

О. О. Лебедь^{1,*}, В. О. Мислінчук², Л. В. Клименко¹, Л. В. Гладун¹, А. В. Лисиця²¹ Національний університет водного господарства та природокористування, Рівне, Україна² Рівненський державний гуманітарний університет, Рівне, Україна

*Відповідальний автор: lebed739@ukr.net

**ОЦІНКА РАДОНОВОЇ ЕКОЛОГІЧНОЇ НЕБЕЗПЕКИ
ДЛЯ ЖИТЕЛІВ МІСТА ЗАХІДНОГО РЕГІОНУ УКРАЇНИ**

Наведено результати комплексного визначення експресним методом об'ємної активності ^{222}Rn в повітрі приміщень м. Рівне. Показано, що середнє геометричне значення об'ємної активності ^{222}Rn у вимірюваних приміщеннях (600 приміщень підвалів, напівпідвалів та перших поверхів житлових будинків) м. Рівне становило 200 Бк/м^3 з геометричним стандартним відхиленням 0,8, з них: у 185 підвальних приміщеннях зафіксовано середнє геометричне значення 365 Бк/м^3 , у 215 напівпідвальних приміщеннях – 161 Бк/м^3 і у житлових приміщеннях перших поверхів – 127 Бк/м^3 . Здійснено порівняльний аналіз експериментально отриманих значень густини потоку радону з ґрунту міста (поділеного на 48 підрайонів) зі статистичними даними по смертності населення від раку легень, яке померло в даних підрайонах за фіксований проміжок часу.

Ключові слова: радон, приміщення, густина потоку радону, повітря, об'ємна активність, рак легень, ґрунт.

1. Вступ

За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ), найголовнішими із чинників, що каталізують виникнення та розвиток більшості відомих хвороб людини є забруднення біосфери хімічними та радіоактивними речовинами [1, 2]. Доведено, що структура та частота захворюваності населення значною мірою залежать як від кліматичних умов (сонячна активність, температурні коливання, електромагнітні поля, надмірна вологість, перепади атмосферного тиску тощо), так і споживання неякісної води, продуктів харчування, дихання забрудненим повітрям та впливом фонового радіоактивного випромінювання [3]. Зафіксовані забруднення атмосферного повітря окислом карбонату, окислом нітрогену, ангідридом сульфору, сульфогідроеном, сполуками фтору спричиняють появу підвищеної кількості запальних захворювань, насамперед, органів дихання і очей, захворювань серцево-судинної системи, інфекційних захворювань, раку легень [4 - 6].

Поряд з хімічними чинниками негативних факторів, що безпосередньо впливають на безпечну область проживання людини, є також радіаційний вплив природних джерел випромінювання, зокрема радону та його дочірніх продуктів розпаду (ДПР) [7]. Наявність радону та його ДПР в повітрі приміщень призводять до збільшення ризику захворюваності на рак легень через його надходження в організм людини з повітрям при вдиханні та внутрішнього опромінення легень [8 - 12]. Еквівалентна доза опромінення легень вно-

сить більше 95 % у величину ефективної дози, обумовленої інгаляцією ДПР радону. Детальне вивчення причин формування раку легень показало: 1) у бронхах людей існують «клітини ризику», які отримують найвищу дозу під час впливу α -частинок, що випромінюються радоном і його ДПР; 2) віддалені ефекти опромінення органів дихання радоном і його ДПР визначаються насамперед сумарною дозою незалежно від часу, протягом якого вона була накопичена; 3) через нерівномірність розподілу радіонуклідів у легенях можливе масивне опромінення окремих сегментів бронхолегеневої системи і розвиток раку легень у них при середніх поглинутих дозах на легені, нижчих від гранично-допустимої [13]. Серед різновидів раку легень, що викликаються радоновим опроміненням, частіше за інші діагностуються аденокарцинома, лусковидна карцинома і саркома лімфатичних вузлів [14].

За даними Служби громадського здоров'я США (US Public Health Service), опромінення радіоактивним радоном є другою у світі причиною виникнення раку легень (у середньому 12,5 % від усіх причин) після паління [15]. Радон викликає в США приблизно 21000 смертей на рік від хвороби на рак легень, що робить його другою найважливішою причиною даної хвороби після паління. За даними Агентства навколишнього середовища у США при середній активності радону в будинках 55 Бк/м^3 та сумарній експозиції $0,2 \text{ WLM}$ щорічно від 15 до 22 тисяч онкологічних захворювань

ініціюється радоном і продуктами його розпаду, перевищуючи допустимий нормативами ріст смертності в 300 разів (WLM, Working Level Month – позасистемна одиниця, що використовується для оцінки експозиції, створеної за рахунок впливу радону та його дочірніх продуктів розпаду, $1 \text{ WLM} = 3,54 \text{ мДж}\cdot\text{год}/\text{м}^3$). На лікування захворювань, викликаних інгаляцією радону в США щорічно витрачається більше 1 млрд доларів [16].

Згідно з розрахунками Британського бюро захисту від радіації, у Великобританії щорічно гинуть 2500 чоловік від раку легень, викликаного радоном [17]. Світові та європейські інституції протягом останніх десятиліть розробляють все новіші жорсткіші умови щодо обмеження радіаційного забруднення територій проживання в Європі та світі [18]. Зокрема, в Council Directive 2013/59/EURATOM [19] формулюються конкретні вимоги до національних законодавств країн-членів ЄС щодо вирішення загальної проблеми впливу експозиції радону на глобальний стан здоров'я населення Європи. Згідно з даною директивою введено базовий рівень середньорічної концентрації радону на рівні $300 \text{ Бк}/\text{м}^3$ для житлових приміщень та робочих місць, і державам-членам ЄС пропонується розробляти «плани дій щодо радону». Серед таких дій першочерговими є розробка діагностичних методів та показників для вимірювання та оцінки концентрації радону [20].

У зв'язку з цим виникає проблема визначення радонових полів населених пунктів країн світу і, зокрема, України. Для м. Рівне ця проблема особливо актуальна, оскільки місто знаходиться в межах Українського кристалічного щита, багатого на уран, який є інтенсивним джерелом радону.

Мета роботи полягала у визначенні та аналізі просторового розподілу об'ємної активності (ОА) радону в підвальних, напівпідвальних приміщеннях та приміщеннях перших поверхів житлових будинків м. Рівне, співставленні їх зі значеннями усереднених густин потоків радону (ГПР) із ґрунту, а також зі значеннями захворюваності та смертності населення від раку легень.

Об'єкт дослідження – процеси ексхаляції радону з ґрунтів м. Рівне, накопичення радону в житлових приміщеннях та смертності населення від раку легень за фіксований період. Під фіксованим періодом тут і далі будемо розуміти часовий проміжок з 2019 р. по 2020 р. [21].

Предмет дослідження – показники об'ємної активності радону, густини потоку радону з ґрунту та захворюваності і смертності від раку легень у відповідних районах міста Рівне.

2. Експериментальні вимірювання

В Україні на сьогодні основним документом, що регламентує вміст радону в житлових примі-

щеннях є НРБУ-97 [22], згідно з яким: «середньорічна ЕРОА ^{222}Rn (радон) у приміщеннях будівель та споруд, які будуються та реконструюються для експлуатації з постійним перебуванням людей, не повинна перевищувати у повітрі $50 \text{ Бк}/\text{м}^3$; ^{220}Rn (Торон) – $3 \text{ Бк}/\text{м}^3$. У приміщеннях будівель та споруд, що експлуатуються з постійним перебуванням людей, середньорічна ЕРОА ^{222}Rn у зоні дихання не повинна перевищувати $100 \text{ Бк}/\text{м}^3$, а для ^{220}Rn – $6 \text{ Бк}/\text{м}^3$ (для дитячих та лікувально-профілактичних закладів – у два рази нижчий). Вміст природних радіонуклідів у питній воді джерел водопостачання не повинен перевищувати для ^{222}Rn – $100 \text{ Бк}/\text{кг}$ » [22].

Більшість методик визначення концентрації радону в повітрі приміщень, воді, ґрунтовому газі базується на використанні інтегральних методів вимірювання на основі твердотільних ядерних трекових детекторів (SSNTD на основі плівок LR-115) [23] або на використанні «миттєвих» методів вимірювання – іонізаційних [24, 25], електростатичних [26, 27] або аспіраційних [28]. Інтегральні засоби вимірюють, інтегрують й усереднюють значення ОА радону за період від кількох тижнів до року. Поряд з перевагами даних методів, можна виділити їхній суттєвий недолік: осідання пилу на реєстраційні плівки, що суттєво зменшує кількість α -частинок, що мають змогу проникнути в плівки. З метою запобігання даному недоліку вимірювання ОА радону та ГПР базувались на електростатичному методі. Вимірювання проводилися з використанням радіометра «Альфа-рад плюс – АРП» (із автономною повітродувкою АВ-07), який призначений для експресних вимірювань та неперервного моніторингу ОА ^{222}Rn (діапазон $(1 - 2 \cdot 10^6) \text{ Бк}/\text{м}^3$) і кількості розпадів ^{218}Po (діапазон $(1 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^2) \text{ імп}/\text{с}$). Наявність спеціальних пробовідбірних пристроїв надає можливість проводити вимірювання вмісту ^{222}Rn у воді (діапазон $(6 - 800) \text{ Бк}/\text{дм}^3$), ґрунтовому повітрі (діапазон $(10^3 - 10^6) \text{ Бк}/\text{м}^3$), визначити густину потоку радону з поверхні ґрунту (діапазон $(20 - 10^3) \text{ мБк}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$).

Принцип визначення ОА ^{222}Rn радіометром полягає в електростатичному осадженні заряджених іонів ^{218}Po із відібраної проби повітря на поверхню α -детектора (напівпровідниковий детектор). Ядро ^{222}Rn , що розпадається всередині камери, залишає продукт свого розпаду ядро ^{218}Po як позитивно заряджений іон. Електричне поле всередині камери приводить у рух цей позитивно заряджений іон у напрямку до детектора, до якого він електростатично притягується. ОА ^{222}Rn визначається за кількістю зареєстрованих α -частинок при розпаді атомів ^{218}Po , що осіли на детектор.

На підготовчому етапі досліджень було встановлено, що критичними за рівнем концентрації радону є будинки сільського типу та перші поверхи багатоквартирних будинків, тому подальші дослідження були зосереджені в основному на них. У проведених експериментах вимірювання ОА радону проводилось у 600 приміщеннях перших поверхів, напівпідвальних та підвальних приміщень житлового та виробничого фонду 48 підрайонів м. Рівне: 185 – підвальних, 215 – напівпідвальних, 200 – приміщень перших поверхів [29]. Виділено такі типи будівель: сільські будинки, будинки міського типу і будівлі соціально-побутового призначення, що мають конструктивні відмінності. Оскільки значення ОА всередині приміщень можуть коливатись у десятки разів протягом доби, вимірювання проводилися в кожному приміщенні протягом 24 год з подальшим усередненням. За отриманими даними було розроблено математичну модель динаміки концентрації радону в практично ізольованих приміщеннях [30].

Значення ОА для досліджуваних підвальних приміщень наведено в табл. 1. Середнє геометричне значення об'ємної активності (ОА_c) для підвальних приміщень становило 365 Бк/м³, що значно перевищує будівельні норми (100 Бк/м³ – для новобудов і 200 Бк/м³ – для будинків, що експлуатуються тривалий час). При цьому були зафіксовані підвальні приміщення житлового фонду, в яких ОА досягали значення (966 ± 193) Бк/м³.

Значення ОА для напівпідвальних приміщень наведено в табл. 2. Середнє геометричне значення ОА для напівпідвальних приміщень було 161 Бк/м³, що також є перевищенням будівельних норм.

Отже, підвищений вміст радону в повітрі напівпідвалів є досить характерним для досліджуваного регіону. Також зафіксовано підвищені значення ОА в житлових приміщеннях перших поверхів будинків (табл. 3).

Таблиця 1. Значення ОА радону в повітрі підвальних приміщень, Бк/м³

ОА	Кількість приміщень	ОА	Кількість приміщень	ОА	Кількість приміщень
100 - 150	3	400 - 450	17	700 - 750	3
150 - 200	9	450 - 500	13	750 - 800	3
200 - 250	17	500 - 550	12	800 - 850	2
250 - 300	32	550 - 600	11	850 - 900	2
300 - 350	26	600 - 650	6	900 - 950	3
350 - 400	20	650 - 700	3	950 - 1000	3

Таблиця 2. Значення ОА радону в повітрі напівпідвальних приміщень, Бк/м³

ОА	Кількість приміщень	ОА	Кількість приміщень	ОА	Кількість приміщень
0 - 50	3	300 - 350	6	600 - 650	4
50 - 100	20	350 - 400	6	650 - 700	2
100 - 150	78	400 - 450	4	700 - 750	2
150 - 200	38	450 - 500	7	750 - 800	2
200 - 250	23	500 - 550	4	800 - 850	1
250 - 300	10	550 - 600	4	850 - 900	1

Таблиця 3. Значення ОА радону в повітрі приміщень перших поверхів житлових будинків, Бк/м³

ОА	Кількість приміщень	ОА	Кількість приміщень	ОА	Кількість приміщень
0 - 50	21	300 - 350	4	600 - 650	2
50 - 100	52	350 - 400	4	650 - 700	1
100 - 150	51	400 - 450	3	700 - 750	1
150 - 200	25	450 - 500	4	750 - 800	1
200 - 250	20	500 - 550	2	800 - 850	0
250 - 300	6	550 - 600	3	850 - 900	0

Експериментальні результати зафіксували цілі райони, в яких значення ОА радону у внутрішньобудинковому повітрі перевищують норми більшості країн світу. У приміщеннях житлового

фонду району VII.4 (рис. 1) ми виявили середні значення ОА, що дорівнюють 345 Бк/м³, але в окремих приміщеннях вони сягали до 1000 Бк/м³.

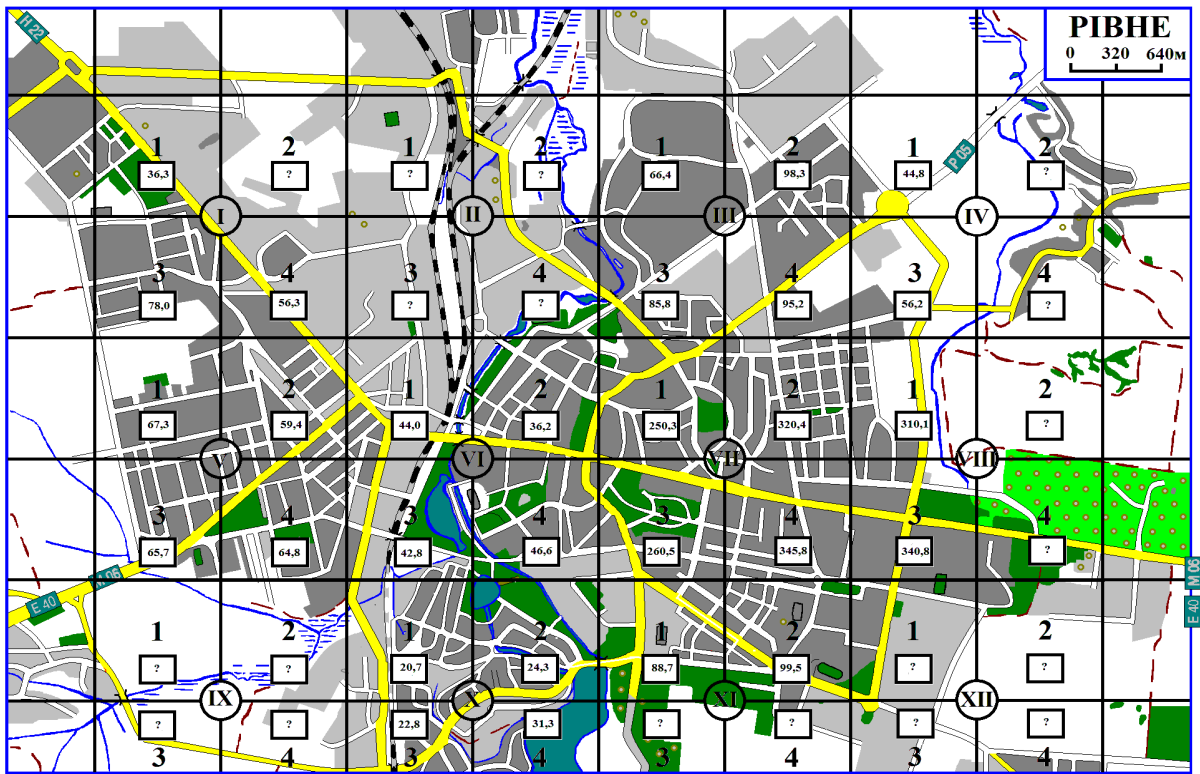


Рис. 1. Середні внутрішньобудинкові значення ОА радону (Бк/м³) для підрайонів м. Рівне.
(Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

Дослідження виявили приміщення із середнім значенням ОА більше 200 Бк/м³ у підрайонах VII.1,2,3,4 та VIII.1,3. Середнє геометричне значення ОА для житлових приміщень перших поверхів було 127 Бк/м³ (95 % довірчої імовірності: 118 - 137) із середнім арифметичним – 145 Бк/м³. Об’єднані дані з ОА радону за всіма вимірюваними приміщеннями дають картину, наведену в табл. 4.

Середньо-арифметичне значення ОА по всіх досліджуваних будинках становило 262,5 Бк/м³ за стандартного відхилення 194,4 Бк/м³, що свідчить про значну варіабельність рівнів радону в повітрі житлових будинків на території м. Рівне. Середнє геометричне значення ОА за вимірюванням у 600 приміщеннях становило 200 Бк/м³.

Таблиця 4. Значення ОА радону у внутрішньобудинковому повітрі всіх досліджуваних приміщень, Бк/м³

ОА	Кількість приміщень	ОА	Кількість приміщень	ОА	Кількість приміщень
0 - 50	24	350 - 400	30	700 - 750	6
50 - 100	72	400 - 450	24	750 - 800	6
100 - 150	132	450 - 500	24	800 - 850	3
150 - 200	72	500 - 550	18	850 - 900	3
200 - 250	60	550 - 600	18	900 - 950	3
250 - 300	48	600 - 650	12	950 - 1000	3
300 - 350	36	650 - 700	6	1000 - 1050	0

Користуючись методикою [31], у результаті обробки вимірювань радону в повітрі житлових будинків м. Рівне встановили, що частотний розподіл ОА радону в повітрі досліджуваних приміщень носить логнормальний характер із густиною розподілу

$$P(OA) = \frac{1}{OA \cdot \sigma \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\left(\ln \frac{OA}{OA_{геом}}\right)^2}{2\sigma^2}}, \quad (1)$$

де $OA_{геом}$ – середнє геометричне значення об’ємної активності в досліджуваних приміщеннях

$$OA_{геом} = \sqrt[n]{\prod_i^n OA_i}, \quad (2)$$

де OA_i – середнє за вимірюваний проміжок часу значення ОА в кожному з n приміщень; σ – параметр розподілу (геометричне стандартне відхилення):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_i^n \left(\ln \frac{OA}{OA_{TEOM}} \right)^2}{n-1}} \quad (3)$$

Аналіз параметрів частотного розподілу показав, що рівень у 100 Бк/м³ за ОА перевищено у 86 % випадків, а 200 Бк/м³ – 54 % випадків, ці ж значення за еквівалентною рівноважною активні-

стю радону перевищено для 100 Бк/м³ у 27 %, а для 200 Бк/м³ у 6,6 % приміщень.

Якщо класифікувати екологічний ризик (за радоном) підрайонів за значеннями ОА в повітрі приміщень, то логічно її провести за такими рівнями: низький рівень (0 - 50) Бк/м³, середній рівень (50 - 100) Бк/м³, вищий від середнього рівень (100 - 200) Бк/м³ та високий рівень – більше 200 Бк/м³ (табл. 5).

Таблиця 5. Класифікація житлових приміщень м. Рівне за екологічною радоною небезпекою

Показники ОА радону в приміщенні	Характеристика радіогенного навантаження за ОА у приміщеннях				
	Низький рівень I	Середній рівень II	Вищий від середнього III	Високий рівень IV	Не досліджено
№ тест-полігону	I.1; IV.1; VI.1,2,3,4; X.1,2,3,4	I.3,4; III.1,2,3,4; IV.3; V.1,2,3,4; XI.1,2	–	VII.1,2,3,4; VIII.1, 3	I.2; II.1,2,3,4; IV.2,4; VIII.2,4; IX.1,2,3,4; XI.3,4; XII.1,2,3,4
Відносна кількість приміщень	21 %	27 %	0 %	13 %	39 %

У табл. 5 в останньому стовпці наведено номери підрайонів, в яких не було можливості проводити вимірювання ОА радону в приміщеннях через розміщення на них земель сільськогосподарського використання (городи) і практично відсутню житлову забудову (або не вдалося домовитися із власниками житла про проведення вимірювань). За питомою вагою виявлених будівель з

ЕРОА радону вище за норматив 100 Бк/м³ будинки можна розташувати в такому порядку: індивідуальне житло, будівлі соціально-побутового призначення, колективне житло (перші поверхи). Крім того, у даних підрайонах проводилося вимірювання та усереднення значень ГПР з ґрунту. Визначені середні значення ГПР з ґрунту для підрайонів міста представлено на рис. 2.

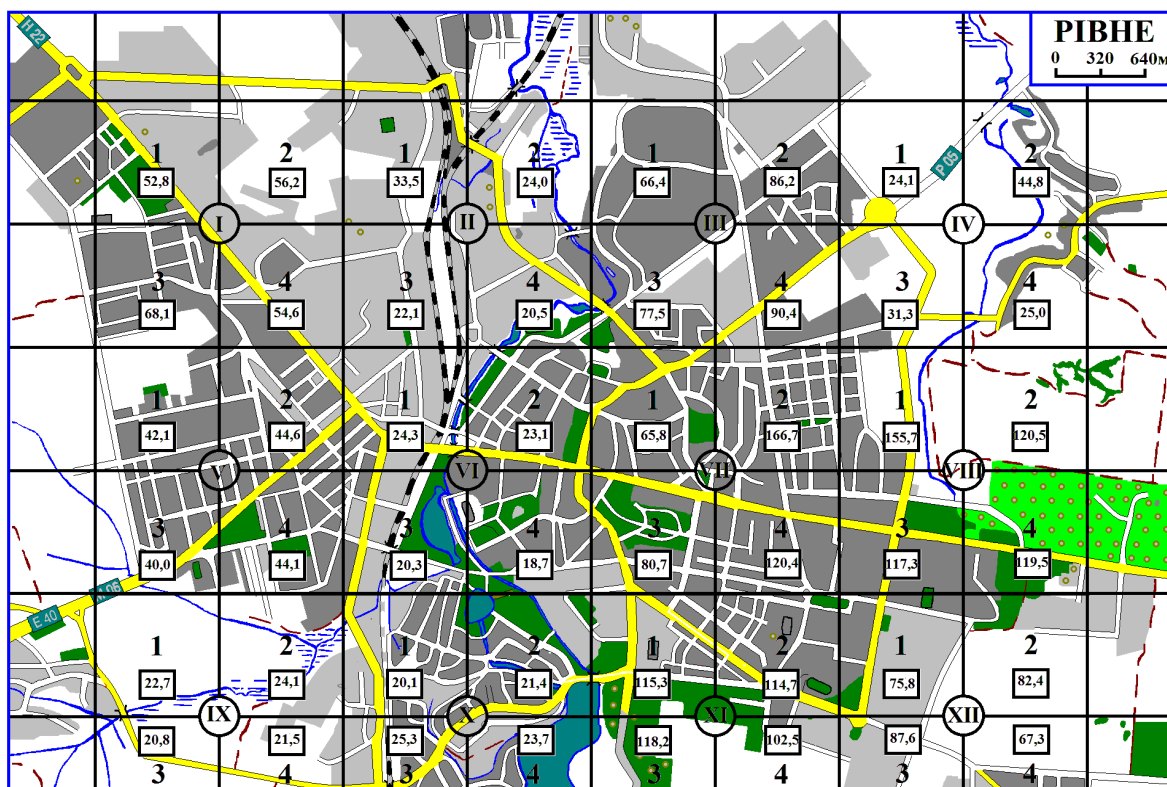


Рис. 2. Середні значення ГПР (мБк/(м²·с)) для підрайонів м. Рівне. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

Паралельно з експериментальними вимірюваннями було проведено підрахунок кількості смертей від раку легень, викликаних різними причинами, населення м. Рівне за фіксований проміжок часу. Дані про населення, включаючи вік та стать, отримані зі «Збірника показників здоров'я населення та діяльності медичних закладів Рівненської області за 2019 - 2020 роки» [21], згідно з яким, наприклад, на 01.01.2020 р. загальна кількість населення м. Рівне становила 246003 чол. Вікове співвідношення було близьким до: 16 % населення < 15 років, 2,5 % – 15 - 17 років, 81,5 % – у віці 18 років і старші, при чому у працездат-

ному віці співвідношення чоловіків і жінок становило 47 % на 53 % відповідно. Кількість хворих Рівненщини на злоякісні новоутворення в трахеї, бронхах, легенях у 2019 р. була такою: взято на облік у поточному році 233 особи, з кількості хворих із уперше встановленим діагнозом, тобто мали I - II стадію захворювання – 71 особа, III – 82, IV – 70, перебувало на обліку на кінець року – 628 осіб (з них 5 та більше років – 294 особи). Кількість померлих у цьому році становила 159 чоловіків та 36 жінок. Дані про померлих від раку легень для підрайонів міста за 2019 - 2020 рр. представлено на рис. 3.

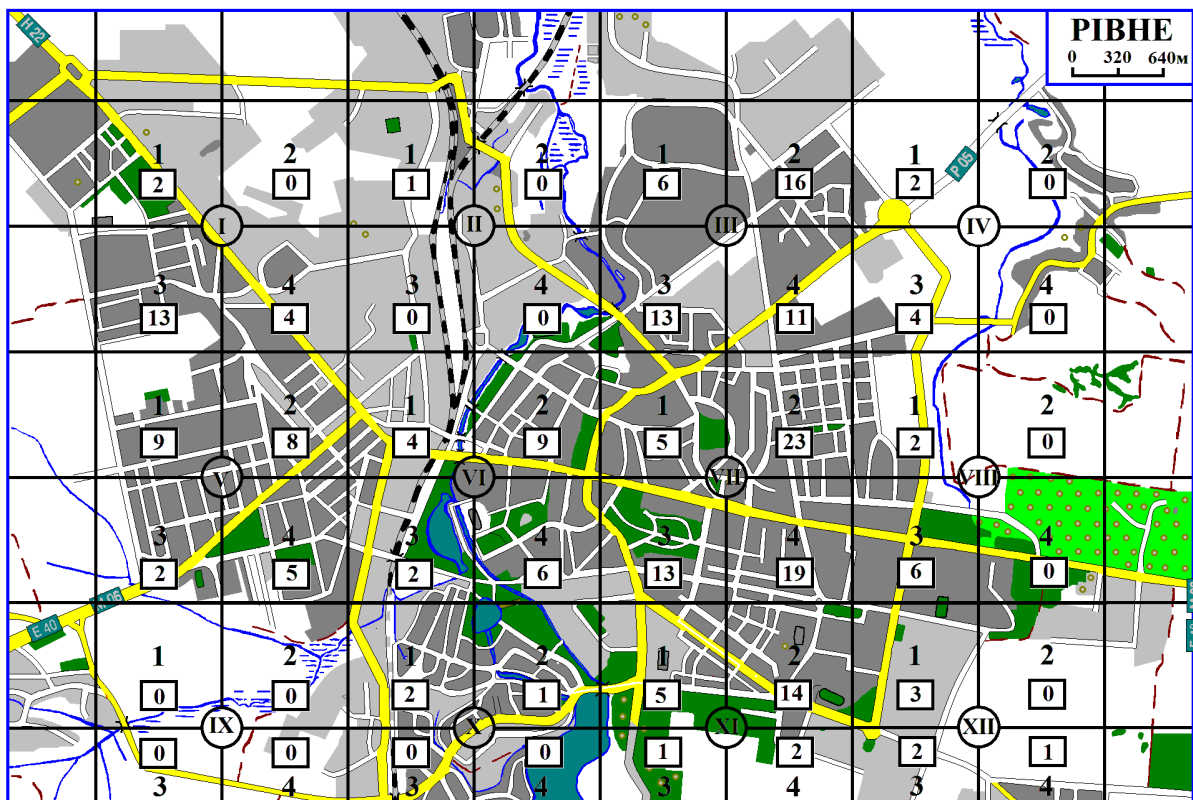


Рис. 3. Кількість хворих та померлих від раку легень жителів за фіксований період для підрайонів м. Рівне. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

Отримані результати показують, що за показниками радонової безпеки м. Рівне є неблагополучним [32]. Низький рівень небезпеки (0 - 50 Бк/м³) мають 34 % приміщень, середній (50 - 200 Бк/м³) – 44 % і високий (більше 200 Бк/м³) – 22 %. За даним показником м. Рівне перевищує такі небезпечні за радоном регіони як о. Корсика у Франції [33], міста Павлоград, Кам'янське, Дніпро в Україні [34, 35] (поступаючись лише м. Жовті Води [36]), Алтайському краю, Карелії та Єврейській автономній області в Росії [37, 38].

3. Висновки

1. Середнє геометричне значення ОА ²²²Rn у досліджуваних приміщеннях м. Рівне становило

200 Бк/м³ з геометричним стандартним відхиленням 0,8, середнє арифметичне значення ОА радону у повітрі цих же приміщень – 262,5 Бк/м³ зі стандартним відхиленням 194,4 Бк/м³, що свідчить про значну варіабельність рівнів радону в повітрі житлових будинків на території м. Рівне.

2. Середнє геометричне значення ОА для підвальних приміщень становило 365 Бк/м³, середнє геометричне значення ОА для напівпідвальних приміщень – 161 Бк/м³, а для житлових приміщень перших поверхів – 127 Бк/м³, з геометричним стандартним відхиленням 0,8, середнє арифметичне – 145,6 Бк/м³. Усі отримані значення перевищують будівельні норми. Статистичний аналіз отриманих результатів показав, що зна-

чення еквівалентної рівноважної ОА радону перевищують норми радіаційної безпеки для житлових приміщень, в яких дане значення становить 100 Бк/м^3 – у 27 %, а для 200 Бк/м^3 – у 6,6 % приміщень.

3. Спостерігається значний діапазон у отриманих значеннях ОА радону та ГПР з ґрунту для різних підрайонів міста від $20,7 \text{ Бк/м}^3$ до $345,8 \text{ Бк/м}^3$ для ОА радону внутрішньобудинкового повітря та від $18,7 \text{ мБк/(м}^2\cdot\text{с)}$ до $166,7 \text{ мБк/(м}^2\cdot\text{с)}$ для ГПР із ґрунту.

4. Порівняльний аналіз значень ОА радону, ГПР та кількості хворих і померлих від раку легень жителів підрайонів м. Рівне в період 2019 - 2020 рр. дає змогу висловити припущення про

існування кореляційної залежності між даними величинами. Доказовим аргументом на користь даного твердження можна вважати той факт, що за зазначений період часу не було зафіксовано жодного хворого або померлого жителя підрайонів Х.2 та Х.4). Саме тут встановлено одні з найменших значень ОА радону в повітрі будинків та ГПР із ґрунту. У той же час для підрайонів VII.2 та VII.4, де кількість померлих від раку легень за вказаний період становила 23 та 19 відповідно, спостерігаються найвищі в м. Рівне значення ОА радону з ґрунту. Установленню вигляду кореляційної залежності між ОА радону, ГПР із ґрунту та кількістю хворих і померлих від раку легень будуть присвячені подальші дослідження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. [Burden of disease from the joint effects of household and ambient air pollution for 2016 \(Geneva: World Health Organization, 2016\)](#) 8 p.
2. [Global Health Observatory data repository \[online database\] \(Geneva: World Health Organization, 2018\)](#).
3. [Оценка рисков для здоровья, связанных с загрязнением воздуха – общие принципы \(Копенгаген: Европейское региональное бюро ВОЗ, 2016\)](#).
4. [Air Quality Guidelines. Global Update 2005. Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide \(Copenhagen: World Health Organization, 2006\)](#) 496 p.
5. [Air quality in Europe – 2016 report \(Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2016\)](#) 88 p.
6. [Air quality in Europe – 2017 report \(Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2017\)](#) 80 p.
7. В.К. Кольтовер. Радоновая радиация: источники, дозы, биологические эффекты. Вестник РАН 66(2) (1996) 114.
8. Ю.О. Кутлахмедов, В.І. Корогодін, В.К. Кольтовер. *Основи радіоекології*. Навч. посіб. (К.: Вища школа, 2003) 319 с.
9. Э.М. Крисюк. *Радиационный фон помещений* (Москва: Энергоатомиздат, 1989) 120 с.
10. О.О. Lebed et al. Determination of oncological disease risks caused by radon in urban ecosystems of Rivne. [Ukrainian Journal of Ecology](#) 8(4) (2018) 175.
11. L.A. Truta, W. Hofmann, C. Cosma. Lung cancer risk due to residential radon exposures: estimation and prevention. [Radiation Protection Dosimetry](#) 160(1-3) (2014) 112.
12. В.К. Кольтовер. Радиологическая проблема радона. Радиационная биология. Радиэкология 34(2) (1994) 257.
13. J.M. Samet. Radiation and cancer risk: a continuing challenge for epidemiologists. [Environ. Health](#) 10(Suppl. 1) (2011) 541.
14. G. Malinovsky, I. Yarmoshenko, M. Zhukovsky. Radon, smoking and HPV as lung cancer risk factors in ecological studies. [Int. J. Radiat. Biol.](#) 94 (2018) 62.
15. И.Н. Бекман. *Радон: враг, врач и помощник*. Курс лекций (Москва: Медицина, 2008).
16. [Radon Research Program, FY 1992 \(Washington: US Dept. Energy, 1993\)](#).
17. В.И. Уткин. Радоновая проблема в экологии. Соросовский образовательный журнал 3 (2000) 73.
18. [90/143/Euratom: Commission Recommendation of 21 February 1990 on the protection of the public against indoor exposure to radon](#). p. 26.
19. [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. Official Journal of the European Union, 2014](#).
20. [H. Schmier et al. Results of radon-measurements in buildings and recommended action in the Federal Republic of Germany. High Levels of Natural Radiation \(Vienna: IAEA, 1993\)](#).
21. *Збірник показників здоров'я населення та діяльності медичних закладів Рівненської області за 2019 - 2020 роки* (Рівне: ВП РІАЦ МС, 2016) 68 с.
22. *Норми радіаційної безпеки України. Державні гігієнічні нормативи (НРБУ-97)* (К.: МОЗ України, 1997) 127 с.

23. E. Tabar et al. Radioactivity level and the measurement of soil gas radon concentration in Dikili geothermal area, Turkey. *Int. J. Radiat. Res.* 11(4) (2013) 253.
24. J. Vaupotič et al. Radon concentration in soil gas and radon exhalation rate at the Ravne Fault in NW Slovenia. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 10 (2010) 895.
25. B. Kunovska et al. Measurements of radon concentration in soil gas of Urban areas, Bulgaria. *Rom. Journ. Phys.* 58(Suppl.) (2013) S172.
26. I. Yarmoshenko et al. Variance of indoor radon concentration: Major influencing factors. *Sci. Total Environ.* 541 (2016) 155.
27. О.О. Лебедь та ін. Радон у джерельній воді Здобунівської області, Україна. *Ukrainian Journal of Ecology* 8(3) (2018) 82.
28. R. Winkler, F. Ruckerbauer, K. Bunzl. Radon concentration in soil gas: a comparison of the variability resulting from different methods, spatial heterogeneity and seasonal fluctuations. *Sci. Total Environ.* 272(1-3) (2001) 273.
29. М.О. Клименко, О.О. Лебедь. Дослідження об'ємної активності радону внутрішньобудинкового повітря м. Рівного. *Вісн. Кременчуцького нац. ун-ту* 3(1) (2017) 124.
30. М.О. Клименко, О.О. Лебедь, В.А. Машенко. Математична модель динаміки активності радону в практично ізольованому приміщенні. *Вісн. Вінницького політехн. ін-ту* 3(132) (2017) 41.
31. Т.А. Трифонова. Радиационный риск и ущерб здоровью от радонового облучения в помещениях городских зданий. В кн.: Сб. матер. II юбилейной научно-практ. конф. «Экология Владимирского региона» (Владимир, 2008) с. 6.
32. А.І. Севальнев та ін. *Радон: радіаційна безпека і методи захисту*. Навч. посіб. (Запоріжжя, 2009) 88 с.
33. И.Л. Комов и др. *Основные проблемы радоновой безопасности* (К.: Логос, 2005) 351 с.
34. О.О. Лебедь та ін. Вплив радону на онкологічну захворюваність населення, порівняльний аналіз окремих регіонів України та Франції. *Ukrainian Journal of Ecology* 8(1) (2018) 585.
35. Т.А. Pavlenko, I.P. Los, N.V. Aksenov. Exposure doses due to indoor Rn-222 in Ukraine and basic directions for their decrease. *Radiation Measurement* 28(1-6) (1997) 733.
36. М. Макаренко, П. Діденко, І. Купенко. Оцінка радононебезпеки територій міста Жовті Води Дніпропетровської області і Києва. *Геолог України* 4 (2010) 98.
37. М.Н. Тихонов. Радон: источники, дозы и нерешенные вопросы. *Санитарный врач* 12 (2009) 34.
38. Т.А. Кормановская. Гигиеническая оценка уровней облучения населения Российской Федерации природными источниками ионизирующего излучения. Автореф. дисс. канд. биол. наук (С.-Пб., 2007).

О. О. Lebed^{1,*}, V. O. Myslinchuk², L. V. Klymenko¹, L. V. Hladun¹, A. V. Lysytsya²

¹ National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, Ukraine

² Rivne State University of Humanities, Rivne, Ukraine

*Corresponding author: lebed739@ukr.net

RADON ENVIRONMENTAL HAZARD ASSESSMENT FOR RESIDENTS OF THE CITY OF THE WESTERN REGION OF UKRAINE

The results of the complex determination by the express method of the volumetric activity of ²²²Rn in the premises' air of Rivne city are given. The geometric mean value of the volumetric activity of ²²²Rn in the studied premises (600 basements, semi-basements, and first floors of residential buildings) of Rivne is 200 Bq/m³, the geometric standard deviation is 0.8. Namely, we determined the average geometric value of the volumetric activity 365 Bq/m³ in 185 basements, 161 Bq/m³ in 215 semi-basements, and 127 Bq/m³ in the living quarters of the first floors. We made a comparative analysis of experimentally obtained values of radon flux density from the soil of the city (the city was divided into 48 subdistricts) with statistics on mortality from lung cancer; mortality in these subdistricts was recorded for a certain period of time.

Keywords: radon, premises, radon flux density, air, volumetric activity, lung cancer, soil.

REFERENCES

1. [Burden of disease from the joint effects of household and ambient air pollution for 2016](#) (Geneva: World Health Organization, 2016) 8 p.
2. [Global Health Observatory data repository \[online database\]](#) (Geneva: World Health Organization, 2018).

3. [Air Pollution Health Risk Assessment – General Principles \(Copenhagen: WHO Regional Office for Europe, 2016\). \(Rus\)](#)
4. [Air Quality Guidelines. Global Update 2005. Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide \(Copenhagen: World Health Organization, 2006\) 496 p.](#)
5. [Air quality in Europe – 2016 report \(Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2016\) 88 p.](#)
6. [Air quality in Europe – 2017 report \(Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2017\) 80 p.](#)
7. V.K. Koltover. Radon radiation: sources, doses, biological effects. *Vestnik Rossiyskoy Akademii Nauk* 66(2) (1996) 114. (Rus)
8. Yu.O. Kutlakhmedov, V.I. Korogodin, V.K. Koltover. *Fundamentals of Radioecology*. Textbook (Kyiv: Vyshcha Shkola, 2003) 319 p. (Ukr)
9. E.M. Krisyuk. *Radiation Background of Premises* (Moskva: Energoatomizdat, 1989) 120 p. (Rus)
10. O.O. Lebed et al. Determination of oncological disease risks caused by radon in urban ecosystems of Rivne. *Ukrainian Journal of Ecology* 8(4) (2018) 175.
11. L.A. Truta, W. Hofmann, C. Cosma. Lung cancer risk due to residential radon exposures: estimation and prevention. *Radiation Protection Dosimetry* 160(1-3) (2014) 112.
12. V.K. Koltover. Radiological problem of radon. *Radiatsionnaya Biologiya. Radioekologiya* 34(2) (1994) 257. (Rus)
13. J.M. Samet. Radiation and cancer risk: a continuing challenge for epidemiologists. *Environ. Health* 10(Suppl. 1) (2011) 541.
14. G. Malinovsky, I. Yarmoshenko, M. Zhukovsky. Radon, smoking and HPV as lung cancer risk factors in ecological studies. *Int. J. Radiat. Biol.* 94 (2018) 62.
15. I.N. Beckman. *Radon: Enemy, Doctor and Helper*. Course of lectures (Moskva: Medicine, 2008). (Rus)
16. [Radon Research Program, FY 1992 \(Washington: US Dept. Energy, 1993\).](#)
17. V.I. Utkin. Radon's problem in ecology. *Sorovskiy Obrazovatelnyy Zhurnal* 3 (2000) 73. (Rus)
18. [90/143/Euratom: Commission Recommendation of 21 February 1990 on the protection of the public against indoor exposure to radon. p. 26.](#)
19. [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. Official Journal of the European Union, 2014.](#)
20. H. Schmier et al. Results of radon-measurements in buildings and recommended action in the Federal Republic of Germany. *High Levels of Natural Radiation (Vienna: IAEA, 1993).*
21. *Collection of Indicators of Population Health and Activity of Medical Institutions of Rivne Region for 2019 - 2020 (Rivne: Regional Information and Analytical Center, 2016) 68 p. (Ukr)*
22. *Radiation Safety Standards of Ukraine. State Hygienic Standards (RSSU-97) (Kyiv: Ministry of Health of Ukraine, 1997) 127 p. (Ukr)*
23. E. Tabar et al. Radioactivity level and the measurement of soil gas radon concentration in Dikili geothermal area, Turkey. *Int. J. Radiat. Res.* 11(4) (2013) 253.
24. J. Vaupotič et al. Radon concentration in soil gas and radon exhalation rate at the Ravne Fault in NW Slovenia. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 10 (2010) 895.
25. B. Kunovska et al. Measurements of radon concentration in soil gas of Urban areas, Bulgaria. *Rom. Journ. Phys.* 58(Suppl.) (2013) S172.
26. I. Yarmoshenko et al. Variance of indoor radon concentration: Major influencing factors. *Sci. Total Environ.* 541 (2016) 155.
27. O.O. Lebed et al. Radon in the spring water of the Zdolbuniv region, Ukraine. *Ukrainian Journal of Ecology* 8(3) (2018) 82. (Ukr)
28. R. Winkler, F. Ruckerbauer, K. Bunzl. Radon concentration in soil gas: a comparison of the variability resulting from different methods, spatial heterogeneity and seasonal fluctuations. *Sci. Total Environ.* 272(1-3) (2001) 273.
29. M.O. Klymenko, O.O. Lebed. Research of volumetric activity of radon of indoor air of Rivne. *Visnyk of the Kremenchuk National University* 3(1) (2017) 124. (Ukr)
30. M.O. Klymenko, O.O. Lebed, V.A. Mashchenko. Mathematical model of radon activity dynamics in a practically isolated room. *Visnyk of the Vinnytsia Polytechnic Institute* 3 (132) (2017) 41. (Ukr)
31. T.A. Trifonova. Radiation risk and damage to health from radon exposure in urban buildings. In: Proc. of the II Anniversary Sci. and Pract. Conf. 'Ecology of the Vladimir region' (Vladimir, 2008) p. 6. (Rus)
32. A.I. Sevalnev et al. *Radon: Radiation Safety and Protection Methods*. Textbook (Zaporizhzhya, 2009) 88 p. (Ukr)
33. I.L. Komov et al. *Main Problems of Radon Safety (Kyiv: Logos, 2005) 351 p. (Ukr)*

34. O.O. Lebed et al. Effect of Radon on oncological morbidity of the population: comparative analysis of some regions of Ukraine and France. *Ukrainian Journal of Ecology* 8(1) (2018) 585. (Ukr)
35. T.A. Pavlenko, I.P. Los, N.V. Aksenov. Exposure doses due to indoor Rn-222 in Ukraine and basic directions for their decrease. *Radiation Measurement* 28(1-6) (1997) 733.
36. M. Makarenko, P. Didenko, I. Kupenko. Radon hazard assessment of the territories of the city of Zhovti Vody, Dnipropetrovsk region and Kyiv. *Heoloh Ukrayiny* 4 (2010) 98. (Ukr)
37. M.N. Tikhonov. Radon: sources, doses and unresolved issues. *Sanitarnyy Vrach* 12 (2009) 34. (Rus)
38. T.A. Kormanovskaya. Hygienic assessment of levels of exposure of the population of the Russian Federation by natural sources of ionizing radiation. Thesis Abstract of the Candidate of Biological Sciences (Sankt-Peterburg, 2007).

Надійшла/Received 06.09.2021