

## Effect of Radon on oncological morbidity of the population: comparative analysis of some regions of Ukraine and France

O.O. Lebed\*, M.O. Klymenko\*, A.V. Lysytsya\*\*, V.O. Myslinchuk\*\*

*\*National University of Water and Environmental Engineering*

*Soborna str. 11, Rivne, 33000, Ukraine. Tel.: +380637323087, e-mail: [lebed739@ukr.net](mailto:lebed739@ukr.net)*

*\*\*Rivne State University of Humanities*

*Plastova str. 29a, room 203, Rivne, 33028, Ukraine. Tel.: +380973322466, e-mail: [lysycya@ukr.net](mailto:lysycya@ukr.net)*

**Submitted: 17.01.2018. Accepted: 24.02.2018**

Radon contributes about 50% to the total annual effective dose of human radioactive irradiation. This gas is the main radiological pollutant of ecosystems. The question of studying the effect of radon on increasing the risk of the incidence of lung cancer is relevant in the context of European sanitary and hygienic research. We give in this article a comparative description of the results of experimental studies of volumetric activity of radon inside the air of the first floors of residential premises in Corsica island (France) and town of Rivne (Ukraine). «Kodak-alpha» integrated solid-state track detectors were used in France for three measurement campaigns between 1990 and 1999 (152 measurements in residential buildings and 638 in the schools of the island). In Ukraine, we did research using the "Alfarad Plus" Express Radon meter from 2013 to 2017 (200 measurements in the apartments of the first floors of buildings). The regions studied are similar in several parameters, which affect the increase in the percentage of cancer diseases: geology of underlying soils, the structure of housing and building material, the number of people and incidence of lung cancer, smoking factor, etc. We found that the volume activity (VA) of radon in indoor air in-house compared regions have close in value. The main reason is the similarity of the underlying granites in terms of radon emanation power. The average geometric value of radon VA in living quarters for various measurement campaigns in Corsica is in the range from 81 to 152 Bq/m<sup>3</sup> (the average of them is 134 Bq/m<sup>3</sup>). This value for Rivne is 127 Bq/m<sup>3</sup>. VA of radon in residential areas of Rivne have a lognormal distribution. Building norms for equivalent equilibrium volumetric activity (EEVA) of radon in the premises of Rivne are exceeded in 6.6% of buildings, Corsica - from 6 to 10% (this depends on the measurement campaign). Here, the average concentration of radon in housing is over 400 Bq/m<sup>3</sup>. We calculated the relative risk of lung cancer incidence due to radon for the population of the studied regions. The Jacobi and BEIR-VI models were used for Rivne for 70 years of exposure, and the BEIR-VI model was taken for Corsica for 110 years of exposure. The proportion of deaths from lung cancer is in Corsica from 30 to 48%, while for Rivne - about 50%. Consequently, the percentages of deaths from lung cancer caused by radon with an average value of VA in housing 134 Bq/m<sup>3</sup>, for men and women Corsica are 21.3% and 22.6% respectively (21.5% for the entire population) of the total number of deaths from this disease. In the quantitative form it is 33 people (men - 28, women - 5) out of 155 people died for a year from lung cancer. For residents of Rivne, the percentage of deaths from lung cancer is 25.1%, average value of VA in housing is 127 Bq/m<sup>3</sup>. 53 people die on average for a year from lung cancer caused by radon (men - 47, women - 6) of 214 deaths per year lung cancer lot. A preliminary assessment of the synergistic interaction between smoking and radon showed that there could be a 50% increase in morbidity due to radon for smokers, compared to non-smokers. However, these data are not sufficiently representative and therefore further research is needed.

**Key words:** Rivne; Corsica; living rooms; volumetric activity of radon; lung cancer

---

# Вплив радону на онкологічну захворюваність населення, порівняльний аналіз окремих регіонів України та Франції

О.О. Лебедь\*, М.О. Клименко\*, А.В. Лисиця\*\*, В.О. Мислінчук\*\*

\*Національний університет водного господарства та природокористування  
вул. Соборна 11, м. Рівне, 33000, Україна. Тел. +380362633209, e-mail: [lebed739@ukr.net](mailto:lebed739@ukr.net)

\*\*Рівненський державний гуманітарний університет  
вул. Пластова 29а, к. 203, м. Рівне, 33028, Україна. Тел.: +380973322466, e-mail: [lysycya@ukr.net](mailto:lysycya@ukr.net)

Внесок радону в сумарну річну ефективну дозу від радіоактивного опромінення людини становить близько 50%. Цей газ є основним радіологічним забруднювачем екосистем, тому визначення його впливу на збільшення ризику захворюваності онкологічними хворобами легень залишається актуальним в контексті європейських санітарно-гігієнічних досліджень. У статті дана порівняльна характеристика результатів досліджень об'ємної активності (ОА) радону внутрішньобудинкового повітря перших поверхів житлових приміщень острова Корсика (Франція) і міста Рівне (Україна). Вимірювання на Корсиці проводили за допомогою детекторів «Kodak-alpha» протягом трьох кампаній з 1990 по 1999 рр. (160 вимірювань в житлі та 638 в приміщеннях шкіл острова). Вимірювання в Рівному здійснені за допомогою експрес-радонометру «Альфарад Плюс» в період з 2013 по 2017 роки (200 вимірювань в квартирах перших поверхів будівель). Отримані дані є коректними для порівняння через значну подібність характеристик обох досліджуваних регіонів: геологія підстилаючих ґрунтів, структура житла і будівельний матеріал, кількість населення і його захворюваність на рак легень, фактор куріння та ін. Встановлено, що ОА радону в повітрі приміщень порівнюваних регіонів мають близькі значення, що пояснюється в першу чергу радонопотужністю підстилаючих гранітів: на Корсиці геологія визначається гранітами меридіонально розміщеного гірського хребта, а в Рівному – гранітами Українського кристалічного щита. З'ясовано, що середнє геометричне значення ОА радону в житлових приміщеннях для різних кампаній вимірювань на Корсиці знаходиться в межах від 81 до 152 Бк/м<sup>3</sup>, тоді як для Рівного – 127 Бк/м<sup>3</sup> [95% ДІ: 118-137]. Визначено, що розподіл ОА радону в житлових приміщеннях Рівного носить логнормальний характер. Встановлено, що будівельні норми по еквівалентній рівноважній об'ємній активності (ЕРОА) радону в приміщеннях перевищені в Рівному для 6,6% будівель, на Корсиці, залежно від кампанії вимірювань, для 6-10%. Проведено розрахунок збільшення відносного ризику захворюваності на рак легень і смертності населення через радон для обох регіонів. При цьому використали моделі запропоновані Міжнародною комісією з радіаційного захисту. Зокрема, для Рівного для 70 років експозиції застосовано моделі Якобі та BEIR-VI, для Корсики для 110 років експозиції модель BEIR-VI. Визначено, що відносний додатковий ризик захворюваності та смертності від раку легень, пов'язаний з середньою концентрацією радону в житло вище 400 Бк/м<sup>3</sup> на Корсиці становить від 30 до 48%, тоді як для Рівного – близько 50%. Відсоток смертей від раку легень, викликаного радоном із середнім значенням ОА в житло 134 Бк/м<sup>3</sup> у чоловіків і жінок Корсики становить відповідно 21,3% і 22,6% (21,5% для всього населення) від загальної кількості смертей від цієї хвороби. Кількісно це 33 людини (28 чоловіків, 5 жінок) з 155 померлих за рік від раку легень. Для рівнян при середньому значенні ОА радону в житлі 127 Бк/м<sup>3</sup> відсоток смертей з цієї ж причини дещо вищий, і становить 25,1%, або 53 людини (47 чол., 6 жін.) з 214 померлих. Попередня оцінка можливої синергічної дії куріння й радону показала, що може бути підвищення захворюваності за рахунок радону для курців, в порівнянні з тими хто не палить, на 50%. Проте, ці дані не є достатньо репрезентативним і питання вимагає подальшого вивчення.

**Ключові слова:** місто Рівне, острів Корсика, житлові приміщення, об'ємна активність радону, рак легень.

## Вступ

Перед суспільством і науковим співтовариством після Чорнобильської катастрофи, що нібито відійшла в минуле, радіаційна загроза не зникає, вона регулярно постає з новою силою. Серед останніх прикладів – аварія на АЕС у Фукусімі (Японія) в 2011 році (Takamura et al., 2016; Tsuda et al., 2016) або викид Рутенію-106 на підприємстві «Маяк» (Росія) в 2017 році. Сьогодні, на нашу думку, надзвичайно актуальним є визначення нових жорсткіших умов щодо радіаційного забруднення територій проживання в Європі, прописаних в Council Directive 2013/59/EURATOM (Council of the European Union, 2014). У вересні 2009 року Всесвітня організація охорони здоров'я (ВООЗ) випустила довідник з проблем радону в житлових приміщеннях (Zeeb and Shannoun, 2009). Дана публікація завершила роботу в рамках Міжнародного радонового проекту, розпочатого ВООЗ ще у 2005 році. Оскільки Україна взяла чіткий курс у напрямку вступу до Євросоюзу, то в рамках подібних міжнародних (включаючи й європейські) проектів важливим є проведення в країні досліджень з визначення різноманітних фізичних характеристик радіаційного забруднення і санітарно-гігієнічних ризиків захворювань від нього, (в тому числі й онкологічних).

Відомо, що радон (найбільш стійкий ізотоп <sup>222</sup>Rn) є одним з головних чинників природного радіоактивного забруднення. Це α-радіоактивний газ, який утворюється в процесі розпаду Урану та Торію (<sup>238</sup>U, <sup>235</sup>U, <sup>232</sup>Th) і, внаслідок своєї високої міграційної здатності, проникає в атмосферу з ґрунту (Vasilyev and Zhukovsky, 2013; Saldan et al., 2014), води та

природного газу (Lebed et al., 2014), будівельних матеріалів (Milner et al., 2014; Vasilyev et al., 2014; Neugebauer et al., 2016) тощо. У відкритому повітрі його концентрація мізерна, але радон може накопичуватися в закритих приміщеннях, особливо в низько розміщених, оскільки його густина в 7,6 разів більша ніж у повітря. Сам радон – інертний газ і його вплив на організм людини мінімальний. Але його дочірні продукти розпаду (ДПР) – Полоній, Свинець, Вісмут – відкладаються в дихальних шляхах (трахеї, бронхи, бронхіоли, альвеоли) і є джерелом внутрішнього  $\alpha$ -опромінювання. Оскільки клітинам епітелію дихальних шляхів, зокрема бронхіального, властива порівняно висока проліферативна активність, то й їх чутливість до дії іонізуючого випромінювання є досить значною. Як наслідок, еквівалентна доза внутрішнього опромінення легенів вносить більше 95% у величину ефективної дози, обумовленої інгаляцією дочірніх продуктів розпаду Радону, що призводить до підвищення ризику виникнення онкологічних захворювань дихальної системи (Chen, 2013; Peterson et al., 2013; Truta et al., 2014).

У Франції з початку 1990-их років проводяться масштабні дослідження впливу радону на здоров'я населення. Регіон Корсика, зокрема один з двох його департаментів – Південна Корсика – характеризується високими концентраціями радону в приміщеннях (Lubin and Voise, 1997; Lubin et al., 1997). Це пояснюється геологічною будовою острова, який виник близько 250 мільйонів років тому в результаті підйому гранітного хребта в західній частині острова. Близько 50 мільйонів років тому осадові породи наповзли на основу цього хребта і сформували сланцеві височини східної частини острова. Таким чином, основними породами Корсики є переважно граніти на півдні й заході та глинисті сланці на північному сході. Велика частина острова зайнята меридіональним хребтом, який інтенсивно і глибоко розчленований річковими долинами. Найвищі гори мають альпійські форми рельєфу. 52% муніципалітетів Корсики (189 із 360) розташовані в гранітних зонах.

За геологічними характеристиками Рівне багато в чому подібне до о. Корсика. Місто Рівне розташоване в межах Волино-Подільської плити на Рівненському лесовому плато, яке глибинними розломами розділяє Мале та Волинське Полісся (Klymenko et al., 2014). У цю плиту врізається річка Устя, яка розділяє її в субмеридіональному напрямку на дві частини з заплавною та надзапальною терасами. Геологічна будова на території міста представлена протерозойськими, палеозойськими, мезозойськими та кайнозойськими відкладами. Волино-Подільська плита є західним схилом Українського кристалічного гранітного щита, розбитого складною системою розломів. У свою чергу цей схил спадає крутими розломами-східцями (блоками) до Галицько-Волинської западини. Гірські системи Українського кристалічного щита сформовані в докембрії. Протягом усього фанерозою вони залишались суходолом, а прилеглі території Волино-Подільської плити періодично затоплювало море під час трансгресій.

Станом на 1 січня 2015 року в Рівному проживало 246 217 осіб (Golovne upravlinnja statystyky u Rivnens'kij oblasti, 2015), а на Корсиці станом на 1 січня 2011 року – 314 486 осіб. Хоча площа Корсики становить 8680 км<sup>2</sup>, 40 % її території (3500 км<sup>2</sup>) займає Природоохоронний регіональний парк Корсики, в якому практично не проживає населення, ще близько 50% території припадає на гористу малонаселену місцевість. В муніципалітетах, розташованих в гранітних зонах Корсики проживає 58% населення (Insee, 1999). Площа міста Рівне (63 км<sup>2</sup>) значно поступається заселеній площі Корсики, але за структурою житла (відношення одноповерхового житла до багатопверхового) є практично однаковою. Таким чином, за показниками геології ґрунтів, кількістю населення та структурою житла ці два регіони мають багато спільного, тому коректним буде й їх порівняння щодо можливого впливу радону на здоров'я населення.

Отже, **мета** нашої роботи – проведення дослідження впливу внутрішньобудинкового радону на ризик захворюваності на рак легенів населення Рівного за прийнятою європейською методикою та порівняння отриманих результатів з даними, отриманими в одному з регіонів ЄС зі схожими геологічними, популяційними та житловими параметрами. Також одним із завдань є співставлення результатів отриманих інтегральним методом (о. Корсика) та експресним методом (м. Рівне).

## Матеріал і методи досліджень

В роботі використано відкриті медичні статистичні дані щодо захворюваності та смертності населення м. Рівне (Zbirnyk rokaznykiv zdogov'ja ..., 2016) і матеріали щодо вмісту радону у внутрішньобудинковому повітрі на Корсиці та його впливу на здоров'я мешканців острова (Franke et al., 2006). Дослідження на Корсиці включали три етапи: серія вимірювань 1992 року становила 47 вимірювань і проводилась в житлі 33 муніципалітетів департаменту Верхня Корсика, серія вимірювань 1995-1996 років становила 113 вимірювань у житлі 105 муніципалітетів Корсики (56 у департаменті Південна Корсика, 57 у департаменті Верхня Корсика, в цих комунах проживає 78% корсиканців), серія вимірювань 1999 року становила 638 вимірювань, проведених у 144 муніципалітетах (вимірювання проводили в 245 школах і 305 будівлях різного призначення) (Franke et al., 2006). При проведенні вимірювань ОА радону в приміщеннях фіксували наступну інформацію: геологія (гранітна чи не гранітна зона розміщення), тип житла (індивідуальне (вілла) чи колективне (багатоквартирний будинок)), вік житла (побудоване до 1948 року чи після), основний будівельний матеріал (граніт чи інший) та період вимірювання (зима чи весна).

Вимірювання в місті Рівному проводили протягом 2013-2017 років у 600 підвальних, напівпідвальних приміщеннях та житлі перших поверхів (Klymenko and Lebed, 2017). З них нами відібрано 200 вимірювань у житлових приміщеннях перших поверхів під яким не було напівпідвалів. Таким чином, якщо порівнювати вимірювання радону тільки в житлі, то на Корсиці проведено 160 вимірювань, а в Рівному – 200. Оскільки місто розміщене компактно, то відпала необхідність розбивати отримані значення за зоною розміщення. Всі вимірювання проводили на перших поверхах цегляних будинків, тому немає відмінності між індивідуальним і колективним житлом. На жаль, для більшості

індивідуальних будинків м. Рівне не існує інформації про рік побудови, але за зовнішнім виглядом всі будинки, в яких проводились вимірювання, побудовані після 1948 року.

Об'ємну активність (ОА) радону в приміщеннях Корсики вимірювали інтегральним методом за допомогою твердотільних трекових детекторів Kodak-alpha. Середня тривалість вимірювань становила 81 день для кампанії 1995-1996 рр. та 65 днів для кампанії 1992 р. 98% вимірів були зроблені або взимку (27%), або навесні (71%). Дослідження у Рівному проводились за допомогою радонметра «Альфарад Плюс», який призначений для експресних вимірювань та неперервного моніторингу ОА Радону-222. Оскільки відомо (Roessler et al., 2014; Udovicic et al., 2014), що значення ОА радону всередині приміщень можуть коливатись у десятки разів протягом доби, то вимірювання проводили в кожному приміщенні протягом 24 годин з подальшим усередненням.

При розрахунках впливу пожиттєвої експозиції радону в житлових приміщеннях на ризик захворюваності та смертності від раку легенів використовували модель Якобі (GSF) та модель BEIR-VI «експозиція – вік – тривалість» (Health Effects of ..., 1999).

## Результати та їх обговорення

За даними медичної звітності кількість померлих в лікарнях Рівного від злоякісних новоутворень в трахеї, бронхах, легенях за період 2011-2015 років в середньому становить 214 осіб на рік (табл. 1) (Zbirnyk pokaznykiv zdorov'ja ..., 2016).

**Таблиця 1.** Кількість померлих від злоякісних новоутворень в трахеї, бронхах, легенях у 2011-2015 роках в м. Рівне

| Роки | Кількість померлих |       |
|------|--------------------|-------|
|      | Чоловіки           | Жінки |
| 2011 | 198                | 24    |
| 2012 | 192                | 26    |
| 2013 | 198                | 31    |
| 2014 | 159                | 36    |
| 2015 | 185                | 23    |

Аналіз результатів французьких дослідників свідчить, що щорічна кількість смертей від усіх причин на Корсиці за період з 1990 по 1999 рік становила в середньому 2 723 особи (Franke et al., 2006). Незважаючи на різницю по роках, в середньому вона коливається майже на одному рівні (стандартне відхилення становить 57 осіб). Кількість смертей від раку легенів на Корсиці з 1990 по 1999 рік становила в середньому 155 осіб на рік. Це значення мало відрізняється по 1990-х роках (стандартне відхилення 15). У середньому на злоякісні пухлини бронхів та легенів в 1990-1999 рр. припадає 5,7% смертей на Корсиці (9,3% для чоловіків та 1,8% для жінок). Середньорічна питома смертність від раку легенів на Корсиці становить 0,56 на 1000.

Оскільки вимірювання на Корсиці проводились трьома кампаніями та різними організаціями, які не узгоджували між собою протоколи вимірювань, то для обробки результатів і представлення їх в репрезентативному вигляді французькі автори (Franke et al., 2006) зробили спеціальну статистичну обробку з метою визначення параметрів розподілу ОА в житлових приміщеннях і школах острова (табл. 2).

**Таблиця 2.** Основні характеристики розподілу ОА радону в житлових приміщеннях та школах о. Корсика

| Кількість вимірювань                         | Середнє арифметичне | Медіана | [Min – Max] | Середнє квадратичне відхилення | Середнє геометричне |
|--|---------------------|---------|-------------|--------------------------------|---------------------|
| <b>Кампанія 1995/96</b>                      |                     |         |             |                                |                     |
| 113  | 197                 | 103     | 18-2110     | 296                            | 110                 |
| Кампанія 1995/96 по департаментам:           |                     |         |             |                                |                     |
| Південна Корсика                             |                     |         |             |                                |                     |
| 56   | 263                 | 142     | 23-2110     | 376                            | 152                 |
| Верхня Корсика                               |                     |         |             |                                |                     |
| 57   | 133                 | 69      | 18-981      | 166                            | 81                  |
| Після статистичної обробки, кампанія 1995/96 |                     |         |             |                                |                     |
| 113  | 181                 | -       | -           | 242                            | 109                 |
| <b>Кампанія 1992</b>                         |                     |         |             |                                |                     |
| 47   | 147                 | 75      | 13-1189     | 205                            | 84                  |
| <b>Кампанія 1999</b>                         |                     |         |             |                                |                     |
| 638  | 199                 | 111     | 6-9109      | 450                            | 114                 |

Наші вимірювання вмісту радону у повітрі житлових приміщень Рівного показали, що для переважної більшості з них ОА знаходиться в межах від 0 до 250 Бк/м<sup>3</sup> (табл. 3), отримані результати представлено також у вигляді гістограми (рис. 2).

**Таблиця 3.** Значення  $OA$  радону у повітрі приміщень перших поверхів житлових будинків м. Рівне

| $OA$ ,<br>Бк/м <sup>3</sup> | Кількість приміщень | Відносна кількість приміщень, % |
|-----------------------------|---------------------|---------------------------------|
| 0 – 50                      | 21                  | 10,5                            |
| 50 – 100                    | 52                  | 26,0                            |
| 100 – 150                   | 51                  | 25,5                            |
| 150 – 200                   | 25                  | 12,5                            |
| 200 – 250                   | 20                  | 10,0                            |
| 250 – 300                   | 6                   | 3,0                             |
| 300 – 350                   | 4                   | 2,0                             |
| 350 – 400                   | 4                   | 2,0                             |
| 400 – 450                   | 3                   | 1,5                             |
| 450 – 500                   | 4                   | 2,0                             |
| 500 – 550                   | 2                   | 1,0                             |
| 550 – 600                   | 3                   | 1,5                             |
| 600 – 650                   | 2                   | 1,0                             |
| 650 – 700                   | 1                   | 0,5                             |
| 700 – 750                   | 1                   | 0,5                             |
| 750 – 800                   | 1                   | 0,5                             |

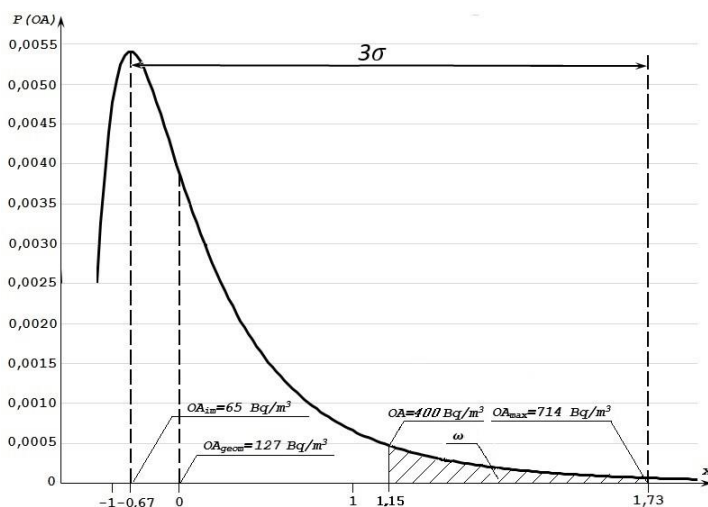
Оскільки наші вимірювання явно показали, що частотний розподіл  $OA$  радону в повітрі житлових приміщень перших поверхів будинків Рівного носить логнормальний характер, то всі статистичні характеристики ми визначали спираючись саме на нього. Середнє геометричне значення  $OA$  для житлових приміщень перших поверхів Рівного склало 127 Бк/м<sup>3</sup> [95% ДІ: 118-137] з геометричним стандартним відхиленням 0,7987, а середнє арифметичне – 145,6 Бк/м<sup>3</sup>.

Отримані параметри розподілу показали, що як для Корсики, так і для Рівного вони знаходяться в одному діапазоні значень, хоча розкид значень вимірювань є суттєвим. Зокрема, на Корсиці фіксуються максимальні значення  $OA$  в житлі 2 110 Бк/м<sup>3</sup>, а в обстежених приміщеннях м. Рівне ми не спостерігали значень  $OA$  більших за 800 Бк/м<sup>3</sup>. За отриманими показниками ми побудували логнормальну залежність частоти житла перших поверхів  $P(OA)$  від вмісту радону в них (рис. 1), користуючись формулою (1):

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

де  $OA_{geom}$  – середнє геометричне значення  $OA$  в досліджуваних приміщеннях

$$OA_{geom} = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n OA_i}, \quad (2)$$



**Рис. 1.** Густина розподілу ймовірності  $P(OA)$  значень  $OA$  радону в повітрі житлових приміщень перших поверхів м. Рівне.

$x = \ln(OA/OA_{geom})$ ,  $OA_{im}$  – найбільш ймовірне значення  $OA$ ,  $OA_{geom}$  – середнє геометричне значення  $OA$ ,  $OA_{max}$  – прогнозоване максимальне значення  $OA$

де  $OA_i$  – середнє за вимірюваний проміжок часу значення  $OA$  в кожному з  $n$  приміщень,  $\sigma$  – параметр розподілу (геометричне стандартне

відхилення),  $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\ln \frac{OA}{OA_{geom}}\right)^2}{n-1}} = 0,7987$ . (3)

В якості контрольного максимального параметра розглянуто значення на рівні порогової величини густини ймовірності відповідного відхилення від максимуму розподілу на відстані  $3\sigma$  («правило трьох сигм»), що становить  $OA_{max} = 714 \text{ Бк/м}^3$ .

З отриманої залежності (1) можна визначити, в якій частці житла значення  $OA$  радону перевищують певні вибрані рівні. Одним із таких рівнів має значення  $OA_{geom} = 400 \text{ Бк/м}^3$ . Він відповідає значенню еквівалентної рівноважної об'ємної активності радону ( $EPOA$ )  $200 \text{ Бк/м}^3$ , при коефіцієнті рівноваги  $F = 0,5$ . За значенням



$EPOA$  радону визначається рівень безпеки житла. Для Франції та України цей рівень однаковий: для старого житла  $EPOA = 200 \text{ Бк/м}^3$ , для того, що будується –  $EPOA = 100 \text{ Бк/м}^3$ . Невелика відмінність між нашими дослідженнями і (Franke et al., 2006) полягає у виборі значення коефіцієнта  $F$ . Французькі дослідники використовували значення  $F = 0,4$ , рекомендоване (МКРЗ). Це значення багато в чому залежить від клімату місцевості, частоти провітрювання приміщення тощо. Оскільки, у Рівному клімат набагато холодніший ніж на Корсиці, провітрювань приміщень значно менше, відповідно значення  $F$  потрібно брати більшим. Значення  $F = 0,5$  рекомендують використовувати російські дослідники для місцевості з подібним кліматом (Zhukovskij and Kruszhalov, 2000). Отримані статистичні показники дозволили оцінити ймовірність реєстрації для різних значень  $EPOA$  (і, відповідно,  $OA$ ) за формулою:

$$\omega(EPOA \div EPOA_{\max}) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \int_{EPOA}^{EPOA_{\max}} \frac{e^{-\frac{(\ln(EPOA/EPOA_{geom}))^2}{2\sigma^2}}}{EPOA} d(EPOA), \quad (4)$$

де  $EPOA_{geom} = 63,5 \text{ Бк/м}^3$ ,  $\sigma = 0,7987$ .

Для діапазону значень  $OA$  від  $400 \text{ Бк/м}^3$  до  $714 \text{ Бк/м}^3$  (рис. 3):

$$\omega_{EPOA}(200 \div 357) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \int_{200}^{357} \frac{e^{-\frac{(\ln(EPOA/EPOA_{geom}))^2}{2\sigma^2}}}{EPOA} d(EPOA) = 0,066. \quad (5)$$

Для діапазону значень  $OA$  від  $200 \text{ Бк/м}^3$  до  $714 \text{ Бк/м}^3$  –  $\omega_{EPOA}(100 \div 357) = 0,27$ .

Для діапазону значень  $OA$  від  $150 \text{ Бк/м}^3$  до  $714 \text{ Бк/м}^3$  –  $\omega_{EPOA}(75,5 \div 357) = 0,41$ .

Отже, нами проведено розрахунки (табл. 4) подібні до представлених в роботі (Franke et al., 2006).

**Таблиця 4.** Відносна кількість будинків з перевищенням певного рівня  $OA$  радону в них

| Рівень $OA$ радону<br>в $\text{Бк/м}^3$ | % від загальної кількості приміщень |               |                  |
|---|-------------------------------------|---------------|------------------|
|   | Кампанія 1995/96                    | Кампанія 1999 | Наші вимірювання |
| > 1000                                  | 0,7                                 | 1,3           | -                |
| > 400                                   | 6,0                                 | 10,0          | 6,6              |
| > 200                                   | 17,9                                | 29,5          | 27               |
| $\leq 200$                              | 75,4                                | 70,5          | -                |
| > 150                                   | -                                   | -             | 41               |
| $\leq 150$                              | -                                   | -             | 59               |

Отримані дані показують, що частка житла в якому рівень радону перевищує значення  $EPOA = 200 \text{ Бк/м}^3$  приблизно однакове як для Корсики (6 та 10% для різних вимірювань), так і для Рівного (6,6%).

Розрахунок впливу позиттєвої експозиції радону в житлових приміщеннях на ризик захворюваності та смертності від раку легенів проводили базуючись на двох моделях: Якобі (GSF) та моделі «експозиція – вік – тривалість», запропонованої BEIR-VI (Health Effects of ..., 1999). Аналогічні розрахунки проведені в (Franke et al., 2006) на базі моделі «експозиція – вік – тривалість».

В обох моделях основним є припущення про те, що позиттєвий ризик (імовірність) виникнення радіаційно-індукованого випромінюванням  $ДПР$  радону раку легенів  $R$  у населення визначається коефіцієнтом базової вік-специфічної частоти захворюваності  $\lambda_0(t)$  та коефіцієнта додаткового відносного ризику  $K_R$ , який, в свою чергу, залежить від величини експозиції  $P_{WLM}$  за  $ДПР$  радону. Він визначається із формули:

$$RR = 1 + R = 1 + \sum_{t=0}^{t_{\max}} \lambda_0(t) p_0(t) K_R(t) \cdot \exp \left[ - \sum_{t'=0}^t k_{let} \lambda_0(t') K_R(t') \right], \quad (6)$$

де  $RR$  – відношення абсолютного ризику виникнення онкологічного захворювання (рак легенів) в опроміненій популяції до ризику для подібної неопроміненої популяції,  $R$  – додатковий відносний ризик,  $p_0(t)$  – функція дожиття, яка визначається як імовірність досягнення людиною віку  $t$  (із народження). Вона враховує демографічні особливості території, а також те, що смерть визначається різними причинами, а не тільки впливом радіаційного фактору;  $k_{let}$  – коефіцієнт летальності (для раку легенів  $k_{let} = 0,95$ );  $K_R(t)$  – коефіцієнт додаткового відносного ризику, який в свою чергу залежить від величини експозиції  $P_{WLM}$  за  $ДПР$  радону, розподілу експозиції за часом, віку на момент оцінки ризику і кількох інших параметрів;  $\lambda_0(t)$  – коефіцієнт базової вік-специфічної частоти захворюваності на дану хворобу.

Середньорічну потужність експозиції  $P$  для населення (в одиницях  $WLM$ ) можна визначити за відомими середньорічними значеннями (еквівалентної рівноважної об'ємної активності)  $EPOA_{cp}$  за формулою:

$$P^{(n)} \left( \frac{WLM}{\text{рік}} \right) = \frac{EPOA_{cp} \left( \frac{Bк}{M^3} \right) \cdot T(200d)}{170 \cdot 3700} \quad (7)$$

(Величина  $1 WLM$  приблизно відповідає експозиції при  $EPOA$ , що дорівнює  $100 \text{ nKi/л}$  ( $3700 \text{ Bк/м}^3$ ) протягом 170 год).

У моделі GSF враховується, що коефіцієнт  $K_R$  залежить від часу, що пройшов із моменту впливу  $ДПР$  радону  $\varphi(t-t_e)$  і віку на момент опромінення  $s(t_e)$ . Коефіцієнт додаткового відносного ризику, зумовлений кумулятивною експозицією  $ДПР$  радону за весь період, починаючи з початку життя, для даної моделі розраховується за формулою:

$$K_R(t) = \int_0^{t-\tau} K_R(t, t_e) \cdot dt_e \approx \sum_{t_e=0}^{t-\tau} P_{WLM}(t_e) \cdot s(t_e) \cdot \varphi(t-t_e), \quad (8)$$

де  $s(t_e)$  – коефіцієнт пропорційності, що враховує канцерогенну сприйнятливість легенів, яка зменшується зі збільшенням віку людини, що опромінюється; функція  $\varphi(t-t_e)$  характеризує розподіл відносної латентності та нормована на одиницю в максимумі. Наступним за цим максимумом передбачається зменшення додаткової відносної частоти захворювань із періодом дворазового зменшення, що дорівнює 10 років.  $\tau$  – латентний період, що становить 5 років.  $P_{WLM}(t_e)$  – величина експозиції  $P_{WLM}$  за  $ДПР$  радону, отриманої у віці  $t_e$ .

Модель ризику BEIR-VI запропонована у 1999 році Національною Академією наук США після дослідження 11 когорт шахтарів у загальній кількості 60 606 осіб (Health Effects of ..., 1999). Цю модель досить часто використовують (Saldan et al., 2014), вона враховує максимальну кількість факторів, які впливають на процеси виникнення радіаційно-індукованого раку легенів. До таких факторів належать:

- час, що минув із моменту опромінення  $ДПР$  радону;
- вік на момент оцінки ризику;
- факт паління тютюну;
- рівень  $EPOA$  радону, за якої була сформована отримана експозиція за  $ДПР$  радону.

Можна виділити дві основні відмінності моделі BEIR-VI від розглянутих раніше моделей:

- 1) модель BEIR-VI використовує різні значення додаткового відносного ризику для курців і тих, хто не палить, (так звану субмультиплікативну взаємодію факторів куріння і опромінення  $ДПР$  радону);
- 2) модель BEIR-VI прогнозує зменшення відносного ризику на одиницю експозиції зі збільшенням потужності еквівалентної дози на легеневу тканину (збільшенні  $EPOA$  радону в процесі опромінення).

Комітет BEIR-VI розробив дві моделі ризику: в першій («експозиція – вік – тривалість») враховується досягнутий вік людини, час, що минув після експозиції, та тривалість експозиції; друга модель враховує інтенсивність впливу, а не її тривалість (модель «експозиція – вік – інтенсивність»). Ми проводили розрахунки за двома моделями, але оскільки в (Franke et al., 2006) ризику розраховували лише за першою моделлю BEIR-VI, то отримані результати за другою моделлю в цій статті не представлені.

Загальний вигляд функції  $K_R(t)$  в першій моделі BEIR-VI наступний:

$$K_R(t) = \beta (P_{5-14} + \theta_{15-24} \cdot P_{15-24} + \theta_{25+} \cdot P_{25+}) \cdot \varphi_{age} \gamma_Z, \quad (9)$$

де  $\beta$  – основний параметр залежності «експозиція – відповідь» («ризик – коефіцієнт»),  $P_{5-14}$ ,  $P_{15-24}$ ,  $P_{25+}$  – вікна експозиції, які визначають кумулятивну експозицію радону і його  $ДПР$ , отриману в інтервалах часу від (5–14) років до часу  $t$ , від (15–24) років до часу  $t$  й від 25 років і більше до часу  $t$ , для якого проводиться оцінка ризику;  $\theta_{15-24}$ ,  $\theta_{25+}$  – коефіцієнти, що визначають відносний внесок в ризик виникнення раку легенів від експозицій, отриманих в зазначені інтервали часу до віку  $t$ ; параметр  $\varphi_{age}$  визначає залежність канцерогенної сприйнятливості тканини легенів від досягнутого віку; параметр  $\gamma_Z$  залежить від тривалості опромінення (в роках).

В модель BEIR-VI також закладено наявність п'ятирічного латентного періоду в розвитку раку легенів, тому експозиція, отримана за останні 5 років до віку  $t$ , у виразі (9) не враховується.

Деяким недоліком цієї моделі можна вважати врахування фіксованої частки курців незалежно від країни (58% – чоловіків і 42% – жінок).

В наших вимірюваннях для середнього рівня  $OA = 127 \text{ Bк/м}^3$  радону в житлі потужність експозиції становила  $P_{WLM} = 0,88 \text{ WLM/рік}$ , а для значень  $OA = 714 \text{ Bк/м}^3$  це становило  $P_{WLM} = 4,97 \text{ WLM/рік}$ . Ці показники були контрольними для визначення додаткового відносного ризику  $R$  в проведених вимірюваннях. При розрахунках певною

проблемою стало визначення вік-специфічної частоти виникнення раку легенів  $\lambda_0(t)$ , характерної для м. Рівне, оскільки в медичних статистичних звітах по Рівненській області не наводиться статистика смертності від раку легенів в залежності від віку. Можна знайти лише дані про середню смертність за рік  $\bar{\lambda}_0(t)$ , тим більше вона не приведена окремо для чоловіків і жінок. Тому ми за рекомендацією МКРЗ (ICRP Publication 50, 1987) використали значення  $\lambda_0(t)$  для «зразкової популяції» (сумарної для чоловіків і жінок), вважаючи, що значення  $\lambda_0(t)$  для Рівного відрізняється від нього лише певним коефіцієнтом  $k$ . Розрахунок для 2015 року визначив  $k = 5,15$ . Функція дожиття  $p_0(t)$  не приведена в роботі (Franke et al., 2006), але її можна визначити за кількістю померлих (табл. 5).

**Таблиця 5.** Розподіл померлих у Рівненській області за віковими групами в 2015 році\* та середній по о. Корсика в період з 1990 по 1999 рік

| Вікова група, роки | Кількість померлих у Рівненській області | Ймовірність дожиття від народження до віку $t$ , $(p_0(t))$ | Кількість померлих на о. Корсика |
|--------------------|--|---|----------------------------------|
| 0-4                | 162                                      | 0,98898   | 18                               |
| 5-9                | 21                                       | 0,98757   | 5                                |
| 10-14              | 19                                       | 0,98629   |                                  |
| 15-19              | 53                                       | 0,98273   | 33                               |
| 20-24              | 89                                       | 0,97678   |                                  |
| 25-29              | 138                                      | 0,96760   | 55                               |
| 30-34              | 192                                      | 0,95496   |                                  |
| 35-39              | 250                                      | 0,93871   | 76                               |
| 40-44              | 361                                      | 0,91565   |                                  |
| 45-49              | 503                                      | 0,88431   | 127                              |
| 50-54              | 702                                      | 0,84206   |                                  |
| 55-59              | 1003                                     | 0,78459   | 249                              |
| 60-64              | 1142                                     | 0,72362   |                                  |
| 65-69              | 1327                                     | 0,65829   | 501                              |
| 70 і старші        | 8732                                     | 0,26712   |                                  |
| Всього             | 14695                                    | 0   | 2723                             |

\* – з врахуванням, що в м. Рівне проживає приблизно 1/6 частина населення Рівненщини

Проте, розрахунки BEIR VI базуються на 110 теоретично можливих роках життя людини. Для корсиканців верхнє значення у сумі формули (6)  $t_{\max}$  брали рівним 110 (Franke et al., 2006), в наших розрахунках для рівнян ми були вимушені обмежуватися 70 роками життя людини, оскільки окремо статистика захворюваності та смертності для довгожителів, наприклад, для 90-літніх або 100-літніх жителів Рівного не ведеться (та й навряд чи жителі міста доживають до віку 110 років). Отже, розрахунок відносного ризику  $RR$  проводився у рівнян для 70 років експозиції, а у корсиканців – для 110 років (табл. 6).

**Таблиця 6.** Розрахунок відносного ризику захворюваності та смертності від раку легенів за рахунок радону на о. Корсика та м. Рівне

| ОА, Бк/м <sup>3</sup> | $P_{WLM}$ , WLM/рік | о. Корсика |       | м. Рівне      |
|-----------------------|---------------------|------------|-------|---------------|
|                       |                     | чоловіки   | жінки | спільна група |
| 127                   | 0,88 ( $F = 0,5$ )  |            |       | 1,09          |
| 150                   | 0,84 ( $F = 0,4$ )  | 1,30       | 1,32  |               |
| 200                   | 1,11 ( $F = 0,4$ )  | 1,39       | 1,43  |               |
| 400                   | 2,23 ( $F = 0,4$ )  | 1,78       | 1,85  |               |
| 714                   | 4,97 ( $F = 0,5$ )  |            |       | 1,50          |
| 1000                  | 5,57 ( $F = 0,4$ )  | 2,84       | 3,11  |               |

Французькі дослідники (Franke et al., 2006) також визначили відсоток смертності населення від раку легенів, що вноситься відповідним вікном експозиції. При цьому, що частка смертей від раку легенів, пов'язана з середньою концентрацією радону в житлі вище 400 Бк/м<sup>3</sup> на Корсиці, становить від 30 до 48% (для теоретичних 110 років експозиції), тоді як для м. Рівне – близько 50% (для теоретичних 70 років експозиції).

Відсоток смертей від раку легенів, спричиненого радоном із середнім значенням ОА в житлі 134 Бк/м<sup>3</sup>, у чоловіків і жінок Корсики становить відповідно 21,3% та 22,6% (21,5% для всього населення) від загальної кількості смертей від цієї хвороби, що в кількісному відношенні становить 33 особи (для чоловіків – 28, для жінок – 5) з 155 померлих за рік від раку легенів. Для жителів м. Рівне із середнім значенням ОА в житлі рівним 127 Бк/м<sup>3</sup> додатковий відсоток смертей від раку легенів 25,1%, що в кількісному відношенні становить 53 особи (для чоловіків – 47, для жінок – 6) з 214 померлих за рік від цієї хвороби. Можливо, що порівняно менші показники смертності для корсиканців пов'язані з певними



кліматичними особливостями (менше часу проводять у приміщеннях, краща вентиляція, зокрема в зимовий період) і, так званою, «середземноморською дієтою».

Використана як в наших дослідженнях, так і в (Franke et al., 2006) модель «експозиція – вік – тривалість» базується на лінійній безпороговій відповідності надлишкового ризику розвитку раку легенів від експозиції радону. BEIR-VI, таким чином, припускає, що навіть найнижчі рівні ОА радону в приміщеннях мають пропорційний вплив на збільшення ризику захворюваності на рак легенів. Проте, ця гіпотеза, що припускає детерміністичний а не стохастичний тип прояву радіаційного ефекту, все ще залишається дискусійною (Tubiana, 2003). Деякі аргументи підтверджують її, наприклад, навіть одна альфа-частинка може викликати помітні зміни ДНК і, отже, мутації при подальшому поділі клітин. Інші більш або менш вагомі аргументи на користь пропорційного впливу допускають і нелінійність співвідношення експозиція – ризик. Зокрема, спостерігається явище узгодженої реакції навколишніх клітин, які прилягають до постраждалих від опромінення клітин, це називають стійким ефектом (Brenner and Sachs, 2003; Little, 2004). Для житлових будинків з ОА радону, більшою ніж 1000 Бк/м<sup>3</sup>, позитивна експозиція населення перевищує експозицію американських шахтарів, тому викликають сумнів отримані для деяких шкіл Корсики результати зі значеннями ОА в тисячі Бк/м<sup>3</sup>. Експозиція з ОА в житлі зі значеннями між 400 і 1000 Бк/м<sup>3</sup> за весь час життя людини близька до рівня, який отримують шахтарі, але частка населення, яке її отримує невелика (не перевищує 10% як для Корсики так і для Рівного). Експозиція від 150 до 400 Бк/м<sup>3</sup> хоча й менша за ту, що отримують шахтарі, проте її необхідно обов'язково враховувати, оскільки вона дає значний внесок у відсоток додаткового ризику для населення. Для експозиції нижчої за 150 Бк/м<sup>3</sup> визначення надлишкового ризику стає складнішим через суттєве зростання похибки в порівняльних дослідженнях випадок/контроль. Спираючись на ці міркування щодо внесків в ризик різних вікон експозиції ОА, можна оцінити частку випадків, які підпадають під припущення лінійності та відповідають впливу, що відмічається в санітарно-гігієнічних дослідженнях. Принаймні, можна говорити про дві третини оціночного ризику для рівнів, коли ефект впливу радону є статистично значущим. Відсутність доведеної лінійної залежності для ОА нижче 150 Бк/м<sup>3</sup> не означає, що ризику не існує. Ймовірно, це пояснюється неможливістю проведення регулярного санітарно-гігієнічного моніторингу для статистично достовірної демонстрації цього нижчого рівня ризику.

Окремо слід зупинитися на такому онкогенному чиннику як тютюнопаління. На сьогодні є чітко встановлена синергічна взаємодія впливу радону і фактору паління тютюну на підвищення захворюваності на рак легенів (Lantz et al., 2013; Böhm et al., 2014; Torres-Durán et al., 2014). І в наших дослідженнях, і в дослідженнях (Franke et al., 2006) була здійснена спроба оцінки впливу такої синергічної дії на онкозахворювання дихальних шляхів. Для такої оцінки першочергове значення має знання звичок паління населенням регіону та їх еволюції в часі. На підставі досліджень, проведених у США на початку 90-х років минулого століття зроблено висновок про те, що ймовірність смерті від раку легенів в 14 разів вища для чоловіків-курців, ніж для тих, хто не палить. Для жінок цей показник дорівнює 12. Отже, еволюція паління може істотно змінити вплив радону на виникнення онкологічних захворювань. В роботі (Franke et al., 2006) зазначається, що дуже важко отримати точні дані про паління у Франції, а тим більше в досліджуваному регіоні. Корсиканські дослідження базуються лише на даних 1999 року. Вони показали перевищення кількості осіб, що палять, на Корсиці порівняно з материковою Францією. Відсоток осіб, що регулярно палять, на Корсиці був вищим, ніж в середньому по Франції: 34,9% проти 28,3%.

В Україні ситуація за статистикою паління серед населення набагато гірша ніж у Франції, якщо не катастрофічна. За нашими даними статистика щодо поширеності тютюнопаління серед різних статево-вікових груп населення на регулярній основі в Україні не збирається. Серед пострадянських країн лише в Російській Федерації є подібні дані. Зокрема, у 2009 році в Росії проводилося «Глобальне опитування дорослого населення про вживання тютюну (GATS)» (Global survey of ..., 2009). Дослідження виконувалося в контексті вимог «Рамкової конвенції ВООЗ з боротьби проти тютюну» з метою збору даних для порівняння. За даними опитування GATS, Росія опинилася на першому місці серед країн світу за відсотком населення, що палить. Якщо скористатися цими даними, то необхідно припустити, наступне:

1. Статевовіковий розподіл частки курців серед рівнян приблизно збігається з загальноросійським.
2. 100% населення у віці менше 15 років вважається таким, що не палить.

Теоретичні розрахунки, які ґрунтуються на цих припущеннях, показали, що для м. Рівне спостерігається 50-відсоткове підвищення захворюваності за рахунок радону для осіб, що палять в порівнянні з не курцями. Корсиканські дослідження, що базуються на статистиці тютюнопаління у Франції показали приблизно такі ж результати. Проте, отримані дані в цій статті не наводяться оскільки вони не є достатньо репрезентативними і порівнюваними для взятих нами регіонів. Однією з головних причин є те, що для Франції з початку 90-х років кількість осіб, які палять, серед чоловіків зменшується, але зростає серед жінок. З 2003 року спостерігається значне зниження продажу цигарок (зменшилось на 13,5% між 2002 і 2003 рр.). Це зменшення частково пояснюється освітніми та регуляторними заходами, прийнятими за планом протидії раковим захворюванням (січень 2003 р.). Підвищення цін на цигарки більше ніж на 40% між січнем 2003 р. і січнем 2004 р. призвело до зниження поширеності паління серед французів у віці від 15 до 75 років з 34,5% до 30,4%. Така тенденція спостерігалась як для чоловіків, так і для жінок. Однак в (Franke et al., 2006) відмічають, що хоча загальна частота паління у Франції зменшується, немає гарантії, що ця статистика спостерігається і для Корсики. Для України протягом останніх 10 років відмічається подібна тенденція. Ріст акцизів на тютюн веде до збільшення вартості цигарок, зниження рівня життя населення та інші соціальні чинники також впливають на кількість осіб що палять, як чоловіків, так і жінок. Зрозуміло, що в такій мінливій загальній динаміці паління населення як для Корсики, так і для України втрачає будь-який сенс розрахунок синергізму ризиків захворюваності на рак легенів за рахунок радону та тютюнопаління для експозиції 70, а тим більше 110 років.

## Висновки

Порівняння впливу внутрішньобудинкового радону на здоров'я жителів о. Корсики та м. Рівного базується на трьох кампаніях вимірювань, проведених на Корсиці в період з 1990 по 1999 роки та вимірюваннях, проведених в Рівному в період з 2013 по 2017 рік. Таке порівняння правомірне внаслідок подібності низки характеристик цих регіонів: геології ґрунтів, структури житла, кількості населення, захворюваності на рак легенів тощо. Не спостерігалось значних відмінностей в результатах, отриманих за різними методиками вимірювань ОА радону в житлових приміщеннях: інтегральними – для Корсики та експресними – для Рівного. Середнє геометричне значення об'ємної активності радону в житлових приміщеннях перших поверхів для різних кампаній вимірювань на Корсиці знаходиться в межах від 81 до 152 Бк/м<sup>3</sup>, тоді як для Рівного це значення становить 127 Бк/м<sup>3</sup>. Отримані результати показують, що частка житла в якому рівень радону перевищує значення  $EPOA = 200$  Бк/м<sup>3</sup> приблизно однакове як для Корсики (6 та 10% для різних вимірювань), так і для Рівного (6,6%).

За моделями «експозиція – вік – тривалість» BEIR VI для о. Корсика та м. Рівне і контрольною моделлю Якобі (тільки для Рівного) визначено ризик смерті від раку легенів за рахунок радону. Отже, відсоток смертей від цієї патології пов'язаних з радоном, при середньому значенні ОА радону в житлі рівному 134 Бк/м<sup>3</sup> для чоловіків і жінок Корсиканського регіону становить від 21,3% до 22,6%. Для жителів Рівного – 25,1% при ОА 127 Бк/м<sup>3</sup>. Застосувавши результати моделювання до кількості щорічних смертей від раку легенів, можна сказати, що на Корсиці через радонове опромінення за рік смертність складає для чоловіків – 28 і для жінок – 5 смертей, для Рівного цей показник становить 47 і 6, відповідно. Отримані результати по синергічній взаємодії радону та тютюнопалінню не є достатньо репрезентативними й порівнюваними для обстежуваних територій, тому в даному дослідженні не наводяться. У цьому контексті доцільно провести нову одночасну вимірювальну кампанію в обох регіонах, адаптовану для оцінки поточної експозиції, статистики тютюнопаління населення та з метою оцінки ефективності прийнятих заходів по зниженню концентрації радону в житлових приміщеннях.

## References

- Böhm, R., Sedlák, A., Bulko, M. & Holý, K. (2014). Use of threshold-specific energy model for the prediction of effects of smoking and radon exposure on the risk of lung cancer. *Radiation Protection Dosimetry*, 160(1-3), 100-103. doi: [10.1093/rpd/ncu059](https://doi.org/10.1093/rpd/ncu059)
- Brenner, D.J. & Sachs, R.K. (2003). Domestic radon risks may be dominated by bystander effects: but the risks are unlikely to be greater than we thought. *Health Physics*, 85, 103-108. doi: [10.1097/00004032-200307000-00018](https://doi.org/10.1097/00004032-200307000-00018).
- Chen, J. (2013). Canadian lung cancer relative risk from radon exposure for short periods in childhood compared to a lifetime. *International journal of environmental research and public health*, 10, 1916–1926. doi: [10.3390/ijerph10051916](https://doi.org/10.3390/ijerph10051916)
- Council of the European Union. (2014). 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. Brussels: O. J. EU. Available from: <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/65527fd1-7f55-11e3-b889-01aa75ed71a1/language-en/> Accessed on 25.12. 2017
- Franke, F., Pirard, P., Mattei, J., Maury, J.-C., Lasalle, J.-L. & Catelinois, O. (2006). Le radon en Corse: évaluation de l'exposition et des risques associés. Institut de Veille Sanitaire (in French). Available from <http://www.ladocumentationfrancaise.fr/rapports-publics/064000231/index.shtml/> Accessed on 25.12. 2017
- Global'nyj opros vzroslogo naselenija o potreblenii tabaka: otchet NIC «Statistika Rossii» Rosstata i NII pul'monologii Global survey of the adult population on tobacco consumption: the report of the SRC «Statistics of Russia» (2009). Rosstat and the Research Institute of Pulmonology]. Moscow (in Russian).
- Golovne upravlinnja statystyky u Rivnens'kij oblasti [Main Department of statistics in Rivne region] (2015). Rivne. Available from: <http://www.rv.ukrstat.gov.ua/> Accessed on 29.12.2017 (in Ukrainian).
- Health Effects of Exposure to Radon: BEIR VI. Committee on health risks of exposure to radon (BEIR VI). (1999). Board on radiation effects research. Commission on life sciences. National research council. Washington: National Academy Press.
- ICRP Publication 50. Lung Cancer Risk from Indoor Exposures to Radon Daughters (1987). Pergamon, Vienna. (Annals of the International Commission on Radiological Protection, 17(1). Available from: <http://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%2050/> Accessed on 25.12. 2017
- Insee. Recensement de la population. (1999). Populations légales. Available from: <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2522602#/> Accessed on 27.12.2017
- Klymenko, M.O. & Lebed, O.O. (2017). Doslidzhennja ob'jemnoi' aktyvnosti radonu vnutrishn'o budynkovogo povitrja mista Rivnogo [Investigation of volumetric activity of the radon of the internal house air of the city of Rivne]. *Bulletin of the Kremenchug National University n. Mikhail Ostrogradsky*, 3(104), 124-129 (in Ukrainian).
- Klymenko, M.O., Pryshhepa, A.M., Homych, N.R. (2014). Ocinjuvannja stanu mista Rivne za pokaznykamy ekologo - social'nogo monitoryngu. Monografija [Assessment of the city of Rivne according to the indicators of ecological and social monitoring. Monograph]. NUWEE, Rivne (in Ukrainian).
- Lantz, P.M., Mendez, D., Philbert, M.A. (2013). Radon, smoking, and lung cancer: the need to refocus radon control policy. *American Journal of Public Health*, 103(3), 443-447. doi: [10.2105/AJPH.2012.300926](https://doi.org/10.2105/AJPH.2012.300926)

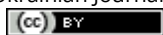
- Lebed, O.O., Myslinchuk, V.O., Pryscheпа, A.M. (2015). Radonometrija pryrodnyh vodnyh dzherel Zdolbuniv'skogo rajonu Rivnensshyny [Measurement of radon in natural water sources of Zdolbuniv area Rivne region]. Bulletin of National University of Water and Environmental Engineering, series "Agricultural Sciences", 69(1), 172-180 (in Ukrainian).
- Little, M.P. (2004). The bystander effect model of Brenner and Sachs fitted to lung cancer data in 11 cohorts of underground miners, and equivalence of fit of a linear relative risk model with adjustment for attained age and age at exposure. Journal of Radiological Protection, 24, 243-255.
- Lubin, J.H. & Boice, J.D. (1997). Lung cancer risk from residential radon: meta-analysis of eight epidemiologic studies. Journal of the National Cancer Institute, 89(1), 49-57. Doi: <https://doi.org/10.1093/jnci/89.1.49>
- Lubin, J.H., Tomasek, L., Edling, C., Hornung, R.W., Howe, G., Kunz, E., Kusiak, R.A., Morrison, H.I., Radford, E.P., Samet, J.M., Tirmarche, M., Woodward, A. & Yao, S.X. (1997). Estimating lung cancer mortality from residential radon using data for low exposures of miners. Radiation Research, 147(2), 126-134. doi: [10.2307/3579412](https://doi.org/10.2307/3579412)
- Milner, J., Shrubsole, C., Das, P., Jones, B., Ridley, I., Chalabi, Z., Hamilton, I., Armstrong, B., Davies, M. & Wilkinson P. (2014). Home energy efficiency and radon related risk of lung cancer: modelling study. British Medical Journal, 348, f7493. doi: [10.1136/bmj.f7493](https://doi.org/10.1136/bmj.f7493)
- Neugebauer, T., Hingmann, H., Buermeyer, J., Grimm, V. & Breckow, J. (2016). Radon emission rate and analysis of its influencing parameters. Published Online: 2016-09-10. doi: <https://doi.org/10.1515/nuka-2016-0056>
- Peterson, E., Aker, A., Kim, J. H., Li, Y., Brand, K. & Copes, R. (2013). Lung cancer risk from radon in Ontario, Canada: how many lung cancers can we prevent? Cancer Causes Control, 24 (11), 2013-2020. doi: [10.1007/s10552-013-0278-x](https://doi.org/10.1007/s10552-013-0278-x)
- Roessler, F. A., Azzam Jai, T., Grimm, V., Hingmann, H., Orovvighose, T., Jach, N., & Breckow, J. (2014). First steps in the development of a possible measurement method to estimate the radon concentration as an indicator of the indoor air quality. Nuclear Technology & Radiation Protection, 29(Suppl.), 52-58. doi: [10.2298/NTRP140SS52R](https://doi.org/10.2298/NTRP140SS52R)
- Saldan, I.P., Balandovich, B.A., Potseluev, N.Yu. & Flat, M.Kh. (2014). Gigienicheskaja ocenka radiacionnogo riska jemanacij radona na territorii Altajskogo Kraja [Hygienic assessment of the radiation risk of radon emanation in the Altai Krai]. Hygiene and sanitation, 93(2), 44-47 (in Russian).
- Takamura, N., Orita, M., Saenko, V., Yamashita, S., Nagataki, S. & Demidchik, Y. (2016). Radiation and risk of thyroid cancer: Fukushima and Chernobyl. Lancet Diabetes & Endocrinology, 4, 647. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S2213-8587\(16\)30112-7](http://dx.doi.org/10.1016/S2213-8587(16)30112-7)
- Torres-Durán, M., Barros-Dios, J. M., Fernández-Villar, A. & Ruano-Ravina, A. (2014). Residential radon and lung cancer un never smokers. A systematic review. Cancer Letters, 345, 21-26. doi: [10.1016/j.canlet.2013.12.010](https://doi.org/10.1016/j.canlet.2013.12.010)
- Truta, L.A., Hofmann, W., & Cosma, C. (2014). Lung cancer risk due to residential radon exposures: estimation and prevention. Radiation Protection Dosimetry, 160, 112-116. doi: [10.1093/rpd/ncu062](https://doi.org/10.1093/rpd/ncu062)
- Tsuda, T., Tokinobu, A., Yamamoto, E. & Suzuki, E. (2016). Thyroid cancer detection by ultrasound among residents ages 18 years and younger in Fukushima, Japan: 2011 to 2014. Epidemiology, 27(3), 316-322. doi: [10.1097/EDE.0000000000000385](https://doi.org/10.1097/EDE.0000000000000385)
- Tubiana, M. (2003). The carcinogenic effect of low doses: the validity of the linear no-threshold relationship. *International Journal of Low Radiation*, 1(1). <http://doi.org/10.1504/IJLR.2003.003489>
- Udovicic, V., Filipovic, J., Dragic, A., Banjanac, R., Joković, D., Maletić, D., Grabež, B., & Veselinović, N. (2014). Daily and seasonal radon variability in the underground low-background laboratory in Belgrade, Serbia. Radiation Protection Dosimetry, 160(1/3), 62-64. doi: [10.1093/rpd/ncu109](https://doi.org/10.1093/rpd/ncu109)
- Vasilyev, A.V. & Zhukovsky, M.V. (2013). Mechanisms and Sources of Radon Entry in Buildings Constructed with Modern Technologies [Text] 7th International Conference on Protection Against Radon, Prague.
- Vasilyev, A.V., Yarmoshenko I. V. & Zhukovsky, M. V. (2014). Building materials as a dominant radon source in modern buildings. Proceed. Second East European Radon Symposium. Niš: Faculty of Electronic Engineering.
- WHO handbook on indoor radon: a public health perspective (2009). H. Zeeb, F. Shannoun (Eds.). World Health Organization. Available from: [http://www.who.int/ionizing\\_radiation/env/9789241547673/en/](http://www.who.int/ionizing_radiation/env/9789241547673/en/) Accessed on 30.12.2017.
- Zbirnyk pokaznykiv zdorov'ja naselennja ta dij'al'nosti medychnyh zakladiv Rivnens'koi oblasti za 2014-2015 roky [Collection of indices of public health and activities of medical institutions of Rivne region for 2011-2015]. Communal institution "Regional information-analytical center of medical statistics" of Rivne regional council, Rivne, 2016 (in Ukrainian).
- Zhukovskij, M. V. & Kruzhalov, A. V. (2000). Kompleksnyj podhod k ocenke radiacionnyh riskov dlja naselenija [An integrated approach to the assessment of the radiation risks to people]. Izvestia of Tomsk Polytechnic University, 303(2), 162-175 (in Russian).

---

**Citation:**

Lebed, O.O., Klymenko, M.O., Lysytsya, A.V., Myslinchuk, V.O. (2018). Effect of Radon on oncological morbidity of the population: comparative analysis of some regions of Ukraine and France.

Ukrainian Journal of Ecology, 8(1), 585-595.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0. License