surl.li/gzfyf>
11. Fryziuk, M.A., Aksonov, M.V., Fedorenko, O.V. et al. (2018), «Otsinka rivniv radonu u dytiachykh navchalnykh zakladakh m. Kropyvnytskyi dlia vprovadzhennia protyradonovykh zakhodiv», *Dovkillia ta zdorovia*, No. 3, pp. 56–62.
12. Pavlenko, T.O., Kostenetskyi, M.I., Kutsak, A.V. et al. (2013), «Radon u doshkilnykh zakladakh Zaporizkoi oblasti ta dozy oprominennia ditei», *Dovkillia ta zdorovia*, No. 1, pp. 49–53.
13. Pavlenko, T.O., Serdiuk, A.M., Operchuk, A.P. et al. (2020), «Rivni oprominennia naseleння Ukrainy v konteksti planu dii shchodo zmenshennia rivniv radonu v povitri prymishchen», *Problemy radiatsiinoi medytsyny ta radiobiologii*, Issue 25, pp. 220–229.
14. Sevalnieva, A.I., Kutsak, A.V. and Sokolovska, I.A. (2019), «Problemy radiatsiinoi bezpeky naseleння Zaporizkoi oblasti, yake zaznaie oprominennia vid osnovnykh dzherel (za ohliadom literatury)», *Problemy radiatsiinoi medytsyny ta radiobiologii*, Issue 24, pp. 53–64.
15. Pavlenko, T.O. (2007), «Rivni radonu u povitri budynkiv Ukrainy», *Dovkillia ta zdorovia*, No. 2, pp. 22–25.
16. Buzynnyi, M.H. (2017), «Dyrektyva 98/83/Yes i kontrol radioaktyvnosti pytnoi vody v Ukraini», *Dovkillia ta zdorovia*, No. 4, pp. 14–16.
17. Antomonov, M.Iu. and Zorina, O.V. (2018), «Intehralna otsinka yakosti vod richky Dnipro z vyznachenniam radiatsiinoi aktyvnosti u mistsiakh pytnykh vodozaboriv ta pytnykh vodoprovodnykh stantsii», *Problemy radiatsiinoi medytsyny ta radiobiologii*, Issue 23, pp. 82–95.
18. Buzynnyi, M.H., Mykhailova, L.L., Sakhno, V.I. and Romanchenko, M.O. (2011), «Doslidzhennia pryrodnykh radionuklidiv u pidzemni vodi v Ukraini», *Dovkillia ta zdorovia*, No. 1, pp. 31–35.
19. Buzynnyi, M.H. and Mykhailova, L.L. (2022), «Uzahalneni dani 20-richnoho monitorynhu radonu-222 u pytnii vodi Ukrainy», *Yaderna ta radiatsiina bezpeka*, Issue 4 (96), pp. 29–38, doi: 10.32918/nrs.2022.4(96).04.
20. Ocheretnyi, V.P. and Drukovanyi, O.M. (2011), «Shliakhy znyzhennia radioaktyvnosti budivelnykh materialiv ta vyrobiv», *Suchasni tekhnologii, materialy i konstruksii v budivnytstvi*, Vol. 10, No. 1, pp. 41–45.
21. Tomchuk, M.A., Shvets, V.V. and Slivinskiy, V.V. (2019), «Kontrol radioaktyvnosti zhytla v Ukraini», *Suchasni tekhnologii, materialy i konstruksii v budivnytstvi*, Vol. 27, No. 2, pp. 62–67.
22. Hryhorieva, L.I. and Tomilin, Yu.A. (2017), «Dozy oprominennia pratsivnykiv hranitodobuvnykh pidpriemstv vid radonu-222», *Problemy radiatsiinoi medytsyny ta radiobiologii*, Issue 22, pp. 97–107.
23. Shvets, V.V., Bondar, A.V. and Drukovanyi, O.M. (2017), «Analiz radioaktyvnosti budivelnykh materialiv dlia zhytlovoho ta hromadskoho budivnytstva», *Ekolohichna bezpeka ta vidnovliuvalni dzherela enerhii*, zbir. dop. Mizhnarodnoi nauk.-tekhn. konf., 24–25 travnia, VNTU, Vinnytsia, pp. 137–143.
24. Kumar, A., Kumar, M., Singh, B. and Surinder, S. (2003), «Natural activities of 238U, 232Th and 40K in some Indian building materials», *Radiation Measurements*, Vol. 36, Issue 1–6, pp. 465–469, doi: 10.1016/S1350-4487(03)00173-2.

25. Raghu, Y., Chandrasekaran, A. and Ravisankar, R. (2020), «Statistical analysis of natural radioactivity data of clay samples in Tiruvannamalai, Tamilnadu, India», *Acta Ecologica Sinica*, Vol. 40, Issue 3, pp. 254–261, doi: 10.1016/j.chnaes.2019.12.006.
26. Sukhovirskaya, L.P., Lunhol, O.M., Somenko, D.V. and Humeniuk, K.V. (2019), «Doslidzhennia radiatsiinoho fonu v mikroraiionakh m. Kropyvnytskoho za dopomohoiu dozymetra-radiometra MKS-08-01 Hm "DKS-96" ta bezdrovovyykh datchykyv», *Problemy radiatsiinoi medytsyny ta radiobiologii*, Issue 24, pp. 195–209.
27. Dolina, L.F., Kilovyi, V.P., Astakhov, D.V. and Kalimbet, M.V. (2016), «Monitoryng radioaktyvnosti studentskoho mistechka DNUZT», *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu*, No. 3 (63), pp. 49–59, doi: 10.15802/stp2016/74712.
28. *Zdiisnennia kontroliu za dotrymanniam radiatsiino-hihiienichnykh parametriv u budivnytstvi* (2007), metodychni rekomendatsii, K., [Online], available at: <http://surl.li/gzfk>
29. Khrystych, O.V., Kovalskiy, V.P. and Burlakov, V.P. (2019), «Parametry radioaktyvnosti budivnykh materialiv», *Prykladni naukovo-tekhichni doslidzhennia, materialy III Mizhnar. nauk.-prakt. konf.*, 3–5 kvitnia, Symfoniia forte, Ivano-Frankivsk, pp. 184.
30. Rudenko, V.M. (2012), *Matematychna statystyka*, Tsentri uchbovoi literatury, K., 304 p.

Шелест Зоя Михайлівна – кандидат біологічних наук, доцент кафедри наук про Землю Державного університету «Житомирська політехніка».
<https://orcid.org/0000-0001-5195-3475>.

Наукові інтереси:

- радіоекологія;
- екологічна освіта.

Корбут Марія Броніславівна – кандидат технічних наук, докторант Національного університету «Львівська політехніка».
<https://orcid.org/0000-0003-2395-3456>.

Наукові інтереси:

- екологічна безпека;
- сталий розвиток урбанізованих територій.

Герасимчук Олена Леонтиївна – кандидат педагогічних наук, завідувачка кафедри наук про Землю Державного університету «Житомирська політехніка».
<http://orcid.org/0000-0003-4242-0946>.

Наукові інтереси:

- безпека життєдіяльності;
- екологічна політика.

Кальчук Сергій Володимирович – кандидат технічних наук, доцент кафедри гірничих технологій та будівництва ім. проф. М.Т. Бакка Державного університету «Житомирська політехніка».
<https://orcid.org/0000-0003-3179-2787>.

Наукові інтереси:

- гірничі справи;
- промислова екологія.

Shelest Z.M., Korbut M.B., Herasymchuk O.L., Kal'chuk S.V.

Evaluation of the radiation background in residential premises caused by man-made enhanced sources of natural origin

The natural radiation background is an important abiotic factor. Nowadays, radiation from natural sources is enhanced by a man-made component. Population growth stimulates construction, for which natural mineral raw materials are used. Uranium and its daughter radionuclides contained in building materials increase the impact of natural sources of radiation on humans. Radon is the main dose-forming radionuclide. Its measurement is a difficult task. Among the products of radon fission are gamma emitters, which, together with other natural radionuclides, form the radiation background of residential premises. The paper analyzes the features of the formation of the power of the ambient dose equivalent of gamma radiation in the air of residential buildings in the city of Zhytomyr. It has been established that the power level of the equivalent dose in residential premises depends on the height of the building and the type of building materials. It was found that the highest level of gamma background is recorded on the first floors of panel buildings. It was 16 % higher than on the first floors of brick buildings, 20 % higher than on the second and 25 % higher than on the third floors of panel houses. The difference is statistically significant. It is also shown that there is a trend towards an increase in the gamma background in more modern buildings compared to older ones.

Keywords: natural radiation background; technogenically enhanced radiation background; radioactive series; radon; the power of the ambient dose equivalent of gamma radiation; mineral construction raw materials; radioactivity of residential premises.

Стаття надійшла до редакції 04.05.2023.