

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

Т. О. Павленко✉, М. А. Фризюк, О. Є. Тарасюк

*Державна установа «Інститут громадського здоров'я ім. О.М. Марзєєва Національної академії медичних наук України», вул. Гетьмана Павла Полуботка, 50, м. Київ, 02094, Україна*

## ДО ПИТАННЯ ВПЛИВУ РАДОНУ НА РОБОЧИХ МІСЦЯХ В ІСНУЮЧІЙ СИТУАЦІЇ ОПРОМІНЕННЯ

**Мета дослідження:** оцінка ймовірних рівнів опромінення від радону та природних радіонуклідів на робочих місцях в контексті обґрунтування планів радіаційного захисту в існуючій ситуації опромінення.

**Матеріали і методи.** Для оцінки ймовірного діапазону ефективних доз (ЕД) опромінення працівників промислових підприємств від природних радіонуклідів (ПРН) використовувались матеріали щодо оцінки вмісту ПРН у відходах підприємств видобувної та переробної промисловості України та оцінки рівнів забруднення промислових майданчиків нафтогазових підприємств, отримані в результаті виконання науково-дослідних робіт фахівцями лабораторії радіаційного захисту ДУ «Інститут громадського здоров'я ім. О.М. Марзєєва НАМН України» (РЗ ДУ «ІГЗ НАМНУ»). Для розрахунків ЕД шахтарів залізорудних шахт використовувались результати досліджень НДІ Укрпроммед. Розрахунки ймовірних ЕД працівників промислових підприємств проводились за методиками та рекомендаціями публікацій МАГАТЕ, що стосуються професійного опромінення. Оцінки рівнів опромінення офісних працівників проводились за результатами вимірювань вмісту радону в повітрі приміщень перших поверхів багатоповерхових будинків індустріальної міської забудови з власних баз даних лабораторії РЗ ДУ «ІГЗ НАМНУ». Дослідження радону в повітрі приміщень проводились методом пасивної трекової радонометрії з часом експонування не менше 30 діб. Розрахунки ЕД офісних працівників проводились з використанням дозових коефіцієнтів та математичних моделей МКРЗ.

**Результати.** При опроміненні радоном працівників внаслідок технологічного процесу обмеження опромінення здійснюється за дозовим критерієм. На прикладі шахтарів неуранових шахт показано, що ЕД, обумовлені гамма-випромінюванням, варіювали у вузькому діапазоні і становили 0,2–0,4 мЗв/рік і в середньому були на порядок меншими за радонову компоненту сумарної ЕД для двох груп шахт, що становила 2,0–14,0 мЗв/рік для Північної групи та 0,3–0,8 мЗв/рік для Південної групи. Для трьох спеціальностей підземних працівників ЕД опромінення потенційно можуть перевищувати референтний рівень 6 мЗв/рік і підпадати під регуляторний контроль. Потенційні ЕД опромінення працівників одного з українських нафтових родовищ виявились загалом не великими (< 0,1–1 мЗв/рік), за винятком місць складування відпрацьованих труб та шламо-відстійників (70,0 мЗв/рік; 28,0 мЗв/рік на відстані 10 м), поблизу яких перевищено ліміти доз для персоналу категорії А (6 мЗв/рік), що підпадає під регуляторний контроль. Опромінення радоном на робочих місцях передбачає і перебування працівників у звичайних офісних приміщеннях на перших поверхах багатоповерхових будинків, де основним джерелом надходження радону в повітря є підстеляючий ґрунт. Для найбільш досліджених областей України (~1200 вимірювань концентрацій активності радону в повітрі приміщень перших поверхів) встановлено, що референтний рівень 300 Бк/м<sup>3</sup> перевищується у 0,2–0,5 % випадків за окремими областями, тому потенційно референтний рівень може бути перевищений у десятках тисяч приміщень.

**Висновки.** Для оцінки небезпечності робочих місць є виправданим диференційований підхід, який дозволяє оптимізувати радіаційний захист працівників ціною розумних витрат і заощадити значні ресурси підприємств. ЕД опромінення працівників підприємств, де радон є невід'ємною частиною технологічного процесу, варіюють в широкому діапазоні і можуть відрізнятися на порядок навіть на одному підприємстві. Потенційно референтні рівні 300 Бк/м<sup>3</sup> можуть бути перевищені у десятках тисяч офісних приміщень, і тільки завдяки прямим вимірюванням концентрацій активності радону в повітрі будівель такі приміщення можуть бути виявлені.

**Ключові слова:** радон у повітрі приміщень; існуюча ситуація опромінення; опромінення на робочих місцях; ефективна доза опромінення працівників.

*Проблеми радіаційної медицини та радіобіології. 2024. Вип. 29. С. 152–162. doi: 10.33145/2304-8336-2024-29-152-162*

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

**T. O. Pavlenko**✉, **M. A. Fryziuk**, **O. Ye. Tarasiuk**

*State Institution «O.M. Marzиеiev Institute for Public Health of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine», 50 Hetman Pavlo Polubotok Str., Kyiv, 02094, Ukraine*

## **ON THE ISSUE OF RADON EXPOSURE IN THE EXISTING RADIATION SITUATION AT WORKPLACES**

**Objective:** assessment of probable exposure levels from radon and NORM in workplaces within the context of justifying radiation protection plans in an existing exposure situation.

**Materials and methods.** Materials regarding the assessment of naturally occurring radioactive material (NORM) content in tailing from mining and processing industries in Ukraine and assessments of contamination levels of industrial sites of oil and gas enterprises were used for estimating the probable range of effective doses (ED) of workers from NORM at industrial enterprises. These materials were obtained as a result of research conducted by specialists from the Radiation Protection Laboratory of the State Institution «O.M. Marzиеiev Institute for Public Health of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine» (RP SI «IPH NAMSU»). The results of studies conducted by the State Institution «Ukrainian Scientific Research Institute of Industrial Medicine» (SI «UKRMEDPROM») were used for calculating the EDs of iron ore miners. Calculations of probable EDs of industrial enterprise workers were carried out using methodologies and recommendations from publications of the IAEA related to occupational exposure. Assessments of exposure levels for office workers were based on measurements of indoor radon concentrations of first-floor premises in multi-story buildings of industrial urban development from the laboratory's own databases. Radon measurements in indoor air were conducted using passive track etch radon detectors with an exposure time of at least 30 days. Calculations of EDs for office workers were carried out using dose coefficients and mathematical models from the ICRP.

**Results.** When workers are exposed to radon as a result of the technological process, radiation exposure is limited by dose criteria. Using non-uranium miners as an example, it was shown that effective doses (ED) due to gamma radiation varied within a narrow range, ranging from 0.2 to 0.4 mSv/year, and were on average an order of magnitude lower than the radon component of the total ED for the two groups of mines, which amounted to 2.0–14.0 mSv/year for the Northern group and 0.3–0.8 mSv/year for the Southern group. For three underground worker specialties, radiation EDs could potentially exceed the reference level of 6 mSv/year and fall under regulatory control. Potential radiation EDs for workers at one of the Ukrainian oil fields were generally not significant (<0.1–1 mSv/year), except for areas where used pipe storage and sludge settlers were located (70.0 mSv/year; 28.0 mSv/year at a distance of 10 meters), near which dose limits for Category A personnel (6 mSv/year), falling under regulatory control, were exceeded. Radon exposure in workplaces also includes the presence of workers in regular office premises on the first floors of multi-story buildings, where the main source of radon entry into the air is the underlying soil. For the most researched regions of Ukraine (~1200 measurements of radon activity concentrations in first-floor premises), it was found that the reference level of 300 Bq/m<sup>3</sup> is exceeded in 0.2–0.5% of cases in certain regions, indicating that potentially the reference level may be exceeded in tens of thousands of premises.

**Conclusions.** A differentiated approach is justified for assessing the hazards of workplaces, allowing for optimizing radiation protection for workers at a reasonable cost and saving significant resources for enterprises. Effective doses (ED) of radiation for workers at enterprises where radon is an integral part of the technological process vary widely and can differ by an order of magnitude even within the same enterprise. Reference levels of 300 Bq/m<sup>3</sup> may be exceeded in tens of thousands of office premises, and only through direct measurements of radon activity concentrations in building air can such premises be identified.

**Key words:** indoor radon; existing exposure situations; exposure in workplaces; effective exposure dose of workers.

*Problems of Radiation Medicine and Radiobiology. 2024;29:152-162. doi: 10.33145/2304-8336-2024-29-152-162*

### **ВСТУП**

За класифікацією третьої частини Загальних вимог безпеки (General Safety Requirements – GSR Part 3) Міжнародного агентства з атомної енергії (МАГАТЕ),

### **INTRODUCTION**

According to the classification of the IAEA General Safety Requirements (No. GSR Part 3), requirements for exposure due to natural sources at

✉ Tetiana O. Pavlenko, e-mail: [tpavlenko@ukr.net](mailto:tpavlenko@ukr.net)

вимоги до опромінення природними радіонуклідами на робочих місцях визначаються ситуацією опромінення: плановою чи існуючою [1]. Відповідно до цього документа та Загального керівництва з безпеки щодо професійного опромінення (General Safety Guide – GSG-7) [2], опромінення працівників відноситься до професійного у випадках, коли в будь-якому технологічному матеріалі концентрація будь-якого радіонукліду в ланцюгах розпаду  $^{238}\text{U}$  або  $^{232}\text{Th}$  перевищує 1 Бк/г та/або концентрація  $^{40}\text{K}$  перевищує 10 Бк/г або ефективні дози (ЕД) опромінення перевищують 6 мЗв у рік та не можуть бути зменшені загальнозживаними захисними заходами. У цих випадках промислова діяльність розглядається як «практична діяльність», а опромінення працівників – як планове [1]. Якщо відповідні концентрації активності або ЕД менші за вказані величини, застосовуються вимоги як до існуючої ситуації опромінення.

Згідно з GSG-7, до кожного конкретного промислового виробництва рекомендується застосовувати диференційований підхід, враховуючи: економічні засади, кількість відходів – залишків з підвищеним вмістом природних радіонуклідів (ПРН), особливості та вартість регулювання, а також величину доз опромінення працівників [2].

Якщо діяльність визначена як планова (практична діяльність), до неї застосовуються всі аспекти державного регулювання, запроваджуються програми радіаційного захисту працівників (персоналу) та населення, встановлюються основні вимоги до безпечності об'єкта та його декомісії тощо.

Інші підходи застосовуються до промислової діяльності, яку віднесено до існуючої ситуації опромінення. В цьому випадку йдеться про два типи робочих місць з невід'ємним опроміненням ПРН (пункт 5.1 (c) (i) GSR Part 3 [1]).

Перший тип робочих місць або сценарій опромінення, пов'язаний з видобутком та переробкою корисних копалин, якщо ЕД працівників не перевищують 6 мЗв у рік, другий – звичайні офісні приміщення, де опромінення працівників визначається концентраціями активності радону в повітрі, а джерелом його надходження у приміщення є підстеляючі ґрунти.

Необхідно зауважити, що Україна має багаторічний досвід обмеження опромінення ПРН. У все ще чинних Нормах радіаційної безпеки України (НРБУ-97) [3] та Основних санітарних правилах України (ОСПУ-2005) [4] запроваджені окремі розділи, які стосуються техногенно-підсилених джерел природного походження, та запроваджено норматив щодо обмеження опромінення працівників на рівні 5

workplaces are determined by the exposure situation (planned or existing) [1]. According to this document and the General Safety Guide on Occupational Radiation Protection (No. GSG-7) [2], exposure of workers is considered as occupational in certain cases. That is if, in any process material, the activity concentration of any radionuclide in the  $^{238}\text{U}$  decay series or the  $^{232}\text{Th}$  decay series exceeds 1 Bq/g, or/and if the activity concentration of  $^{40}\text{K}$  exceeds 10 Bq/g, or an effective dose (ED) exceeds 6 mSv in a year and cannot be reduced by available protective measures. In these cases, the industrial activity is regarded as a practice and exposure of workers as planned [1]. If the appropriate concentrations of activity or ED are less than the specified values, the requirements for existing exposure situations apply.

According to GSG-7, it is recommended to apply the graded approach to each specific industrial activity, taking into account: economic principles; volumes of residues and process wastes involving naturally occurring radioactive material (NORM), where activity concentrations are high; the characteristics and cost of regulation, as well as radiation exposure doses to workers [2].

If the activity is defined as planned (practice), all aspects of state regulation are applied, radiation protection programs for workers (personnel) and the population are introduced, basic requirements for the object safety and its decommissioning are established, etc.

Other approaches are applied to industrial activities that are attributed to existing exposure situation. In this case, we are talking about two types of workplaces with inherent exposure due to NORM (para. 5.1(c) (i) of GSR Part 3 [1]).

The first type of workplaces or exposure scenario is related to mining and processing of raw materials, if an ED of workers does not exceed 6 mSv in a year, the second one is regarding to ordinary office premises, where the exposure of employees is determined by radon concentration in air, and underlying soils are the source of its entry into the buildings.

It should be noted that Ukraine has many years of experience in limiting of NORM exposure. Radiation Safety Standards of Ukraine (RSSU-97) [3] and Main Sanitary Rules of Ukraine (MSRU-2005) [4] which are still valid, contain separate chapters due to NORM and establish the dose limit for occupational exposure of 5 mSv per year.

мЗв у рік. Необхідно зауважити, що, за визначенням BSS (Basic safety standards – Основні стандарти безпеки) МАГАТЕ (GSR Part 3), референтний рівень – це «рівень опромінення, який є граничним критерієм процедури оптимізації захисту» [1]. Це не нормативна величина – ліміт дози або рівні дій НРБУ і ОСПУ-2005. Кожна країна, виходячи з соціально-економічних міркувань і розрахунків, може самостійно запроваджувати нормативи і обмеження, які постають нижче референтних рівнів, і тому запроваджені НРБУ-97 і ОСПУ-2005 нормативи не суперечать Директиві Ради Євратома [5].

Щодо існуючої ситуації, то ми маємо два сценарії опромінення. Для першого сценарію оцінки величини опромінення від ПРН для більшості підприємств будуть пов'язані з зовнішнім випромінюванням місць складування сировини та розташування залишків/відходів виробництва з підвищеним вмістом ПРН. Для цього сценарію результати досліджень ЕД працівників є базою для обґрунтування необхідності регуляторного контролю чи звільнення від нього. Для другого сценарію, коли опромінення обумовлене радоном у повітрі приміщення, застосовуються інші підходи до обмеження опромінення.

Це пов'язано з багаторічною дискусією щодо практичного застосування нових дозових коефіцієнтів Публікації 137 Міжнародної комісії з радіологічного захисту (МКРЗ) [6] та Публікацією 130 [7], яка запровадила для розрахунків доз опромінення нову модель респіраторного тракту людини.

Публікація 137 розподілила робочі місця щодо опромінення радоном на дві категорії з різними дозовими коефіцієнтами. До першої категорії МКРЗ відносить роботи, які передбачають значне фізичне навантаження, до другої – робочі місця в приміщеннях, а також робочі місця у шахтах із середнім та невеликим навантаженням [6].

Відповідно до BSS (GSR Part 3) [1] і Директиви Ради Євратома [5], річна доза опромінення від радону на робочих місцях складає 10 мЗв/рік при концентрації активності радону у 1000 Бк/м<sup>3</sup> для стандартного часу перебування 2000 годин, а для житлових будинків ті ж самі 10 мЗв/рік відповідають концентрації активності 300 Бк/м<sup>3</sup> для часу перебування 7000 годин. Якщо перерахувати ці величини за дозовими коефіцієнтами публікації 137 МКРЗ [6], то концентрація активності 1000 Бк/м<sup>3</sup> на робочих місцях з великим фізичним навантаженням оцінюється вже у 26 мЗв/рік, що значно перевищує дозовий ліміт для персоналу.

It should be noted that according to the definition of IAEA Safety Standards Series (GSR Part 3), the reference level is «the level of dose, risk or activity concentration above which it is not appropriate to plan to allow exposures to occur and below which optimization of protection and safety would continue to be implemented» [1]. A dose limit or action levels in RSSU and MSRU-2005 are not standards. Each country can independently establish standards and constraints below reference levels based on socio-economic considerations and calculations, and therefore the standards established by RSSU-97 and MSRU-2005 do not contradict Council Directive 2013/59/Euratom [5].

Due to existing exposure situations, we have two exposure scenarios. For the first scenario, estimation of exposure due to natural sources for the most enterprises will be related to the external exposure due to raw material storage sites and location of residues/waste from manufacturing with high content of NORM. For this scenario, studies of workers ED are the basis for justifying the need of regulatory control or its exemption. For the second scenario, when the exposure is due to indoor radon, another approaches are used to limit the exposure.

This is related to the long-term discussion on the practical application of the new dose coefficients of Publication 137 of the International Commission on Radiological Protection (ICRP) [6] and Publication 130 [7], which introduced a new model of the human respiratory tract for radiation exposure dose calculations.

Publication 137 divided workplaces according to radon exposure into two categories with different dose rates. ICRP refers workplaces with significant physical activity to the first category, and to the second it is referred workplaces in buildings, as well as workplaces in mines with medium and light physical activity [6].

According to BSS (GSR Part 3) [1] and Council Directive 2013/59/Euratom [5], an annual effective dose due to radon for workplaces is 10 mSv/year with radon concentration of 1000 Bq/m<sup>3</sup> and a default occupancy period of 2000 h; and for homes, the same 10 mSv/year corresponds to radon concentration of 300 Bq/m<sup>3</sup> for exposure period of of 7000 hours. If we recalculate these values using dose coefficients in Publication 137 of the ICRP [6], radon concentration of 1000 Bq/m<sup>3</sup> for workplaces with significant physical activity is already estimated as 26 mSv/year, which significantly exceeds the dose limit for workers.

На сьогодні оцінки ЕД опромінення від радону є компромісом, якого було досягнуто між експертами МКРЗ, МАГАТЕ і Міжнародної організації праці (International Labour Organization). Для розрахунків доз МАГАТЕ рекомендує використовувати коефіцієнт 10 мЗв/WLM (Working Level Month – робочий рівень за місяць) для робочих місць, якщо інший конверсійний коефіцієнт не виправданий умовами праці та специфічними характеристиками аерозолю (наприклад, шахти). ЕД від радону в існуючій ситуації МАГАТЕ рекомендує розраховувати за умови, що референтний рівень  $1000 \text{ Бк/м}^3 = 10 \text{ мЗв/рік}$  [6].

Таким чином, оцінка опромінення радоном здійснюється для двох сценаріїв: перший – стосується опромінення радоном, коли джерелом надходження є ґрунти (офісні приміщення), другий, – коли його надходження в повітря приміщення є невід’ємною частиною технологічного процесу видобутку чи переробки сировини з ПРН. Перша категорія робочих місць – звичайні офісні приміщення, і опромінення працівників радоном на робочих місцях обмежується стосовно референтного рівня  $300 \text{ Бк/м}^3$  в одиницях концентрацій активності. Друга категорія стосується визначення радонової компоненти як складової частини сумарної дози працівників підприємств з видобутку та переробки корисних копалин в контексті оптимізації заходів радіаційного захисту, а основним критерієм є сумарна доза опромінення від усіх ПРН.

Метою даної статті є оцінка ймовірних рівнів опромінення від радону та ПРН на робочих місцях в контексті обґрунтування планів радіаційного захисту підприємств в існуючій ситуації опромінення.

## **МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ**

Для оцінки ймовірного діапазону доз опромінення працівників промислових підприємств від ПРН були використані матеріали, отримані в результаті виконання науково-дослідних робіт фахівцями лабораторії радіаційного захисту ДУ «Інститут громадського здоров’я ім. О.М. Марзеєва НАМН України» (РЗ ДУ «ІГЗ НАМНУ»), які стосувались оцінки вмісту ПРН у відходах підприємств видобувної та переробної промисловості України [8] та оцінки рівнів забруднення промислових майданчиків нафтогазових підприємств [9], як приклад, щодо прийняття рішення про запровадження регуляторного контролю та процедур оптимізації. Для розрахунків ЕД шахтарів залізородних шахт використані результати досліджень НДІ Укрпроммед [10]. Для розрахунків ймовірних ЕД працівників промислових підпри-

For today, estimation of ED due to radon exposure is a compromise reached between experts of the ICRP, the IAEA and the International Labor Organization (ILO). For dose calculations, the IAEA recommends using a dose coefficient of 10 mSv/WLM (Working Level Month) for workplaces, unless another conversion factor is justified by working environment and specific aerosol characteristics (for example, mines). The IAEA recommends ED due to radon in the existing situation should be calculated providing that the reference level  $1000 \text{ Bq/m}^3 = 10 \text{ mSv/year}$  [6].

Thus, the assessment of radon exposure is carried out for two scenarios: the first one refers to radon exposure, when the radon source is the soil (office space), the second one provides its entry to indoor air is an integral part of the technological process of extraction or processing of raw materials with NORM. The first category of workplaces is ordinary office space, and workers’ exposure due to radon at workplaces is limited by reference level of  $300 \text{ Bq/m}^3$  in activity concentration units. The second category refers to the determination of the radon component as a part of the total dose of workers at mining and mineral processing enterprises in the context of optimization of radiation protection measures, and the main criterion is the total exposure dose of radiation from all types of NORM.

The purpose of this article is to assess of probable exposure levels from radon and NORM in workplaces within the context of justifying radiation protection plans on enterprises in an existing exposure situation.

## **MATERIALS AND METHODS**

Materials obtained as a result of scientific research carried out by specialists of the Radiation Protection Laboratory of the State Institution «O.M. Marzieiev Institute for Public Health of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine» (RP SI «IPH NAMSU») were used to estimate the probable range of radiation exposure doses of workers on industrial enterprises due to NORM; these materials related to the assessment of the NORM content in the waste of enterprises of the mining and processing industry of Ukraine [8] and the assessment of contamination levels at industrial sites of oil and gas enterprises [9] were used as an example regarding decision making due to the introduction of a regulatory control and optimization procedures. For the calculation of ED for miners of iron ore mines, the results of research

емств застосовувались відповідні методики та рекомендації публікацій МАГАТЕ [2, 11–13], що стосуються професійного опромінення.

Для оцінки рівнів опромінення від радону офісних працівників були використані результати вимірювань з власних баз даних лабораторії РЗ ДУ «ІГЗ НАМНУ» щодо вмісту радону в повітрі приміщень перших поверхів багатоповерхових будинків індустріальної міської забудови. Дослідження радону в повітрі будинків проводились методом пасивної трекової радонометрії з часом експонування не менше 30 діб. Система гарантій якості вимірювань радону забезпечувалась калібруванням детекторів у радоновій атмосфері з відомою об'ємною активністю (ОА), яка має в системі Держстандарту України статус робочого еталону одиниці ОА радону-222. Для розрахунків ЕД офісних працівників застосовувались дозові коефіцієнти та математичні моделі публікацій МКРЗ [6, 14].

### Статистичний аналіз даних

Математична обробка включала розрахунок первинних статистичних показників (deskriptivna statistika). Для первинної підготовки таблиць та проміжних розрахунків використовувався пакет Microsoft Excel 2003. Основна частина математичної обробки виконувалась із застосуванням стандартного статистичного пакету «STATISTICA 10.0».

### РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

За сценарієм, коли опромінення радоном є наслідком технологічного процесу, обмеження опромінення працівників здійснюється за дозовим критерієм, і радон є тільки складовою сумарної дози опромінення, обумовленої кількома джерелами. Найбільш показовим є опромінення шахтарів неуранових шахт.

На відкритому повітрі фонові значення радону зазвичай складають 5–10 Бк/м<sup>3</sup>. Радон, який вивільняється з ґрунтів, швидко перемішується з атмосферним повітрям та розсіюється, проте у замкнутому просторі він має властивість накопичуватися. В шахтах на концентрації активності радону та його дочірніх продуктів розпаду (ДПР) потенційно впливають інтенсивність вентиляції, її розташування щодо робочих місць, технологічні особливості видобутку тощо. У разі порушення цих складових захисту концентрації активності радону потенційно можуть перевищувати дозові ліміти і бути значущими щодо впливу на здоров'я

by the SI «UKRMEDPROM» [10] were used. For the calculation of probable ED for industrial enterprise workers, relevant methodologies and recommendations from publications of the IAEA [2], [11–13] regarding occupational exposure were applied.

To assess levels from radon exposure among office workers, the measurements from the laboratory database of the RP SI «IPH NAMSU» regarding indoor radon concentration of ground-floor premises of multi-storey buildings in industrial urban areas were used. Radon air surveys in buildings were conducted using passive track-etch radon detectors with an exposure time of no less than 30 days. Quality assurance of radon measurements was ensured by calibrating detectors in a radon atmosphere with a known activity concentration (AC), which holds the status of a working standard unit of radon-222 AC in the State Standardization System of Ukraine. For the calculation of ED for office workers, dose coefficients and mathematical models from publications of the ICRP [6, 14] were applied.

### Statistical data analysis

Mathematical processing included the calculation of primary statistics (descriptive statistics). The Microsoft Excel 2003 package was used for the initial preparation of tables and intermediate calculations. The main part of mathematical processing was performed using the standard statistical package «STATISTICA 10.0».

### RESULTS AND DISCUSSION

In the scenario where radon exposure is a consequence of the technological process, the limitation of workers' exposure is carried out according to the dose criterion, and radon is only a component of the total exposure dose due to several sources. The most revealing is the exposure of miners in non-uranium mines.

The background radon values are typically 5–10 Bq/m<sup>3</sup> outdoors. Released from the soil radon quickly mixes with atmospheric air and disperses, but it tends to accumulate in a closed space. In mines, the activity concentration of radon and its daughter products is potentially influenced by the intensity of ventilation, its location in relation to workplaces, technological features of mining, etc. If these protective components are violated, the radon activity concentrations can potentially exceed dose limits and be significant in terms of worker health effects. Practice has shown that even at the same enterprise the doses exposures of workers can differ

**Таблиця 1**

**Ефективні дози опромінення працівників залізрудних шахт від радону та його ДПР**

**Table 1**

**Effective exposure doses due to radon and its decay products for iron ore mine workers**

Спеціальність / Profession	Ефективна доза, мЗв/рік / Effective dose, mSv/year	
	Північна група шахт Northern group of mines	Південна група шахт Southern group of mines
Бурильники / Drillers	8,0–14,0	0,8
Прохідники / Sinkers	3,6–6,8	0,8
Кріпильники / Fastening workers	6,0–12,0	0,4
Інші підземні працівники / Other underground workers	2,0–4,0	0,3

працівників. Практика показала, що навіть на одному підприємстві дози опромінення працівників можуть істотно відрізнятися залежно від розташування робочих місць.

В таблиці 1 приведено оцінки ймовірних доз опромінення різних професій працівників окремих груп залізрудних шахт одного підприємства. Дослідження встановили, що ЕД працівників Південної групи шахт в кілька разів перевищують ЕД працівників відповідного фаху Північної групи. Встановлено, що ЕД, обумовлені гамма-випромінюванням, варіювали у вузькому діапазоні і становили 0,2–0,4 мЗв/рік, тобто в середньому були на порядок меншими за радонову компоненту сумарної ЕД для обох груп шахт.

Для порівняння: для трьох основних підземних спеціальностей працівників Північної групи залізрудних шахт ЕД відрізнялися від 10 до 14 разів для бурильників, 4,5–8,5 разу – для прохідників та 7,5–15 разів – для кріпильників і прямо залежали від ефективності роботи вентиляційних систем та їх розташування стосовно робочих місць. Аналіз доз опромінення шахтарів встановив, що для трьох спеціальностей підземних працівників ЕД опромінення потенційно можуть перевищувати референтний рівень 6 мЗв/рік [5] і підпадати під регуляторний контроль.

В цьому випадку є сенс проводити процедури оптимізації та застосовувати диференційований підхід щодо визначення робочих місць, де необхідно реалізовувати протирадонові заходи, щоб знизити ЕД до прийняттого рівня.

Відмінністю даного сценарію від наступного є можливість запобігти регуляторному контролю, тому що концентрації активності радону потенційно можна знизити, передусім за рахунок модернізації вентиляційних систем. Набагато складніша ситуація, коли перевищення сумарних ЕД обумовлює гамма-випромінювання.

В таблиці 2 приведені потенційні дози опромінення працівників одного з українських нафтових родо-

significantly depending on the location of workplaces.

Table 1 displays the estimated exposure doses for workers across various occupations, categorized by groups of iron ore mines within the same enterprise. The study found that ED of workers in the Southern group of mines exceed those of workers in the corresponding profession in the Northern group by several times. It was established that the doses attributed to gamma radiation varied within a narrow range from 0.2 to 0.4 mSv/year, which were on average an order of magnitude lower than the radon component of the total ED for both groups of mines.

For comparison, among the three main underground professions of workers in the Northern group of iron ore mines, ED differed by 10 to 14 times for drillers, 4.5 to 8.5 times for sinkers, and 7.5 to 15 times for timberers fastening workers. These differences directly correlated with the effectiveness of ventilation systems and their proximity to the workstations. An analysis of miners' exposure doses revealed that for these three underground professions, EDs could potentially exceed the reference level of 6 mSv/year [5] and fall under regulatory control.

In this case, it makes sense to conduct optimization procedures and apply a differentiated approach to determine workplaces where radon protection measures need to be implemented to reduce ED to an acceptable level.

The difference between this scenario and the next one is the possibility of avoiding regulatory control because radon activity concentrations can potentially be reduced primarily through ventilation system upgrades. The situation becomes much more complex when exceeding the total EDs is due to gamma radiation.

Table 2 presents potential exposure doses for workers at one of the Ukrainian oil fields depend-

**Таблиця 2**

**Ефективні дози працівників окремого нафтового родовища Полтавської області (з розрахунку 2000 робочих годин на рік)**

**Table 2**

**Effective doses of workers et a specific oil field in Poltava region (calculated for 2000 working hours/year)**

<b>Робочі місця / Workplaces</b>	<b>Ефективна доза, мЗв/рік / Effective dose, mSv/year</b>
Газозамірне обладнання / Gas measuring equipment	1,0
Обладнання (труби, заслінки) / Equipment (pipes, valves)	< 0,2
Ємність для зберігання метанолу / Methanol storage tank	< 0,1
Сепаратор ГЗУ (групової замірної установки) / Gas metering separator (group metering unit)	0,7
Пункт очистки та заміру газу / Gas cleaning and metering point	< 0,1
Свердловини (5) / Wells (5)	0,4–0,6
Місце складування насосно-компресорних труб / Storage site for pump-compressor pipes	70,0 (28,0 на відстані 10 м / 28.0 at a distance of 10 m)

вищ залежно від розташування їх робочих місць. Для більшості робочих місць ЕД опромінення невеликі, за винятком місць складування відпрацьованих труб та шламовідстійників, поблизу яких навіть на відстані 10 метрів ЕД працівників перевищують ліміти доз для персоналу категорії А.

Проте, саме ці місця обумовлюють застосування регуляторного контролю для таких підприємств за іншим критерієм – перевищення вмісту ПРН у відходах, а саме: наявності концентрацій активності радіонуклідів, які вищі за критерії в 1 Бк/г для радіонуклідів рядів урану та торію чи 10 Бк/г – для калію-40 [9].

Таким чином, окремі працівники, які мають працювати в місцях збереження шламів або відпрацьованих труб, наприклад, на нафтових родовищах, за вимогами Євратома [5], повинні мати статус «персоналу», а програми радіаційного захисту – зменшувати небезпеку до мінімуму.

Найбільш поширеною ситуацією опромінення радоном на робочих місцях є перебування у звичайних офісних приміщеннях. Основним джерелом надходження радону в повітря цих приміщень є підстиляючий ґрунт [15]. Як правило, це – багатоповерхові будинки, перший поверх яких відведено під громадські приміщення або офіси. У таблиці 3 приведено основні статистичні дані та усереднені значення концентрацій активності радону в повітрі приміщень першого поверху багатоповерхових будинків, критичного за вмістом радону, для найбільш досліджених областей України (~1200 вимірювань). Дослідження встановили, що частотний розподіл носить логнормальний характер, а референтний рівень 300 Бк/м<sup>3</sup> [5] перевищується у 0,2–0,5 % випадків за окремими областями.

Встановлено, що потенційно референтний рівень щодо радону може бути перевищений у десятках тисяч приміщень.

ing on the location of their workplaces. For most workplaces, EDs are not significant, except for areas where used pipe storage and sludge settlers are located, near which even at a distance of 10 meters, workers’ EDs exceed dose limits for category A workers.

However, it is precisely these areas that necessitate regulatory control for such enterprises based on a different criterion – exceeding the activity concentration of NORM in waste, namely the presence of radionuclide activity concentrations exceeding criteria of 1 Bq/g for uranium and thorium series radionuclides or 10 Bq/g for potassium-40 [9].

Thus, individual workers who are to work in sludge or used pipe storage areas, such as in oil fields, according to Euratom requirements [5], must be categorized as «personnel», and radiation protection programs should minimize the risk.

The most common situation of radon exposure in workplaces is being in regular office premises. The primary source of radon entry into the air of these premises is the underlying soil [15]. Typically, these are multi-story buildings, the first floor of which is allocated for public spaces or offices. Table 3 provides basic statistical data and averaged values of radon activity concentrations in the air of first-floor premises in multi-story buildings, critical for radon content, for the most researched regions of Ukraine (~1200 measurements). Studies have shown that the frequency distribution is logarithmic-normal, and the reference level of 300 Bq/m<sup>3</sup> [5] is exceeded in 0.2–0.5 % of cases in certain regions.

It is established that the potentially reference level regarding radon may be exceeded in tens of thousands of premises.



**Таблиця 3**

**Середньозважені концентрації активностей радону в повітрі першого поверху багатоповерхових будинків окремих областей України, Бк/м<sup>3</sup>**

**Table 3**

**Weighted average indoor radon activity concentrations of the first floor of multi-story buildings in certain regions of Ukraine, Bq/m<sup>3</sup>**

Область / Region	Середньозважена концентрація активності Weighted average activity concentration	Середнє геометричне Geometric mean	Стандартне відхилення Standard deviation
Житомирська / Zhytomyr	282	245	145
Київська / Kyiv	195	158	133
Кіровоградська / Kirovohrad	235	193	153
Одеська / Odesa	183	158	138
Полтавська / Poltava	200	170	121
Рівненська / Rivne	238	208	112

Необхідно зазначити, що референтний рівень 300 Бк/м<sup>3</sup> для приміщень офісів аналогічний референтному рівню для житлових приміщень, і дозові критерії для таких робочих місць не застосовуються. Протирадонові заходи також практично не відрізняються.

Для виявлення приміщень, де перевищується референтний рівень щодо радону у повітрі приміщень необхідно здійснювати прямі вимірювання концентрації активності цього джерела.

**ВИСНОВКИ**

1. Аналіз результатів досліджень встановив, що диференційований підхід до оцінки небезпечності робочих місць є, безперечно, виправданим. Такий підхід дозволяє оптимізувати радіаційний захист працівників ціною розумних витрат і заощадити значні ресурси підприємств.
2. Ефективні дози опромінення працівників підприємств, де радон є невід’ємною частиною технологічного процесу, варіюють в широкому діапазоні і можуть відрізнятися на порядок навіть на одному підприємстві.
3. Встановлено, що потенційно референтний рівень щодо радону у повітрі приміщень 300 Бк/м<sup>3</sup> може бути перевищений у десятках тисяч офісних приміщень, і тільки завдяки прямим вимірюванням концентрацій активності радону в повітрі будівель такі приміщення можуть бути виявлені.

**Фінансування**

Без фінансування, тема ініціативна.

**Конфлікт інтересів**

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

It is important to note that the reference level of 300 Bq/m<sup>3</sup> for office premises is equivalent to the reference level for residential premises, and dose criteria for such workplaces are not applicable. Radon protection measures also do not significantly differ.

To identify premises where the reference level for indoor radon is exceeded, direct measurements of the activity concentration of this source must be carried out.

**CONCLUSIONS**

1. Analysis of the research results has established that a differentiated approach to assessing the hazards of workplaces is unquestionably justified. Such an approach allows for optimizing radiation protection for workers at a reasonable cost and saving significant resources for enterprises.
2. Effective radiation exposure doses for workers at enterprises where radon is an integral part of the technological process vary widely and can differ by an order of magnitude even within the same enterprise.
3. It has been found that the potentially reference level for radon in indoor air, 300 Bq/m<sup>3</sup>, may be exceeded in tens of thousands of office premises, and only through direct measurements of radon activity concentrations in building air can such premises be identified.

**Funding**

Independent research, no funding received.

**Conflict of interests**

Authors state no conflict of interest.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. *IAEA Safety Standards Series. General Safety Requirements No. GSR Part 3.* Vienna : IAEA, 2014. 436 p.
2. Occupational Radiation Protection. *IAEA Safety Standards Series. General Safety Guide No. GSG-7.* Vienna : IAEA, 2018. 335 p.
3. Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97): Державні гігієнічні нормативи. ДГН 6.6.1.-6.5.001-98. Київ, 1998. 135 с.
4. Основні санітарні правила забезпечення радіаційної безпеки України (ОСПУ-2005): Державні санітарні правила. ДСП 6.177-2005-09-02. Київ, 2005. 62 с.
5. Council Directive 2013/59/Euratom of 5 December 2013 Laying Down Basic Safety Standards for Protection against the Dangers Arising from Exposure to Ionizing 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.
6. ICRP Publication 137. Part 3. Occupational Intakes of Radionuclides. *Ann. ICRP.* 2017. Vol. 46 (3-4). 486 p. doi: 10.1177/0146645317734963.
7. ICRP Publication 130. Occupational Intakes of Radionuclides: Part 1. *Ann ICRP.* 2015. Vol. 44 (2). 188 p. doi: 10.1177/0146645315577539.
8. Павленко Т. О., Аксьонов М. В., Фризиук М. А. Вміст природних радіонуклідів у технологічних відходах видобувної та переробної промисловості України. *Проблеми радіаційної медицини та радіобіології.* 2019. Вип. 24. С. 121-130. doi: 10.33145/2304-8336-2019-24-121-130.
9. Pavlenko T., Aksyonov M., German O., Friziuk M., Fedorenko E., Mikhajlenko A. NORM Assessment at Gas and Oil Fields in Ukraine. *Energy, Environmental and Structural Engineering Series N 25 : Latest trends in energy, environment and development.* Salerno : WSEAS Press, 2014. P. 213-216.
10. Изучить содержание радона и продуктов его распада в шахтах Кривбасса и заболеваемость подземных горнорабочих раком легкого: Отчет о НИР (заключ.). Х/Д 14.02.0008.95. № гос. регистрации 0195U019827]. Кривой рог: Украинский научно-исследовательский институт промышленной медицины (НИИ «Укрпроммед»). 1997. 164 с.
11. Measurement and Calculation of Radon Releases from NORM Residues. *IAEA Technical Reports Series No. 474.* Vienna : IAEA, 2013. 85 p.
12. Protection Against Exposure Due to Radon Indoors and Gamma Radiation from Construction Materials – Methods of Prevention and Mitigation. *IAEA TECDOC Series. TECDOC-1951.* Vienna : IAEA, 2021. 53 p.
13. Radiation protection against radon in workplaces other than mines. *IAEA Safety Reports Series No. 33.* Vienna : IAEA, 2003. 74 p.
14. ICRP Publication 126. Radiological Protection against Radon Exposure. *Ann. ICRP.* 2014. Vol. 43 (3). 73 p.
15. T.A. Pavlenko, I.P. Los Indoor <sup>222</sup>Rn levels and irradiation doses on the territory of Ukraine. *Radiat. Measur.* 1996. 25 (1-4). P. 595-600.

## REFERENCES

1. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. *IAEA Safety Standards Series. General Safety Requirements No. GSR Part 3.* Vienna: IAEA; 2014. 436 p.
2. Occupational Radiation Protection. *IAEA Safety Standards Series. General Safety Guide No. GSG-7.* Vienna: IAEA; 2018. 335 p.
3. [Radiation safety standards of Ukraine (RSSU-97): State hygienic standards. SHS 6.6.1.-6.5.001-98]. Kyiv; 1998. 135 p. Ukrainian.
4. [Basic sanitary rules for ensuring radiation safety of Ukraine: State sanitary rules. SSR 6.177-2005-09-02]. Kyiv; 2005. 62 p. Ukrainian.
5. Council Directive 2013/59/Euratom of 5 December 2013 Laying Down Basic Safety Standards for Protection against the Dangers Arising from Exposure to Ionizing 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.
6. ICRP Publication 137. Part 3. Occupational Intakes of Radionuclides. *Ann. ICRP.* 2017;46(3-4):1-486. doi: 10.1177/0146645317734963.
7. ICRP Publication 130. Occupational Intakes of Radionuclides: Part 1. *Ann ICRP.* 2015;44(2):1-188. doi: 10.1177/0146645315577539.
8. Pavlenko T, Aksenov N, Fryziuk M. The content of natural radionuclides in technological residues of Ukrainian industries. *Probl Radiac Med Radiobiol.* 2019;24:121-30. doi: 10.33145/2304-8336-2019-24-121-130.
9. Pavlenko T, Aksyonov M, German O, Friziuk M, Fedorenko E, Mikhajlenko A. NORM Assessment at Gas and Oil Fields in Ukraine. *Energy, Environmental and Structural Engineering Series N 25 : Latest trends in energy, environment and development.* Salerno; 2014. p. 213-6.
10. [To study the content of radon and its decay products in the mines of Krivbass and the incidence of lung cancer in underground miners: Research report (final). E/C 14.02.0008.95. No. State registration 0195U019827]. Krivoy Rog: Ukrainian Research Institute of Industrial Medicine (Research Institute Ukrprommed)]. State registration No. 0195U019827. Krivoy Rog: Research Institute «Ukrprommed». 1997. 164 p. Russian.
11. Measurement and Calculation of Radon Releases from NORM Residues. *IAEA Technical Reports Series No. 474.* Vienna: IAEA; 2013. 85 p.
12. Protection against exposure due to radon indoors and gamma radiation from construction materials – methods of prevention and mitigation. *IAEA TECDOC Series. TECDOC-1951.* Vienna: IAEA; 2021. 53 p.
13. Radiation protection against radon in workplaces other than mines. *IAEA Safety Reports Series No. 33.* Vienna: IAEA; 2003. 74 p.
14. ICRP Publication 126. Radiological Protection against Radon Exposure. *Ann ICRP.* 2014;43(3):1-73.
15. Pavlenko TA, Los IP. Indoor <sup>222</sup>Rn levels and irradiation doses on the territory of Ukraine. *Radiat Measur.* 1996;25(1-4):595-600.

### **ІНФОРМАЦІЯ ПРО АВТОРІВ**

**Павленко Тетяна Олександрівна**, доктор біологічних наук, професор, завідувачка лабораторією радіаційного захисту, Державна установа «Інститут громадського здоров'я ім. О. М. Марзеєва, НАМН України»

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0615-3123>, м. Київ

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0764-010X>

**Тарасюк Ольга Євгенівна**, кандидат медичних наук, провідний науковий співробітник лабораторії радіаційного захисту, Державна установа «Інститут громадського здоров'я ім. О. М. Марзеєва, НАМН України», м. Київ

### **INFORMATION ABOUT AUTHORS**

**Tetiana O. Pavlenko**, Doctor of Biological Sciences, Professor, Head of the Radiation Protection Laboratory, State Institution «O.M. Marzieiev Institute for Public Health of the NAMS of Ukraine», Kyiv, Ukraine

ORCID ID:: <https://orcid.org/0000-0003-0615-3123>

**Myroslava A. Fryziuk**, Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher of the Radiation Protection Laboratory, State Institution «O.M. Marzieiev Institute for Public Health of the NAMS of Ukraine», Kyiv, Ukraine

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0764-010X>

**Olga Ye. Tarasiuk**, Candidate of Medical Sciences, Leading Researcher of the Radiation Protection Laboratory, State Institution «O.M. Marzieiev Institute for Public Health of the NAMS of Ukraine», Kyiv, Ukraine

*Стаття надійшла до редакції 16.05.2024*

*Received: 16.05.2024*