

УДК: 351.78:613.648.4:546.79(.296):316.77

Т. О. Павленко¹✉, А. М. Сердюк¹, А. П. Оперчук², М. В. Аксьонов¹, М. А. Фризюк¹,
О. Є. Тарасюк¹, О. В. Федоренко¹, О. В. Михайленко¹

¹Державна установа «Інститут громадського здоров'я ім. О.М. Марзєєва, НАМНУ»,
вул. Попудренка, 50, м. Київ, 02094, Україна

²Державна установа «Центр громадського здоров'я МОЗ України», вул. Ярославська, 41, м. Київ,
04071, Україна

РІВНІ ОПРОМІНЕННЯ НАСЕЛЕННЯ УКРАЇНИ В КОНТЕКСТІ ПЛАНУ ДІЙ ЩОДО ЗМЕНШЕННЯ РІВНІВ РАДОНУ В ПОВІТРІ ПРИМІЩЕНЬ

Мета: проаналізувати та оцінити наявну інформацію щодо активностей радону в повітрі приміщень в контексті реалізації плану дій щодо радону.

Об'єкт і методи. Об'єкт дослідження: рівні радону-222 в повітрі житлових будинків різних областей і відповідні радіаційні ризики для населення. Вимірювання проводили методом пасивної трекової радонометрії. Час експонування радонометрів становив не менше 30 днів в опалювальний сезон. Розрахунки радіаційних ризиків проводили за дозовими коефіцієнтами і математичними моделями МКРЗ.

Результати. Встановлено, що референтний рівень 300 Бк/м³ (радон газ) в цілому по країні перевищено у 16 % випадків. Середньгеометричне значення активностей радону склало 120 Бк/м³ і варіює від 35 до 265 Бк/м³ на рівні окремих областей, тобто активності радону на різних територіях країни можуть відрізнятися в 7,5 раза. Варіабельність активності радону на рівні окремих районів областей також значна. Встановлено, що при лог-нормальному розподілі і середньгеометричному значенні 75 Бк/м³ активності радону відрізняються майже у 10 разів на рівні окремих районів. Аналіз радіаційних ризиків населення встановив, що прогнозна смертність від радонового раку легенів на території України оцінюється у майже 8900 випадків щорічно, а прямі економічні збитки для країни – більш ніж 450 мільйонів доларів на рік.

Висновки. Дослідження рівнів радону встановили значну варіабельність його активностей на рівні окремих регіонів. Референтний рівень перевищено у 16 % будинків, але на рівні окремих областей відсоток перевищень варіює від 0,1 до 43,0 %. Інформація про рівні радону у будинках майже третини території країни відсутня. З метою ефективного реалізації плану дій має сенс запровадити зонування територій щодо радонебезпечності.

Ключові слова: радон у повітрі приміщень, референтний рівень, населення, радіаційний ризик, економічні збитки.

Проблеми радіаційної медицини та радіобіології. 2020. Вип. 25. С. 220–229. doi: 10.33145/2304-8336-2020-25-220-229

✉ Павленко Тетяна Олександрівна, e-mail: tpavlenko@ukr.net

T. O. Pavlenko¹✉, A. M. Serdiuk¹, A. P. Operchuk², M. V. Aksenov¹, M. A. Fryziuk¹, O. Ye. Tarasiuk¹, O. V. Fedorenko¹, O. V. Mykhailenko¹

¹State Institution «O.M. Marzjiev Institute for Public Health of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine», 50 Popudrenka St., Kyiv, 02094, Ukraine

²State institution «Public health center of the Ministry of health of Ukraine», 41 Yaroslavska St., Kyiv, 04071, Ukraine

EXPOSURE LEVELS OF UKRAINIAN POPULATION IN THE CONTEXT OF AN ACTION PLAN TO REDUCE INDOOR RADON LEVELS

Objective. To analyze and evaluate the available information to indoor radon concentration in the context of the implementation of the radon action plan.

Methods. Object of study: indoor radon-222 in dwellings by area and corresponding radiation risks of the population. Measurements were performed using passive track radonometry. The exposure time of the radonometers is at least 30 days during heating season. Radiation risk calculations were performed according to the dose coefficients and mathematical models of the ICRP.

Results. It was found that for the whole country, reference level 300 Bq/m³ (radon gas) is exceeded in 16 % of cases. It was found that geometric mean of radon gas levels was 120 Bq/m³ and varies from 35 to 265 Bq/m³ by different area, namely the difference between radon levels in different territories of the country can be up to 7.5 times. Variability of radon levels at the district level is also significant. It was found, radon activity concentration differing by almost 10 times by districts with lognormal distribution and a geometric mean of 75 Bq/m³. The analysis of radiation risks of the population has established that estimated annual number of lung cancer deaths due to radon in Ukraine is almost 8,900 cases; and a direct economic loss for the country are estimated at more than \$ 450 million a year.

Conclusions. Surveys of radon levels demonstrated significant variation in radon concentrations between different regions. For the whole country, reference level (300 Bq/m³) is exceeded on above 16 % of the dwellings, but percentage of exceeding varies from 0.1 to 43.0 % by different area. Information on indoor radon concentrations in almost a third of the country is non-available. For an effective implementation of the Action plan, it makes sense to introduce radon risk mapping.

Key words: indoor radon, reference level, population, radiation risk, economic cost.

Problems of Radiation Medicine and Radiobiology. 2020;25:220-229. doi: 10.33145/2304-8336-2020-25-220-229

ВСТУП

Більше 70 % сумарної дози населення України обумовлено опроміненням радоном, який накопичується в повітрі будинків. Радон – радіоактивний газ, який утворюється при розпаді природних радіонуклідів уранового ряду. Період напіврозпаду цього радіонукліду невеликий – 3,8 доби. Дочірні продукти його розпаду – полоній, свинець, вісмут – також короткоіснуючі. Вони або дуже швидко розпадаються, випромінюючи альфа-частинки, або приєднуються до частинок пилу чи вологи, утворюючи радіоактивний аерозоль, який при диханні потрапляє в легені і опромінює бронхіальний епітелій, створюючи додатковий ризик захворювання на рак легенів. Проблема радону є однією з головних у практиці радіаційного захисту для більшості країн

INTRODUCTION

More than 70 % of the total dose of Ukrainian population is caused by radon accumulating in the air of buildings. Radon is a radioactive gas that is formed during the decay of natural uranium radionuclides. The half-life of this radionuclide is short, 3.8 days. Its daughter products of decay (polonium, lead, bismuth) are also short-lived, either decaying very quickly, emitting alpha particles, or attaching to dust or moisture particles, forming a radioactive aerosol that enters the lungs during breathing and irradiates the bronchial epithelium, creating additional risk of lung cancer. The radon problem is one of the major issues of radiation protection in the most countries of the world, as well as the considerable

✉ Tetiana O. Pavlenko, e-mail: tpavlenko@ukr.net

світу, про що свідчить значна увага, яку приділяють цьому питанню Міжнародна комісія з радіаційного захисту (МКРЗ) [1–3] та Міжнародне агентство з атомної енергії (МАГАТЕ) [4, 5].

Вивчення проблеми радону в Україні було розпочато у 1989 році в рамках науково-дослідної роботи «Науково-практична програма «Радон» по зменшенню доз опромінення населення, що постраждало внаслідок аварії на ЧАЕС» (1989–1999 рр.). На цьому етапі були створені методична та метрологічна бази контролю радону в повітрі будинків, запроваджена практика вимірювань радону у повітрі будинків, яка відповідає міжнародним вимогам контролю радону, та досліджені закономірності формування рівнів радону в повітрі будинків [6–8].

У подальшому було обстежено більше 5 тисяч будинків у різних регіонах країни (сьогодні вже понад 30 тисяч будинків), визначені дози опромінення населення, проаналізовані відповідні радіаційні ризики та обґрунтована доречність втручання з боку держави. Отримані результати цього етапу дозволили науково обґрунтувати необхідність впровадження нормативів щодо рівнів радону у повітрі приміщень, розробити їх та впровадити у практику радіаційного захисту (Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97)) [9].

На наступному етапі в рамках міжнародного проекту UA601A «Reduction of risks caused by exposure to radon gas and natural radiation» (2007–2013 рр.) були розроблені 5 курсів-тренінгів для професіоналів з питань радону, за якими було підготовлено фахівців для реалізації Кіровоградської регіональної програми «Стоп-радон» (2010–2015 рр.). За три роки за цією програмою було обстежено понад 2 тисячі шкіл та дитячих садочків, у 289 школах, типових для України проєктів, проведено протирадонові заходи та оцінено їхню ефективність. В середньому активності радону в цих школах і дитячих садочках вдалося зменшити вдвічі. У рамках цього проєкту були також випробувані сучасні методи комунікацій з питань радіаційних ризиків з населенням та іншими стейкхолдерами, розглянуті інші питання [10–12].

Усі приведені дослідження та практичні завдання складають підґрунтя для подальшої успішної реалізації радонового плану дій. Метою цього плану є впровадження вимог Директиви Ради 2013/59/Євратом [13] щодо зменшення рівнів радону в житлових і громадських будинках, на робочих місцях та зменшення відповідних радіаційних ризиків для населення України.

attention paid to this issue by the International Commission on Radiation Protection (ICRP) [1–3] and the International Atomic Energy Agency (IAEA) [4, 5].

The study of radon in Ukraine was initiated in 1989 as part of the research program «Scientific and Practical Program «Radon» for Reducing Dose of Population Affected by the Chernobyl NPP Accident» (1989–1999). At this stage, methodological and metrological bases for indoor radon control have been established, and the practice of indoor radon measuring has been introduced, which meets international requirements for radon control and the study of the pattern of indoor radon levels formation [6–8].

Subsequently, more than 5,000 buildings were surveyed in different regions of the country (more than 30,000 buildings to date), population exposure doses were determined, relevant radiation risks were analyzed, and the appropriateness of state intervention was substantiated. The results obtained at this stage made it possible to scientifically substantiate the need to implementation standards for indoor radon levels, to develop them and to implement into the practice of radiation protection (Radiation Safety Standards of Ukraine (RSSU-97)) [9].

In the next phase, within the framework of the international project UA601A «Reduction of risks caused by exposure to radon gas and natural radiation» (2007–2013), 5 training courses were created for radon professionals, using these courses specialists were trained for the implementation of Kirovohrad regional program «Stop radon» (2010–2015). Over 2,000 schools and kindergartens were surveyed over the three years of the program, and in 289 typical schools for Ukraine, remedial measures were conducted and their effectiveness was assessed. On average, radon activity concentration in these schools and kindergartens was halved. Within the framework of this project modern methods of communication on radiation risks with the population and other stakeholders were tested, as well as other issues [10–12].

All the above studies and practical tasks form the basis for the further successful implementation of the radon action plan. The purpose of this plan is to implement the requirements of European Directive 2013/59/Euratom [13] for reducing radon exposure in dwellings, buildings with public access, workplaces and for reducing relevant radiation risks to Ukrainian population.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Проаналізувати та оцінити наявну інформацію щодо активностей радону в повітрі приміщень в контексті реалізації плану дій щодо радону.

ОБ'ЄКТИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єкт дослідження: рівні радону-222 в повітрі житлових будинків різних областей і відповідні радіаційні ризики для населення.

Методи досліджень. До аналізу прийняті тільки результати вимірювань радону в повітрі приміщень, виконані методом пасивної трекової радонометрії з експозицією не менше 30 діб в опалювальний сезон. Всього проаналізовано результати обстеження 26 943 будинків, як багатопверхових, так і приватних (родинних).

Гарантії якості вимірювань радону забезпечували калібруванням детекторів у радоновій атмосфері з відомою об'ємною активністю (ОА), яка має в системі Держстандарту України статус робочого еталону одиниці ОА радону-222.

Розрахунки радіаційних ризиків проведено за математичними моделями та дозовими коефіцієнтами МКРЗ [3, 14]. Через брак офіційної інформації щодо структури житлового фонду оцінки були зроблені за аналізом демографічних даних і припущенням, що середня родина складається з 3 осіб. Для оцінки збитків були використані офіційні дані про величину внутрішнього валового прибутку Міністерства фінансів за 2018 рік.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Український план дій

Типовий план дій щодо радону, за рекомендаціями Євратому та стандартів безпеки МАГАТЕ, складається з трьох частин: регуляторного, науково-практичного блоків і блоку протирадонових заходів та оцінки їх ефективності [4, 5, 13].

За своєю структурою український національний план дій також можна розділити на ці блоки. Перший – стосується обов'язків держави. Уряд має визначити компетентну організацію, відповідальну за реалізацію плану дій, та забезпечити фінансування основних напрямків робіт. Головна організація має розробити, а потім застосувати на практиці стратегію реалізації окремих завдань і комунікацій з усіма установами за окремими напрямками плану дій, працювати зі стейкхолдерами, забезпечувати інформування державних органів влади і населення про величину встановлених радіаційних ризиків від радону та надавати інформацію про шляхи їх зменшення (інформаційна складова). До обов'язків дер-

OBJECTIVE

Analyze and evaluation of the available information on the indoor radon activity in the context of the implementation of the radon action plan.

STUDY OBJECT AND METHODS

Object of study: indoor radon-222 in dwellings by area and corresponding radiation risks of the population.

Methods. Measurements of indoor radon have to be performed using passive track radonometry with an exposure of at least 30 days during heating season. Results of the survey of 26,943 houses, as many high-rise and private (family) houses, were analyzed.

Quality assurance for radon measurements was provided by the calibration of detectors in radon atmosphere with known concentration, that has the status of working standard of the unit of concentration of radon-222 in the State Standard System of Ukraine.

Radiation risk calculations were performed using mathematical models and ICRP dose coefficients [3, 14]. In the absence of official information on the structure of the housing stock, estimates were made based on demographic analysis and the assumption that the average family was composed of 3 people. Official estimates of the Ministry of Finance's gross domestic profit for 2018 were used to estimate the losses.

RESULTS AND DISCUSSION

The Ukrainian Action Plan

The typical radon action plan, as recommended by Euratom and the IAEA safety standards, consists of three parts: a regulatory, scientific and practical unit and a unit of radon protective measures and an assessment of their effectiveness [4, 5, 13].

By structure, Ukrainian National Action Plan can also be divided into these blocks. The first is about the state's responsibilities. The government should designate a competent organization responsible for implementing the action plan and ensure funding for the main areas of work. The main organization should develop, and then put into practice, a strategy for the implementation of individual tasks and communications with all agencies in specific areas of the action plan, work with stakeholders, provide information to state authorities and the public about the level of established radiation risks from radon and provide information on ways to reduce them (information component). The state's responsibili-

жави належить також імплементація референтних рівнів для радону у повітрі будинків і на робочих місцях, затвердження регламентів щодо порядку проведення вимірювань радону, алгоритму реалізації протирадонових заходів та оцінки їх ефективності, акредитації установ, які будуть працювати за окремими напрямками, тощо. На цьому етапі держава повинна також визначити структури, відповідальні за контроль реалізації заходів у громадських спорудах та будинках і контроль за роботодавцями щодо активності радону на робочих місцях.

Другий блок заходів плану дій має науково-практичний характер і стосується організації сервісів вимірювань рівнів радону в повітрі приміщень (моніторинг) та ґрунтах (протирадонові заходи), розробки та затвердження протоколів вимірювань і будівельних регламентів, забезпечення системи гарантій якості вимірювань, організації національних баз даних щодо рівнів радону в будинках і на робочих місцях, розробки інформаційних систем для населення та аналітичних звітів для уряду.

І, нарешті, третій блок завдань – суто практичний: підготовка фахівців, реалізація протирадонових заходів та оцінка їх ефективності, робота зі стейкхолдерами тощо.

У підсумку план дій передбачає систематичний аналіз отриманих результатів за всіма напрямками, аналіз ефективності реалізації плану дій і його розроблення на наступні роки.

На першому етапі Директиви радять спочатку проаналізувати наявну інформацію про рівні радону в будинках (за умови, що вона є) і, якщо ці дані репрезентативні, оцінити радіаційні ризики. Надалі за цими даними проводиться окреслення радонебезпечних територій, розробляється стратегія подальших досліджень (оптимізація моніторингу радону в зоні відповідальності держави). По суті, це процедури оптимізації практичної частини плану дій, яка дозволяє мінімізувати витрати держави та визначити пріоритетні регіони для проведення протирадонових заходів.

Рівні радону в повітрі приміщень

Аналіз статистичних даних щодо рівнів радону в повітрі приміщень встановив, що частотний розподіл має логнормальний характер. Діючий в Україні норматив (100 Бк/м³ в одиницях еквівалентної рівноважної ОА радону або 250 Бк/м³ в одиницях ОА, або радону газу) був перевищений у 21 % обстежених будинків, а рекомендований МАГАТЕ референтний рівень 300 Бк/м³ (радон газ) [4] – у 16 % випадків. На рис. 1 приведено зведені дані щодо рівнів радону в

ties include the implementation of reference levels for indoor radon in dwellings and workplaces, approval of regulations on the procedure for radon measurements, algorithm for implementation of radon protective measures and evaluation of their effectiveness, accreditation of institutions that will work in specific areas, etc. At this stage, the state should also identify organizations responsible for monitoring of the implementation of measures in buildings with public access and for monitoring employers concerning radon activity in workplaces.

The second block of measures of the action plan is scientific and practical and concerns the conducting surveys of indoor radon concentrations (monitoring) and soil gas concentrations (radon remedial measures), the development and approval of measurement protocols and building codes, providing measurement assurance, organization of national databases of radon levels in dwellings and workplaces, development of information systems for public and analytical reports for the government.

Finally, the third block of tasks is purely practical: training specialists, implementing of radon remedial measures and evaluating their effectiveness, working with stakeholders, and more.

In conclusion, the action plan provides for a systematic analysis of the results obtained in all areas, an analysis of the effectiveness of the action plan implementation and its development for the coming years.

In the first phase, the Directives advise initially to analyze the available information on radon levels in houses (if available) and, if representative, to evaluate radiation risks. Further, according to these data, mapping of radon-prone areas is carried out, and a strategy for further research (optimization of radon monitoring in the area of state responsibility) is developed. In essence, it is procedure of optimization of the Action Plan in its practical part, which helps to minimize government spending and identify priority regions for radon protective measures.

Study of indoor radon levels

Statistical analysis of indoor radon levels shown lognormal frequency distribution. Current level in Ukraine (100 Bq/m³ of equilibrium equivalent radon concentration and 250 Bq/m³ in terms of activity concentration or radon gas) was exceeded on above 21 % of surveyed dwellings, and the recommended IAEA reference level 300 Bq/m³ (radon gas) [4] was exceeded on above 16 % of cases. Indoor radon-222 concentrations in

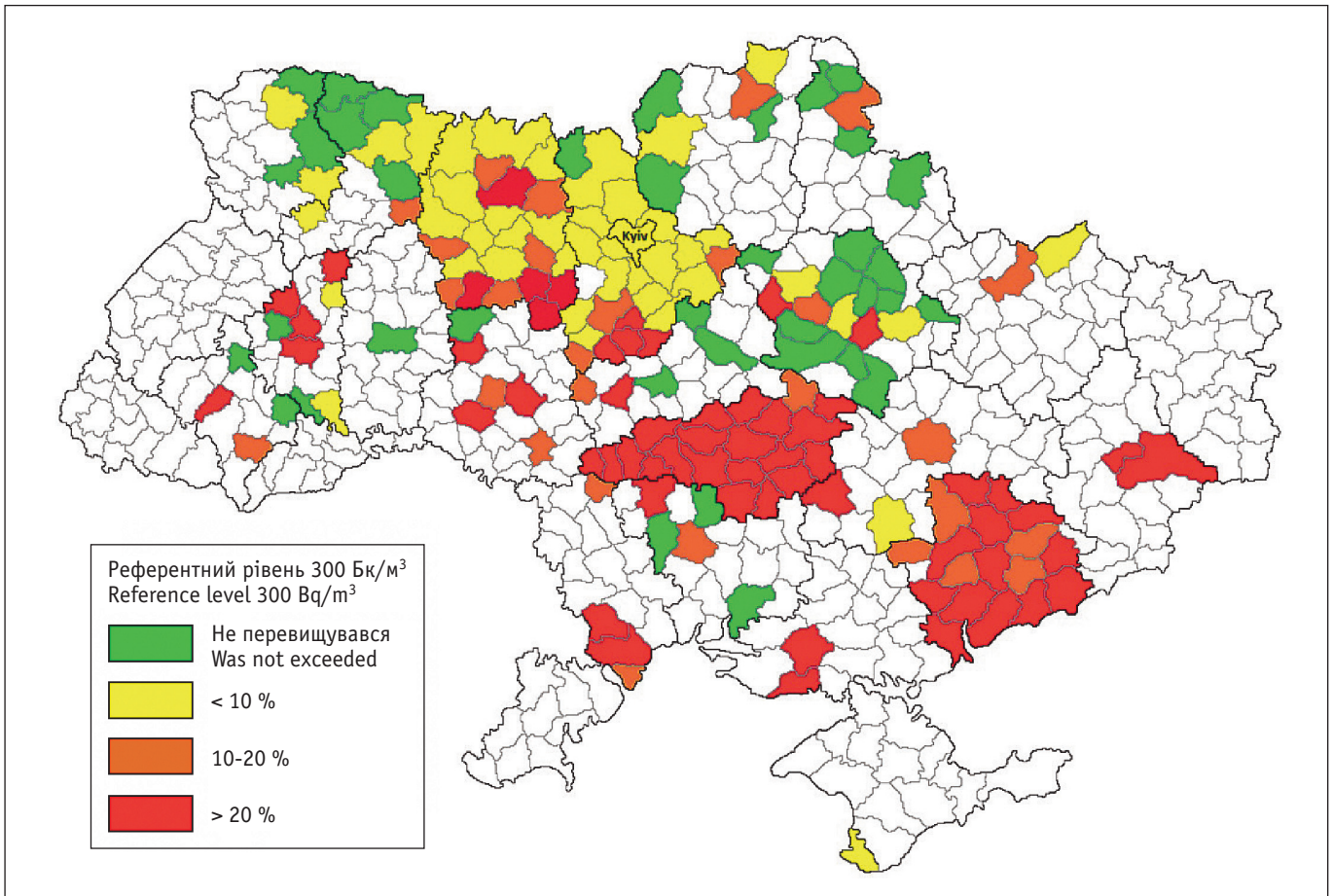


Рисунок 1. Відсоток перевищень референтного рівня радону в повітрі житлових будинків різних регіонів України

Figure 1. The exceeding reference level for indoor radon concentrations in dwellings

повітрі житлових приміщень на рівні районів у контексті відповідності референтному рівню.

Встановлено, що середньгеометричне значення активностей радону варіює від 35 до 265 Бк/м³ на рівні окремих областей, тобто, різниця між рівнями радону на різних територіях країни може складати 7,5 раза. Про відповідну варіабельність рівнів радону свідчать і величини стандартних відхилень, які можуть в 1,5-раза перевищувати середньгеометричне значення (табл. 1) по області. Такі результати свідчать, що є сенс аналізувати первинну інформацію на більш детальному рівні, наприклад, на рівні районів.

Як приклад, приведено аналіз рівнів радону у будинках Київської області, за винятком м. Київ (табл. 2). Якщо проаналізувати результати вимірювань рівнів радону в повітрі понад 9 тисяч будинків, очевидно, що ця величина варіює в дуже широкому діапазоні (від 28 до 240 Бк/м³) при логнормальному розподілі і середньгеометричному значенні 75 Бк/м³, тобто, активності відрізнялися майже у 10 разів. При цьому величина стандартного відхилення становила 158 Бк/м³ і варіювала від 45 до 273 Бк/м³. Ще більша

context compliance to reference level are shown in Fig 1.

It was found that geometric mean of radon gas levels varies from 35 to 265 Bq/m³ by different districts, namely the difference between radon levels in different territories of the country can be up to 7.5 times. The corresponding variability of radon levels is indicated by standard deviations, which may be 1.5 times the geometric mean (Table 1) by regions. These results indicate that it makes sense to analyze the primary information at a more detailed level, for example at the district level.

As an example, the analysis of radon levels in the houses of the Kyiv region is given (Table 2), except Kyiv city. If was analyzed the results of indoor radon measurements in more than 9 thousand houses, it is obvious that this value varies over a very wide range (from 28 to 240 Bq/m³) with lognormal distribution and a geometric mean of 75 Bq/m³, i.e. activity concentration differing by almost 10 times. The standard deviation was 158 Bq/m³ and varied from 45 to 273 Bq/m³. Even greater variability of

Таблиця 1

Основні статистичні дані щодо вмісту радону в повітрі обстежених будинків (Бк/м³)

Table 1

Statistics data of indoor radon concentration (Bq/m³)

Область / Region	Кількість будинків Number of houses	Середнє геометричне ²²² Rn газ Geometric mean ²²² Rn gas	Стандартне відхилення ²²² Rn газ Standard deviation ²²² Rn gas	Відсоток перевищень ²²² Rn газ Percentage excess ²²² Rn gas		
				250	300	500
Івано-Франківська / Ivano-Frankivsk	127	113	123	9,5	7,9	3,2
Вінницька / Vinnytsia	226	103	178	22,6	16,8	5,8
Волинська / Volyn	1467	35	30	0,3	0,1	0,0
Дніпропетровська / Dnipropetrovsk	904	185	243	41,9	32,2	13,8
Житомирська / Zhytomyr	5724	103	155	16,3	10,7	3,3
Запорізька / Zaporizhzhia	946	160	243	36,9	29,7	12,7
Кіровоградська / Kirovohrad	3569	175	285	38	31,7	13,7
Київська / Kyiv	9229	75	158	13,5	10,0	3,4
Миколаївська / Mykolaiv	103	90	245	13,6	10,7	9,7
Одеська / Odesa	220	113	163	20,0	13,2	2,3
Полтавська / Poltava	418	60	105	8,9	6,7	1,2
Рівненська / Rivne	1963	35	65	2,8	1,8	0,3
Сумська / Sumy	147	48	70	3,4	2,0	0,7
Тернопільська / Ternopil	140	223	288	45,8	35,0	17,1
Харківська / Kharkiv	81	140	115	23,5	13,6	1,2
Херсонська / Kherson	60	265	255	53,3	43,3	16,7
Хмельницька / Khmelnytskyi	35	98	73	8,6	0,0	0,0
Черкаська / Cherkasy	177	168	218	38,4	29,9	10,7
Чернігівська / Chernihiv	1344	58	78	2,9	1,6	0,2
Україна / Ukraine	26943	120	157	21,0	16,0	6,0

варіабельність активностей радону зафіксована на рівні окремих населених пунктів – до двох порядків, тобто, активності радону у двох сусідніх будинках відрізнялися в десятки разів.

В цілому по області активності радону у 10 % обстежених будинків перевищують міжнародний референтний рівень 300 Бк/м³, а це означає, що тільки у Київській області близько 170 тисяч осіб проживають у будинках з підвищеними радоновими ризиками. Якщо оцінити радіаційні ризики цього регіону, то за останніми демографічними даними прогнозу кількість додаткових смертей від раку легенів можна оцінити у 280 випадків на рік [14], що складає прямих збитків у 13,5 млн доларів для бюджету щорічно [15].

Відповідні оцінки для України в цілому було також проведено за прийнятими у світовій практиці методами оцінки радіаційних ризиків [3] і дозовими коефіцієнтами Публікації 137 МКРЗ [3] та встановлено, що прогнозна смертність від радонового раку легенів на території України оцінюється у майже 8900 випадків щорічно, а це – прямі збитки для країни тільки за рахунок неучасті померлих осіб у валовому внутрішньому продукті понад 450 мільйонів доларів тільки за 2018 рік (оцінки проводились за винятком внеску населення неконтрольова-

activity concentration is recorded at the individual settlements level, up to two orders of magnitude, i.e. radon activity concentration in two neighboring houses differs by ten times.

In general radon activity concentration in this region exceed the international reference level of 300 Bq/m³ in 10 % of the surveyed houses, so only in the Kyiv region about 170,000 people live in dwellings with increased radon risk. If was estimated the radiation risk for this region, according to the latest demographics, expected number of additional deaths from lung cancer can be 280 cases a year [14], representing a direct cost to \$ 13.5 million annually for the budget [15].

Appropriate assessments for whole Ukraine also been performed using internationally accepted radiation risk assessment methods [3] and dose coefficients of ICRP Publication 137 [3], and it was found that estimated number of lung cancer deaths due to radon is almost 8,900 cases annually, that is a direct cost to the country due only to the non-participation of deceased persons in Gross Domestic Product of more than \$ 450 million in 2018 (estimated excluding contribution of the population on uncontrolled territories of the

Таблиця 2

Основні статистичні параметри щодо активностей радону у повітрі обстежених будинків сільського типу Київської області (Бк/м³)

Table 2

Basic statistical parameters for indoor radon concentration in rural houses of Kyiv region, Bq/m³)

Район / District	Середнє геометричне ²²² Rn газ	Стандартне відхилення ²²² Rn газ	Відсоток перевищень ²²² Rn газ Percentage excess ²²² Rn gas		
	Geometric mean ²²² Rn gas	Standard deviation ²²² Rn gas	250	300	500
Баришівський / Baryshivka	45	45	18,6	6,3	0,6
Білоцерківський / Bila Tserkva	120	118	15,6	10,6	2,0
Богуславський / Bohuslav	175	158	40,4	30,5	5,9
Бориспільський / Boryspil	55	90	3,1	2,5	0,6
Бородянський / Borodianka	65	165	7,4	5,7	1,8
Броварський / Brovary	48	58	0,8	0,8	0,8
Васильківський / Vasylkiv	50	90	6,0	4,7	0,9
Вишгородський / Vyshhorod	55	145	5,9	4,0	1,8
Володарський / Volodarka	43	85	4,2	2,1	1,4
Згурівський / Zhurivka	50	48	1,5	0,8	0,0
Іванківський / Ivankiv	40	60	1,1	0,9	0,3
Кагарлицький / Kaharlyk	118	120	16,8	9,8	1,4
Києво-Святошинський / Kyievo-Sviatoshyh	48	58	1,9	1,9	0,0
Макарівський / Makariv	50	58	1,6	0,7	0,0
Миронівський / Myronivka	110	90	9,4	6,3	0,0
Обухівський / Obukhiv	90	113	14,7	8,3	1,4
Переяславський / Pereiaslav	63	60	1,7	1,0	0,0
Поліський / Poliske	35	20	0,3	0,0	0,0
Рокитнянський / Rokytne	233	273	48,4	41,2	23,6
Ставищенський / Stavshche	240	133	53,3	34,4	5,6
Сквирський / Skvyra	93	75	2,9	2,9	0,0
Таращанський / Tarashcha	160	150	30,2	21,3	4,4
Тетіївський / Tetiiv	125	138	20,5	13,9	2,5
Яготинський / Yahotyh	93	133	12,9	12,2	2,7

них територій країни) [14]. Для порівняння, радонні ризики населення США оцінено у 21 тисячу смертей на рік, а відповідні прямі збитки – у 44 млрд доларів на рік [16].

Таким чином, проведене дослідження довело, що запровадження радонового плану дій в Україні є, безперечно, доцільним.

ВИСНОВКИ

1. Дослідження рівнів радону встановили значну варіабельність його активностей на рівні окремих регіонів. Референтний рівень (300 Бк/м³) в цілому по країні перевищено у 16 % будинків, але на рівні окремих областей відсоток перевищень варіює від 0,1 до 43 %.
2. Інформація про рівні радону у будинках майже третини території країни відсутня.
3. З метою ефективною реалізації плану дій має сенс запровадити зонування територій щодо радоннебезпечності. Категорія радоннебезпечності території має визначатись за кількістю будинків, активності радону у яких перевищують встановлений референтний рівень.

country) [14]. For comparison, radon risk in the US population is estimated to cause 21,000 deaths per year, and corresponding direct costs amount about \$ 44 billion per year [16].

Thus, the conducting study showed that initiation of Radon Action Plan is undoubtedly appropriate in Ukraine.

CONCLUSIONS

1. Radon measurements demonstrated significant variability of radon concentrations amount different regions. For the whole country, the recommended reference level (300 Bq/m³) is exceeded on above 16 % of the dwellings, varying from 0.1 % to 43 % in different areas.
2. Information on indoor radon concentrations for almost one third of the country is non-available.
3. For an effective implementation of the Radon Action Plan, an introduction of radon risk map may be helpful. Radon risk category for area should be assigned in accordance with the number of buildings expected to exceed the national reference level.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ICRP Publication 115. Lung cancer risk from radon and progeny and statement on radon. *Ann. ICRP*. 2010. Vol. 40 (1). 64 p.
2. ICRP Publication 126. Radiological protection against radon exposure. *Ann. ICRP*. 2014. Vol. 43 (3). 73 p.
3. ICRP Publication 137. Part 3. Occupational intakes of radionuclides. *Ann. ICRP*. 2017. Vol. 46 (3-4). 486 p.
4. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. General Safety Requirements. No GSR Part 3. Vienna : IAEA, 2014. 436 p.
5. Protection of the public against exposure indoors due to radon and other natural sources of radiation. IAEA specific safety guide No. SSG-32. Vienna : IAEA, 2015. 90 p.
6. Pavlenko T. A., Los I. P. Indoor ²²²Rn levels and irradiation doses on the territory of Ukraine. *Radiat. Meas.* 1995. Vol. 25 (1-4). P. 595-600. URL: [https://doi.org/10.1016/1350-4487\(95\)00307-X](https://doi.org/10.1016/1350-4487(95)00307-X).
7. Pavlenko A., Los I. P., Aksenov N. V. Exposure doses due to indoor Rn-222 in Ukraine and basic directions for their decrease. *Radiat. Meas.* 1997. Vol. 28, no. 1-6. P. 733-738. URL: [https://doi.org/10.1016/S1350-4487\(97\)00174-1](https://doi.org/10.1016/S1350-4487(97)00174-1).
8. Кравченко Н. И., Склярів В. В., Яковлева Л. Н. Рабочие средства измерений активности радона и его дочерних продуктов распада. *Украинский метрологический журнал*. 1999. № 4. С. 40-44.
9. Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97): Державні гігієнічні нормативи. ДГН 6.6.1.-6.5.001-98. Київ, 1998. 135 с.
10. Павленко Т. О. Рівні радону в повітрі будинків України. *Довкілля та здоров'я*. 2007. № 2 (41). С. 22-25.
11. Pavlenko T., German O., Frizyuk M., Aksenov N., Operchuk A. The Ukrainian pilot project «Stop Radon». *Nucl. Technol. Radiat. Protect.* 2014. Vol. 29, no. 2. P. 142-148. doi: 10.2298/NTRP1402142P.
12. Pavlenko T., German O., Aksenov N., Fryzyuk M., Operchuk A. Radon remediation efficiency assessment in Kirovograd region, Ukraine. *Nucl. Technol. Radiat. Protect.* 2018. Vol. XXXIII, No. 3. P. 317-323. URL: <https://doi.org/10.2298/NTRP1803317P>.
13. Council Directive 2013/59/Euratom of 5 December 2013 Laying Down Basic Safety Standards for Protection against the Dangers Arising from Exposure to Ionising Radiation, and Repealing Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom and 2003/122/Euratom. *Official Journal of the European Union*. 2014. Vol. 57, L13. 73 p.
14. ICRP Publication 55. Optimization and decision making in radiological protection. *Ann. ICRP*. 1989. Vol. 20 (1). 60 p.
15. Населення України. Чисельність населення України в 2019 р. Мінфін. URL: <https://index.minfin.com.ua/ua/reference/people/2019/>.
16. EPA Assessment of Risks from Radon in Homes. EPA 402-R-03-003. June 2003. URL: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-05/documents/402-r-03-003.pdf>.

ІНФОРМАЦІЯ ПРО АВТОРІВ

Павленко Тетяна Олександрівна, доктор біологічних наук, професор, завідувача лабораторією радіаційного

REFERENCES

1. ICRP Publication 115. Lung cancer risk from radon and progeny and statement on radon. *Ann ICRP*. 2010;40(1):1-64.
2. ICRP Publication 126. Radiological protection against radon exposure. *Ann ICRP*. 2014;43(3):5-73.
3. ICRP Publication 137. Part 3. Occupational intakes of radionuclides. *Ann ICRP*. 2017;46(3-4):1-486.
4. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. IAEA General Safety Requirements. No GSR Part 3. 2014:1-436.
5. Protection of the public against exposure indoors due to radon and other natural sources of radiation. IAEA Specific Safety Guide No. SSG-32. 2015:1-90.
6. Pavlenko T. A., Los I. P. Indoor ²²²Rn levels and irradiation doses on the territory of Ukraine. *Radiat Meas.* 1995;25(1-4):595-600. Available from: [https://doi.org/10.1016/1350-4487\(95\)00307-X](https://doi.org/10.1016/1350-4487(95)00307-X).
7. Pavlenko TA, Los IP, Aksenov NV. Exposure doses due to indoor Rn-222 in Ukraine and Basic Directions for Their Decrease. *Radiat Meas.* 1997;28(1-6):733-738. Available from: [https://doi.org/10.1016/S1350-4487\(97\)00174-1](https://doi.org/10.1016/S1350-4487(97)00174-1)
8. Kravchenko NI, Sklyarov VV, Yakovleva LN. [Working instruments for measuring the activity of radon and its daughter decay products]. *Ukrainian Metrological Journal*. 1999;4:40-44. Ukrainian.
9. [Radiation Safety Standards of Ukraine (RSSU-97): State hygiene standards. SHS 6.6.1.-6.5.001-98]. Kyiv;1998:1-135. Ukrainian.
10. Pavlenko TO. [Radon levels in the air of houses in Ukraine]. *Environment & Health*. 2007;2(41):22-25. Ukrainian.
11. Pavlenko T, German O, Frizyuk M, Aksenov N, Operchuk A. The Ukrainian pilot project «Stop Radon». *Nucl Technol Radiat Protect.* 2014;29(2):142-148. doi: 10.2298/NTRP1402142P.
12. Pavlenko T., German O., Aksenov N., Fryzyuk M., Operchuk A. Radon remediation efficiency assessment in Kirovograd region, Ukraine. *Nucl Technol Radiat Protect.* 2018;33(3):317-323.
13. Council Directive 2013/59/Euratom of 5 December 2013 Laying Down Basic Safety Standards for Protection against the Dangers Arising from Exposure to Ionising Radiation, and Repealing Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom and 2003/122/Euratom. *Official Journal of the European Union*. 2014;57(L13):1-73.
14. ICRP Publication 55. Optimization and decision making in radiological protection. *Ann ICRP*. 1988;20(1):1-60.
15. [Population of Ukraine. Population of Ukraine in 2019. Ministry of Finance]. Available from : <https://index.minfin.com.ua/ua/reference/people/2019/>. Ukrainian.
16. EPA Assessment of Risks from Radon in Homes. EPA 402-R-03-003. June 2003. Available from : <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-05/documents/402-r-03-003.pdf>.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Tetiana O. Pavlenko, Doctor of Biology Sciences, Professor, Head of Radiation Protection lab of State

захисту ДУ «Інститут громадського здоров'я ім. О.М. Марзєєва НАМН України», м. Київ

Сердюк Андрій Михайлович, доктор медичних наук, професор, академік НАМНУ, директор ДУ «Інститут громадського здоров'я ім. О.М. Марзєєва НАМН України», м. Київ

Оперчук Анатолій Павлович, завідувач відділу епідеміології неінфекційних захворювань і факторів навколишнього середовища ДУ «Центр громадського здоров'я МОЗ України», м. Київ

Аксьонов Микола Васильович, кандидат біологічних наук, провідний науковий співробітник лабораторії радіаційного захисту ДУ «Інститут громадського здоров'я ім. О.М. Марзєєва НАМН України», м. Київ

Фризюк Мирослава Анатоліївна, кандидат біологічних наук, провідний науковий співробітник лабораторії радіаційного захисту ДУ «Інститут громадського здоров'я ім. О.М. Марзєєва НАМН України», м. Київ

Тарасюк Ольга Євгеніївна, кандидат медичних наук, провідний науковий співробітник лабораторії радіаційного захисту ДУ «Інститут громадського здоров'я ім. О.М. Марзєєва НАМН України», м. Київ

Федоренко Олена Володимирівна, науковий співробітник лабораторії радіаційного захисту ДУ «Інститут громадського здоров'я ім. О.М. Марзєєва НАМН України», м. Київ

Михайленко Олександр Васильович, молодший науковий співробітник лабораторії радіаційного захисту ДУ «Інститут громадського здоров'я ім. О.М. Марзєєва НАМН України», м. Київ

Institution «O.M. Marzиеiev Institute for Public Health of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine», Kyiv, Ukraine

Andrii M. Serdiuk, Academician of the NAMSU, Doctor of Medical Sciences, Professor, Director of State Institution «O.M. Marzиеiev Institute for Public Health of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine», Kyiv, Ukraine

Anatoliy P. Operchuk, Head of the Department of Epidemiology of Noncommunicable Diseases and Environmental Factors of State institution «Public health center of the Ministry of health of Ukraine», Kyiv, Ukraine

Mykola V. Aksenov, PhD, Leading Researcher of Radiation Protection lab of State Institution «O.M. Marzиеiev Institute for Public Health of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine», Kyiv, Ukraine

Myroslava A. Fryziuk, PhD, Leading Researcher of Radiation Protection lab of State Institution «O.M. Marzиеiev Institute for Public Health of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine», Kyiv, Ukraine

Olha Ye. Tarasiuk, PhD, Leading Researcher of Radiation Protection lab of State Institution «O.M. Marzиеiev Institute for Public Health of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine», Kyiv, Ukraine

Olena V. Fedorenko, Researcher of Radiation Protection lab of State Institution «O.M. Marzиеiev Institute for Public Health of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine», Kyiv, Ukraine

Oleksandr V. Mykhailenko, Junior Researcher of Radiation Protection lab of State Institution «O.M. Marzиеiev Institute for Public Health of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine», Kyiv, Ukraine

Стаття надійшла до редакції 12.03.2020

Received: 12.03.2020