

**УДК 546.296:504.064**

© **Л.В. Жук**, канд. техн. наук, доцент.;  
**В.О. Васійчук**, канд. техн. наук, доцент;  
**В.Є. Гончарук**, канд. фіз.-мат. наук, доцент;  
**С.І. Качан**, канд. фіз.-мат. наук, доцент

Національний університет “Львівська політехніка”, м. Львів

## **ПРОБЛЕМА РАДОНОВОГО РИЗИКУ В ЕКОЛОГІЇ**

*У статті проаналізовано роль природного радіоактивного газу радону в сумарній дозі опромінення населення. Вказано шляхи розповсюдження радону в природі. Розглянуто ситуації, що зумовлюють накопичення радону в небезпечних концентраціях, та наведено шляхи зниження радонової небезпеки.*

**Ключові слова: радіація, радон, ризик, протирадонові заходи**

**Постановка завдання.** Інтерес до радіологічного впливу радону на населення виник на початку 80-х років ХХ ст. Встановлено, що концентрація радону в повітрі житлових будинків, особливо одноповерхових, часто перевищує рівень гранично допустимих концентрацій (ГДК), встановлених для працівників уранових копалень.

Відомо, що внесок природного випромінювання в середньорічну дозу опромінення людини становить близько 72% (все інше – техногенне опромінення). При цьому частка космічного випромінювання в загальній дозі опромінення від природних джерел становить майже 14%, зовнішнього і внутрішнього природного гамма-випромінювання – по 16%. Частка ж радону дорівнює 54% [1, 2]. Саме тому цей факт зумовлює значний інтерес до радонової проблеми: більше половини річної дози від усіх природних джерел випромінювання людина отримує внаслідок опромінення радоном легенів під час дихання.

Земна кора з моменту свого утворення містить природні радіоактивні елементи (ПРЕ), що в числі інших факторів створюють природний радіаційний фон. У гірських породах, ґрунті, атмосфері, воді, рослинах і тканинах живих організмів присутні радіоактивні ізотопи калію-40, рубідію-87 і члени трьох радіоактивних сімейств, що беруть початок від урану-238, урану-235 і торію-232. Ці материнські радіонукліди мають такий же вік, як і Земля – близько 4,5 млрд. років. Вони збереглися тому, що періоди напіврозпаду «засновників» радіоактивних сімейств є надзвичайно великими і становлять: для урану-238 -  $4,5 \cdot 10^9$  років, урану-235 -  $0,7 \cdot 10^9$  років, торію -  $14 \cdot 10^9$  років. Після довгого ланцюга перетворень таких ізотопів утворюються стабільні ізотопи свинцю [1].

Єдиним газоподібним продуктом, що утворюється в процесі розпаду представників усіх трьох сімейств ПРЕ, є радон. Найбільший внесок у газову складову ПРЕ здійснюють радіоактивні сімейства урану-238 і торію-232, у процесі розпаду яких утворюється радіоактивний

радон-222 і радон-220 (останній часто називають торон за іменем вихідного материнського нукліда).

Радон – це інертний газ без кольору і запаху, майже в 10 разів важчий за повітря, легко-розчинний у воді; температура кипіння становить 65°C.

Радон є альфа-випромінювачем. У процесі розпаду він продукує сімейство інших альфа-випромінювачів, які називають дочірніми продуктами розпаду (ДПР). На відміну від радону і торону, ДПР є не газами, а твердими речовинами, потужними джерелами альфа-випромінювання (нестабільні ізотопи свинцю, вісмуту, полонію і талію). Наприклад, при розпаді урану-238 виділяється вісім альфа-частинок, з яких чотири припадає на радон і його ДПР. Причому перші чотири альфа-частинки виділяються з напівперіодом близько 1 млрд. років (розпад уран→радій), а наступні три – з напівперіодом 3,825 дні, тобто інтенсивність альфа-випромінювання радону і ДПР є у багато разів вищою від інтенсивностей альфа-випромінювання урану і радію, разом узятих [3].

Радон і торон присутні, як і їхні материнські радіонукліди, у всіх гірських породах, а відповідно, й у будівельних матеріалах, вироблених з них. Ці інертні радіоактивні гази, що утворюються в процесі розпаду материнських радіонуклідів, негайно ж дифундують крізь капіляри ґрунту, мікротріщини гірських порід, захоплюються потоками інших газів і, незважаючи на обмежений час життя, можуть транспортуватися на значні відстані в земній корі і атмосфері. Причому природне зменшення кількості цих газів за рахунок виділення з матеріалів (процеси еманції – виділення з кристалічних ґраток і ексхаляції – випаровування або виділення з поверхні) і природного розпаду, постійно компенсується за рахунок розпаду радію і торію, що є присутніми у даному матеріалі.

Шкідливий вплив радону на людський організм було виявлено ще в XVI столітті, коли невідома хвороба шахтарів привернула увагу медиків: смертність від раку легень серед шахтарів була у 50 разів вищою, ніж серед іншого населення. Аналіз причин смерті працівників шахт на уранових копальнях Європи (у південній Німеччині і Чехословаччині), проведений значно пізніше, показав, що 30 - 50% гірників, які працювали в уранових шахтах, помирали від раку легень. Сучасні дані величин радонового ризику представлені в таблиці 1. Тому дослідження радіаційного впливу радону стали інтенсивно розвиватися.

**Методологічна частина.** Метою даної роботи є аналіз впливу радіоактивного газу радону і його дочірніх продуктів розпаду на людину та вивчення шляхів зниження радонового ризику.

Кількість розпадів радіоактивних ядер за 1 секунду в 1 кубічному метрі повітря визначає концентрацію радону в повітрі. Для радону це практично дорівнює числу генерованих у процесі розпаду альфа-частинок. За одиницю кількості розпадів (активність) прийнято 1 Беккерель, що дорівнює одному розпадові за секунду. Застосовується і позасистемна одиниця 1 Кюрі (Ки), що дорівнює числу розпадів 1 г радію-226, або  $3,7 \cdot 10^{10}$  розпадів у секунду (1 Кюрі =  $3,7 \cdot 10^{10}$  Беккерель). Середній вміст радону в повітрі приземної атмосфери становить приблизно  $3,7 \text{ Бк/м}^3$ , або  $10^{-10} \text{ Кюрі/м}^3$ .

Таблиця 1 - Ступінь радонового ризику (за даними Агентства навколишнього середовища США)

Концентрація радону			Очікувана кількість смертей від раку легень, спричинених радоном, у розрахунку на 100 тис. людей	Еквівалентний ризик		
пКі/л	Бк/м <sup>3</sup>	WL, МеВ/л		Порівнюваний рівень впливу	Опроміювання зовнішнє, бер/рік	Порівнюваний ризик
200	7400	2	440-770	У 1000 разів більше рівня відкритого простору (ВП)	28,0	У 60 разів більше, ніж курити дві пачки цигарок на день
100	3700	1	270-630	У 100 разів більше рівня ВП	14,0	2000 рентгеноскопій на рік
40	1480	0,4	120-380	У 100 разів більше рівня ВП	5,6	Куріння двох пачок цигарок на день
20	740	0,2	60-200	У 100 разів більше рівня ВП	2,8	Куріння однієї пачки цигарок на день
10	370	0,1	30-120	У 10 разів більше рівня ВП	1,4	500 рентгеноскопій на рік
4	148	0,04	13-50	У 10 разів більше рівня ВП	0,56	Паління півпачки цигарок на день
2	74	0,02	7-30	Рівень у приміщенні ВП	0,28	Ризик некурящого
1	37	0,01	3-13	Рівень відкритого простору	0,14	20 рентгеноскопій на рік

При оцінюванні радонового ризику необхідно знати, що внесок власне радону в опромінення людини відносно невеликий. При радіоактивній рівновазі між радоном і його ДПР цей внесок не перевищує 2%. Тому доза опромінення легень людини від ДПР радону визначається середньорічною величиною, еквівалентною рівноважній об'ємній активності (ЕРОА) радону (в Бк/м<sup>3</sup>) [3, 4], за формулою:

$$C_{Rn \text{ экв.}} = n_{Rn} \cdot F_{Rn} = 0,1046 \cdot n_{RaA} + 0,5161 \cdot n_{RaB} + 0,3793 \cdot n_{RaC},$$

де  $n_{Rn}$ ,  $n_{RaA}$ ,  $n_{RaB}$ ,  $n_{RaC}$  – об'ємні активності радона і його ДПР (RaA, RaB, RaC, як часто позначають радіонукліди Po-218, Po-214, Pb-214) Бк/м<sup>3</sup>, відповідно;  $F_{Rn}$  – коефіцієнт рівноваги, який визначається як відношення еквівалентної рівноважної об'ємної активності радону в повітрі до реальної об'ємної активності радону. На практиці завжди  $F_{Rn} < 1$  (0,4-0,5). Для пе-

реходу до одиниць WL (Working Level) необхідно помножити величину ЕРОА на коефіцієнт, рівний 34,6 МеВ/л.

**Обговорення результатів.** До 1980 року в жодній країні світу не встановлювалися нормативи вмісту радону і його ДПР у приміщеннях. Лише в останні десятиліття, коли стало зрозуміло, що радонова проблема, а також питання нормування і зниження доз опромінення населення має важливе значення, було прийнято відповідні нормативи для існуючих і проєктованих будівель, рекомендовані Міжнародною комісією з радіологічного захисту (МКРЗ) (табл. 2) [1, 7]. В Україні при перевищенні наведених нормативів проведення контрзаходів для дитячих санаторно-курортних та оздоровчо-лікувальних закладів, а також громадських приміщень є обов'язковим. Для житлових приміщень протирадонні заходи проводяться в обов'язковому порядку за умови проживання в них дітей віком менше 14 років, а в інших випадках – тільки за згодою власника житла. При цьому власнику житла повинна бути надана повна інформація про дози опромінення та ризику для здоров'я [7].

**Таблиця 2 - Нормативи ЕРОА радону в повітрі житлових будинків, Бк/м<sup>3</sup>**

Країна	Для будинків		Примітки
	побудованих	що здаються у експлуатацію	
Швеція	100	100	Прийнято в 1984 р.
Фінляндія	400	100	Прийнято в 1986 р.
США	80	-	Прийнято в 1986 р.
Канада	400	-	Запропоновано в 1985р.
Німеччина	200	-	Запропоновано в 1986 р.
Великобританія	200	50	Запропоновано в 1987 р.
Росія	200	100	Прийнято в 1990 р.
Україна	100	50	Прийнято в 1991р.

Радон потрапляє в атмосферу приміщень шляхом:

- а) проникнення з надр Землі;
- б) виділення з будівельних матеріалів, використаних при спорудженні будинку (цегли, цементу, щебеню);
- в) привнесення з водопровідною водою, побутовим газом [5].

Найбільше накопичення радону в приміщеннях відбувається внаслідок його виділення з ґрунтів та порід, на яких зведені будівлі.

Середній вміст урану-238 на материках близько 3 мкг/т. При цьому, результуюча активність тонни гірських порід становить приблизно 50 000 розпадів за секунду (50 000 Бк/т), що майже еквівалентно генерації 50 000 атомів радону.

У практиці геологічних досліджень частими є випадки, коли слаборадіоактивні породи у своїх порожнинах і тріщинах містять радон у кількостях, що є у сотні або тисячі разів більшими порівняно з високорадіоактивними гірськими породами. Спорудження будівель

над такими ділянками спричиняє безперервне надходження потоку ґрунтового повітря з високою концентрацією радону і створює серйозну радіологічну небезпеку для людей, що перебувають у цих приміщеннях. Відомі випадки, коли у виробничих підвальних приміщеннях об'ємна концентрація радону досягала 8 000-10 000 Бк/м<sup>3</sup>, що перевищувало норму в 40-50 разів [3, 6].

Таким чином, джерелами надходження радону, безпосередньо пов'язаними із земними надрами, є:

- власне гірські породи. Радон надходить в будівлю за рахунок його високого геохімічного фону в породах (наприклад, сланцях, гранітах, сієнітах). Підвищений місцевий геохімічний фон може створити значні за площею радононосні ділянки, у межах яких концентрація радону може перевищувати нормативи у десятки разів (до 1000 Бк/м<sup>3</sup>);

- радононосні тектонічні зони, що характеризуються різко аномальними (у багато разів перевищуючи місцевий геохімічний фон) концентраціями радону, чітко вираженими лінійними розмірами (як правило, ширина таких зон дорівнює сотням метрів при довжині в декілька тисяч метрів). Концентрація радону в атмосфері будинків, що розташовуються над такими зонами, може досягати надзвичайно високих значень (десятки тисяч Бк/м<sup>3</sup>).

Процеси ексхаляції зумовлюють присутність радону в приміщеннях і за рахунок його виділення з будівельних матеріалів. Часто спостерігаються випадки, коли будинки, збудовані з порівняно слаборадіоактивних за гамма-випромінюванням матеріалів, є вкрай небезпечними за рахунок значного виділення радону та низького рівня вентиляції у приміщеннях.

Поряд з цим, цементи часто характеризуються підвищеним вмістом природного радіоактивного ізотопу калію-40, що у процесі розпаду генерує тільки гамма-випромінювання. У цьому разі, на фоні відносно високого рівня гамма-випромінювання, не буде спостерігатися підвищений рівень концентрації радону. Отже, контроль інтенсивності гамма-випромінювання будівельних матеріалів за допомогою гамма-радіометрів не гарантує якісного контролю за радоном для споруджуваних з цих матеріалів будівель. Небезпеку будівельних матеріалів за радоном необхідно контролювати безпосередньо за радоном [8, 9].

Радон добре розчиняється у воді, тому він міститься у всіх природних водах, причому в глибинних підземних водах його вміст, як правило, більший ніж у поверхневих водостоках і водоймах. Наприклад, у підземних водах його концентрація може змінюватися від 4-5 Бк/л до 3-4 МБк/л, тобто в мільйон разів. У водах озер і рік концентрація радону, як правило, не перевищує 0,5 Бк/л, а у водах морів і океанів - 0,05 Бк/л.

Радон потрапляє з води у повітря за рахунок процесів ексхаляції-дегазації (з повітряних бульбашок, що містяться у воді). Найінтенсивніше цей процес відбувається при розбризкуванні, випаровуванні й кипінні води.

У різних країнах накопичено значний обсяг інформації щодо вмісту радону в житлових і службових приміщеннях (табл. 3) [1, 4, 6]. Для більшості регіонів України основним джерелом надходження радону-222 в повітря житлових приміщень є підстилаючий ґрунт, що зумовлено його геохімічними особливостями. Понад третини території України розташовано на Українському кристалічному щиті, який характеризується підвищеним вмістом трансюра-

нових елементів, продуктом розпаду яких є радон-222.

*Таблиця 3 - Вміст радону в будівлях*

Країна, регіон	Число обстежених будівель	Концентрація радону, Бк/м <sup>3</sup>
Канада	13450	17±4
Німеччина	5970	40 ±2
Фінляндія	2154	64 ±3
Італія	1000	25 ±3
Нідерланди	927	30 ±5
Швейцарія	400	-
підвал	-	720 ± 120
1-й поверх	-	228 ± 68
2-й поверх	-	127 ± 36
Швейцарія (Альпи)	100	-
підвал	-	926±210
1-й поверх	-	267 ± 73
2-й поверх	-	171 ±42
США	3000	72 ±5
Великобританія	2000	12 ±3
Україна	2000	450 ±35

Проблема надходження радону в повітря будівель пов'язана, в першу чергу, з величиною площі їх контактування з ґрунтом, наявністю та глибиною підвальних приміщень та ін. Приблизно однакова кількість радону надходить крізь зовнішні стіни і підлогу (ексхалюція крізь підлогу є на 20% більшою, однак площа стін ~ на 20-25 % більше площі підлоги). Найбільша кількість радону надходить крізь шви збірних елементів, місця з'єднань різних конструкцій та нещільності у будівлях.

Рівень концентрації радону і ДПР в атмосфері будинків значною мірою залежить від природної і штучної вентиляції приміщень, старанності шпаклювання вікон, стиків стін і вертикальних комунікаційних каналів, частоти провітрювання приміщень тощо. Наприклад, найбільш високі концентрації радону в житлових будинках спостерігаються в холодний період року, коли традиційно вживають заходів для утеплення приміщень, що зумовлює зменшення обміну повітря будівель з навколишнім середовищем [3]. Зниження радонового ризику у зведених будівлях забезпечує вірно виконана вентиляція: навіть однократний повітрообмін упродовж 1 години знижує концентрацію радону майже на два порядки [3, 9].

Заходи з протирадонового захисту ведуться за такими двома основними напрямками (табл. 4). У першому випадку мова йде про необхідність реконструкції будівель з метою проведення певних протирадонових заходів. У другому – протирадонові заходи повинні бути

передбачені на рівні архітектурного проекту, що за світовими даними більш економічно, ніж реконструкція, й складає до 3 % від кошторисної вартості будівництва.

**Таблиця 4 - Рекомендації з протирадонового захисту будівельного об'єкту**

Категорія прийняття рішень	Потужність поглиненої дози (ППД), мкГр·год <sup>-1</sup>	ЕРОА радону, Бк·м <sup>-3</sup> (середньорічна)	Рішення
I	<0,44	<50	Заходи не обов'язкові
II	<0,44	50-100	Рекомендується проведення мінімального комплексу протирадонових заходів; підсилення природної вентиляції приміщень; вентиляція підпільного простору та ін.
III	>0,44	>100	Проведення протирадіаційних заходів обов'язкове.
III	>0,44	<100	Мінімальний комплекс заходів: протирадонові заходи, герметизація перекриття першого поверху в споруді; вентиляція підпільного простору; підсилена природна вентиляція квартир; фарбування емульсійними або масляними фарбами стін; обклеювання стін шпалерами на полімерній основі; відведення радону з-під споруди за допомогою дренажного пристрою.
IV	>0,44	>100	Якщо заходи не дають зниження ЕРОА радону, вирішується питання про зміну призначення приміщення або обмеження перебування в ньому людей.

Основні протирадонові заходи полягають у:

- максимальному скороченні виділення радону з ґрунту;
- локалізації місць надходження радону в будівлю;
- зниження об'ємної активності радону в повітрі приміщень;
- зменшення рухливості (розповсюдження) радону, що надійшов до будівлі.

**Висновки.** Основними проблемами радонового ризику є:

1. Майже всі моделі радіаційних ризиків при опроміненні радоном отримані на основі аналізу даних щодо опромінення шахтарів. Достеменно невідомо, наскільки коректним є перенесення цієї моделі ризику на опромінення в житлових і виробничих будівлях.

2. Дотепер не існує надійної формалізованої математичної моделі, що описує процеси нагромадження радону, торону і їх ДПР в атмосфері приміщень з урахуванням усіх шляхів надходження, параметрів будівельних матеріалів, покриттів і т.п.

3. В Україні доступний обмежений масив даних щодо радонового ризику, а зважаючи на особливості латентного впливу радону і його ДПР на здоров'я і тривалість життя людини,

практично не проводяться необхідні дослідження і не впроваджуються протирадонові заходи.

Існують також проблеми, пов'язані з уточненням регіональних особливостей формування доз опромінення від радону і його ДПР, оскільки, як правило, геологічна обстановка більшості міст України вивчена погано.

### **Список використаної літератури**

1. Радиация: Дозы, эффекты, риск: Пер. с англ. М.: Мир, 1988, 79с.
2. Уткин В.И. Газовое дыхание Земли // Соросовский Образовательный Журнал. 1997. № 1, С. 57-64.
3. Жуковский М.В., Ярошенко И.В. Радон: Измерение, дозы, оценка риска. Екатеринбург: УрО РАН ИПЭ, 1997, 231 с.
4. Публикация 65 МКРЗ "Защита от радона-222 в жилых зданиях и на рабочих местах". М.: Энергоатомиздат, 1995, 78 с.
5. Крисюк Э.М. Радиационный фон помещений. М.: Энергоатомиздат, 1989, 257 с.
6. Иванов Є.А. Радіоекологічні дослідження. Навч. посібник. Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка, Львів, 2004, 149 с.
7. НРБУ – 97.
8. ДБН В.1.4-0.01-97 "Системи норм і правил зниження рівня іонізуючого випромінювання ПРН у будівництві. Основні положення".
9. ДБН В. 1.4-2.01-97 "Система норм та правил зниження рівня іонізуючих випромінювань природних радіонуклідів в будівництві. Радіаційний контроль будівельних матеріалів та об'єктів будівництва".

*Стаття надійшла до редакції 26.12.12 українською мовою*

**© Л.В. Жук, В.А. Васийчук, В.Е. Гончарук, С.И. Качан**

### **Проблема радонового риска в экологии**

*В статье проанализирована роль природного радиоактивного газа радона в общей дозе облучения населения. Указаны пути распространения радона в природе. Рассмотрены ситуации, обуславливающие накопление радона в опасных концентрациях, и представлены пути снижения радоновой опасности.*

**© L.V. Zhuk, V.O. Vasiytschouk, V.E. Goncharuk, S.I. Kachan**

### **The problem of radon hazards in ecology**

*The role of natural radioactive gas – radon in a population irradiation total doze is described. The ways of radon migration in a nature are shown. The situations resulting to radon accumulation in dangerous concentration are considered. The ways of reduction of radon's hazards are submitted.*