

## Radon in the spring water of the Zdolbuniv Region, Ukraine

O.O. Lebed<sup>1</sup>, V.O. Myslinchuk<sup>2</sup>, S.S. Trusheva<sup>1</sup>, Y.M. Mandyhra<sup>3</sup>, A.V. Lysytsya<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, Ukraine

<sup>2</sup>Rivne State University of Humanities, Rivne, Ukraine

<sup>3</sup>Epizootology Research Station of the Veterinary Medicine Institute, Rivne, Ukraine

E-mail: [lysycya@ukr.net](mailto:lysycya@ukr.net)

Received: 20.04.2018. Accepted: 22.06.2018

Large-scale studies of Radon-222 content in spring waters and the specific activity of spring soil determined in Zdolbuniv district of Rivne region for the first time. The purpose of the research is to determine the potential radiation hazard for the health of the population of the region. Another task is to create a detailed map of radon content in water sources. We measured in 2014-2017. We used the «Alfarad Plus» (water study) and the «Beta» radiometer (soil study). The value of radon volumetric activity in water samples varies in a wide range: from 2 Bq/dm<sup>3</sup> to 14 Bq/dm<sup>3</sup>, the average value is 8.05 ± 0.91 Bq/dm<sup>3</sup>. We surveyed 58 water sources. The concentration of radon exceeded the norm (according to recommendations of US Environmental Protection Agency, USEPA) in 13 (22.4%) only. This is a radon concentration of slightly higher than 11.1 Bq/dm<sup>3</sup>, which is the limit value for the safety of radon content in non-drinking water. We compared average concentrations of radon in samples of water in the Zdolbuniv district with the capacity of effective doses in other countries. We examined the soil near the sources; the soil was low-activity for strontium-90 and cesium-137. Its specific activity is from 6 to 30 Bq/kg. The correlation of the soil specific activity with the bulk activity of radon in water detected. The results of the survey of drinking water sources allowed to divide them into radon content into three categories and to create a map of radon safety of natural sources of the region. Sources with a high concentration of radon are concentrated in a narrow strip 5-7 km wide. This strip extends from the south to the north of the area. Such, the concentration of sources with somewhat increased radioactivity of water explained, in our opinion, by the vertical fault that exists in the crystalline basement of the landscape. Radon enters through this fault in surface water sources. The calculations conducted by us have shown that the average annual effective doses of spring water used for consumption by the population are 1.68 mSv/year about. This does not exceed the lower limit specified by the recommendations of the International Commission on Radiation Protection (ICRP). Therefore, we proved that radon in the spring water of the Zdolbuniv district is practically not a threat to the health and life of people and domestic animals in the area.

**Keywords:** Radioactive gas in water; volumetric activity; effective dose

### Вступ

Відомо, що для основної маси населення найбільш небезпечним джерелом радіації є зовсім не техногенні джерела, про які так багато говорять після аварії на Чорнобильській АЕС. Більше половини середньорічної дози іонізуючого опромінення населення планети припадає на джерела природного походження, в першу чергу Радон-222. Переважна кількість досліджень стосується внутрішнього опромінення легенів, обумовленої інгаляцією Радону і його дочірніх продуктів розпаду, що призводить до підвищення ризику виникнення онкологічних захворювань дихальної системи (Chen, 2013; Peterson et al., 2013; Truta et al., 2014). Разом з тим, доцільно звернути увагу і на радон розчинений у воді яка використовується для побутових потреб населення.

Радон – хімічний елемент VIII групи періодичної системи елементів, радіоактивний інертний газ, який не має запаху, кольору і смаку. Він утворюється при радіоактивному розпаді радію, який сам утворюється в серії радіоактивних розпадів природного урану або торію. Сьогодні відомо 34 ізотопи радону з масовими числами від 195 до 228 і періодами напіврозпаду від мікросекунд до майже 4 діб. 4 з них існують в природі, інші отримуються штучно. Всі ізотопи радону α-активні. Серед природних ізотопів радону найбільше значення, з точки зору іонізаційного забруднення має Радон-222, оскільки в нього найбільший період напіврозпаду. Унікальні властивості даного радіоактивного газу, привели до його використання як геофізичного маркера при визначенні прихованих розломів в геологічних структурах, в дослідженні та прогнозуванні землетрусів (Andreev et al., 2011; Tregub & Shumakova, 2015). Властивості радону також використовуються при вивченні атмосферних процесів (Kritz et al., 1990). Існують дослідження в яких властивості радону використовуються в метеорології, медицині, дослідженні динаміки водних процесів в ґрунті (S'otka et al., 2013). Але найбільша увага була приділена радону як одному з чинників радіологічної небезпеки здоров'я людини, оскільки люди постійно піддаються впливу радону та його продуктів розпаду.

Основними джерелами радону в глобальній атмосфері Землі є його надходження за різними оцінками з надр і з поверхні Землі (2000 Ки/рік), із поверхні морського дна (500 Ки/рік), із поверхні світового океану (30 Ки/рік), з родовищ фосфатів (3 Ки/рік), із відходів під час видобутку урану (хвостосховищ – 2 Ки/рік). Середній об'ємний вміст радону в атмосфері становить  $6 \times 10^{-18}\%$ , в  $1 \text{ м}^3$  повітря за нормальних умов міститься  $7 \times 10^{-7}$  г радону.

Концентрація  $^{222}\text{Rn}$  в атмосферному повітрі залежить від вмісту  $^{238}\text{U}$  та  $^{226}\text{Ra}$  в гірських породах, ґрунтах і підземних водах, наявності зон і площ з ураново-рудною мінералізацією, наявності розломів в гірських породах і корі, вивітрювання, від коефіцієнта еманування з ґрунту, від властивостей і стану ґрунту. Концентрації Урану-238 і Торію-232 в ґрунтах різних районів Землі дуже відрізняються, досягаючи максимальних величин в уранових провінціях і районах, багатих на моноцитові відкладення. Високі концентрації урану характерні для вивержених (магматичних) порід, особливо гранітів, а також темно кольорових сланців, осадових порід, що містять фосфати, та метаморфічних порід, що утворилися з таких відкладів. Ґрунти й уламкові відкладення, що утворилися в результаті переробки цих порід, також збагачені ураном. Крім цього, основними джерелами-утримувачами радону є гірські й осадові породи, що містять уран (радій) (Levun, 2007).

Середній вміст Урану-238 на материках становить 3 мкг/т. При цьому результуюча активність гірських порід у середньому становить  $5 \times 10^4$  Бк/т. «Нормальними» в радіаційному значенні прийнято вважати породи, у яких вміст урану і торію не перевищує 2,5 мкг/т. До зон підвищеного ризику відносяться регіони, де на поверхню землі виходять граніт, гнейс, фосфорит тощо, вміст урану і торію в них може сягати 100 мкг/т і більше. На території колишнього СРСР це, перш за все, Ельконський горст на Алданському щиті, район Українського кристалічного масиву, Кокчетавський та Буреїнський масиви, Улутау, Каратау, деякі райони Таджикистану (Тушов, 2009; Outkin, 2000).

Виділення радону визначається як загальною радіоактивністю гірських порід, так і їх колекторськими властивостями (здатністю акумулювати радон) і коефіцієнтом еманування (здатністю виділяти накопичений радон). У практиці геологічних досліджень зафіксовано багато випадків, коли слаборадіоактивні породи містять у своїх пустотах і тріщинах радон у кількостях, які у сотні й тисячі разів більші, ніж у більш радіоактивних породах.

У насичених водою породах, що залягають нижче рівня ґрунтових вод, переважає міграція радону з потоком підземних вод у розчиненому вигляді, тому породи, які залягають нижче рівня ґрунтових вод, можна назвати зоною водної міграції радону. У межах зони неповного водонасичення (від поверхні землі до рівня ґрунтових вод) переважає міграція радону в газовій фазі в складі ґрунтового повітря, і тому цю зону можна назвати зоною повітряної міграції радону. Міграція радону в цих двох зонах відбувається, швидше за все, абсолютно незалежно. У зоні водної міграції переважає горизонтальний перенос радону, у той час як в області повітряної міграції переміщення радону перенос відбувається переважно у вертикальному напрямку.

Величина радоновмісності води під час виходу на поверхню землі залежить від кількох умов:

- тривалості контакту води з породою, яка виділяє радон;
- достатність контакту для досягнення максимально можливого рівня радіоактивності води;
- стан породи, яка виділяє радон (часто від цього стану залежить кількість газу, який виділяється з неї);
- умов, за яких радон переходить у рідину (потужність струменя води, що взаємодіє з породою, його подрібненню, температура, вплив температури струменя на температуру породи, що змінює умови виходу і розчинності газу);
- шляху, якого воді необхідно пройти від підземного джерела радону до поверхні землі (на цьому шляху відбувається поступовий процес його розпаду);
- підмішування до води нерадіоактивних рідких і газових струменів;
- механічного виділення радону з води бульбашками газу, які можуть виділятися з самої рідини, так і надходити в неї ззовні (Baganov et al., 1930).

Для водопостачання найчастіше використовують підземні води з осадових порід, в основному вапнякових, вони характеризуються найменшою радіоактивністю. У поверхневих водах концентрація радону мінімальна, це пояснюється сприятливими умовами для переходу його в атмосферу. Із природних вод в атмосферу радон потрапляє за рахунок процесів дегазації з виносом радону з повітряних бульбашок, що містяться у воді. Найбільш інтенсивно цей процес відбувається під час розбризкування, випаровування й кипіння води.

У США рівень вмісту радону в ґрунтових водах коливається в межах від 10 до 100 Бк/дм<sup>3</sup>, в окремих районах доходячи до сотень і навіть тисяч Бк/дм<sup>3</sup>.

У водах озер і річок концентрація радону рідко перевищує 0,5 Бк/дм<sup>3</sup>, а в водах морів і океанів – не більше 0,05 Бк/дм<sup>3</sup>. Емісії радону з поверхні океанів дуже малі, в порівнянні з його континентальними емісіями, і не перевищують 0,1 Бк/(м<sup>2</sup>×с), вони на 2-3 порядки менші ніж із земної поверхні. До радіоактивних прийнято відносити води, які містять Радон-222 з об'ємною активністю більшою  $1,85 \times 10^5$  Бк/м<sup>3</sup>, Радію-226 – з концентрацією більшою  $1 \times 10^{-8}$  г/м<sup>3</sup> або урану – більшою  $3 \times 10^{-2}$  г/м<sup>3</sup> (Векман, 2008). Радіаційна небезпека, викликана високими концентраціями радону у воді, визначається кількома причинами:

- споживанням води з підвищеною концентрацією радону та продуктів його розпаду;
- переходом у повітря значної частини радону при використанні води у побутових цілях;
- переходом радону у повітря закритих приміщень при використанні води в лазнях, душі тощо.

Багато радону може містити вода з глибоких колодязів або артезіанських свердловин, іноді до 103 Бк/дм<sup>3</sup>. В підземних водах побутових анексій води, його концентрація може змінюватися від 4-5 Бк/дм<sup>3</sup> до 3-4 МБк/дм<sup>3</sup>, тобто в мільйон разів. Для прикладу, води з артезіанських свердловин, які використовують для питного споживання в смт. Маньківка (Черкаська область, Україна), містять радон з активністю до (1000-3000) Бк/дм<sup>3</sup> (Zelensky et al., 2011); у підземних водах кристалічного фундаменту в околицях Києва вміст радону становить (70-1657) Бк/дм<sup>3</sup> (Gudzenko et al., 2004). Якщо вважати, що людина в цілому на різні потреби споживає за день 0,3 дм<sup>3</sup> води, що містить 37 Бк/дм<sup>3</sup>  $^{222}\text{Rn}$ , то

розрахункова поглинена доза для шлунку дорівнює приблизно 0,02 мГр/рік, а поглинена доза всім тілом людини буде приблизно в 100 разів меншою.

Використання збагачених радоном вод для комунальних і господарських потреб призводитиме до потрапляння радону у повітря приміщень, що додатково підвищить радіаційний фон.

Для точної оцінки ефективних доз, обумовлених опроміненням радоном і його дочірніми продуктами розпаду, необхідно враховувати механізми накопичення у підземних водах, їх хімічний склад, гідрогеологічний режим підземних вод, глибину водозабору, час транспортування тощо.

Внаслідок суттєвої відмінності умов радононакопичення в підземних водах, рівня соціально-економічного розвитку країни, систем екологічно-санітарного нагляду, законодавчо-нормативної бази, застосовуються різні величини допустимих рівнів радону у водах. Так, у Фінляндії та Швеції гранично допустимі концентрації встановлено на рівні 300 Бк/дм<sup>3</sup>, в Ірландії – 200 Бк/дм<sup>3</sup>, в Україні – 100 Бк/дм<sup>3</sup>. Агентство з охорони навколишнього середовища США рекомендує застосовувати граничну величину вмісту радону у не питній воді на рівні 11,1 Бк/дм<sup>3</sup>, що, однак, не знайшло поки що відображення в американському національному стандарті якості води (даний параметр не нормується). У російських «Нормах радіаційної безпеки» граничний рівень вмісту радону у воді, при якому вже потрібне втручання, встановлений на рівні 60 Бк/дм<sup>3</sup> при відсутності у воді інших радіоактивних елементів. До цього «Санітарні правила і норми для централізованого водопостачання» дозволяли користуватися водою з вмістом радону до 120 Бк/дм<sup>3</sup>.

**Мета досліджень:** створення карти вмісту Радону-222 у природних водних джерелах Здолбунівського району Рівненщини і визначення потенційної радіаційної загрози для здоров'я населення регіону.

## Матеріал і методи досліджень

Для дослідження природних водних джерел Здолбунівщини на вміст радону були організовані експедиції по відборі проб води та приджерельного ґрунту для вимірювання об'ємної активності (ОА) води за Радон-222 та питомої активності (ПА) ґрунту за Цезієм-137 та Стронцієм-90. Джерела району знаходяться в радіусі до 30 км. Проби води з природних джерел відбирали в ємкості об'ємом 1,5 дм<sup>3</sup> шляхом їх занурення в джерело і маркували (номер проби, дата і година відбору). Збір зразків води та вимірювання проводили відповідно до тесту протоколу USEPA (USEPA, 1991). Всього зібрано зразки питної води з 58 природних джерел.

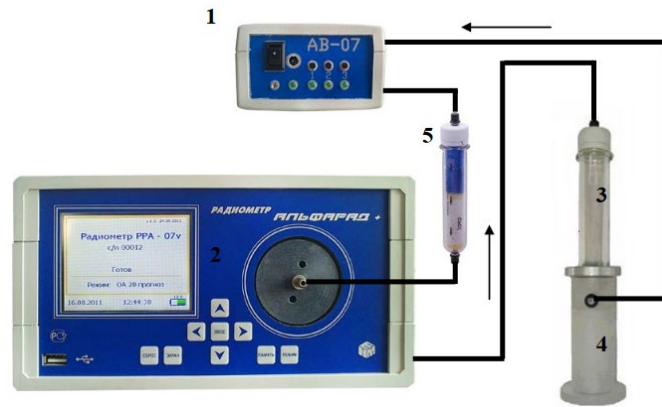
Крім відбору зразків води, для визначення питомої активності за Стронцієм-90 і Цезієм-137, відбирали проби верхнього шару ґрунту біля джерел (масою до 1 кг). Всього зібрано 14 зразків поверхневого ґрунту. Відібрані проби зважували, висушували протягом трьох діб при температурі 105-110 °С, розтирали у фарфоровій ступці та переносили в пронумеровані чашки Петрі. Залишкова вологість при вимірюванні ПА в усіх зразках становила 3-5%. Вимірювання ПА ґрунту проводили за допомогою радіометра «Бета». Вказаний радіометр налаштований на реєстрування β-частинок з енергією близькою до 0,54-0,67 МеВ. В даний енергетичний діапазон попадають β-частинки Стронцію-90 і Цезію-137. Питому активність проби визначали за формулою (1):

$$A = \frac{H - H_{\phi}}{P}, \quad (1)$$

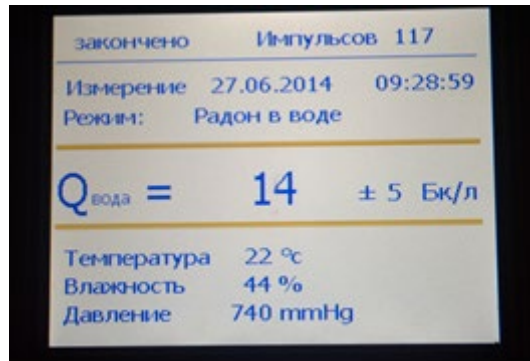
де  $H$  – швидкість лічби радіометра (кількість відліків за одиницю часу) при завантаженні вимірюваної проби, 1/с;  $H_{\phi}$  – швидкість лічби радіометра від фонові проби, 1/с;  $P$  – чутливість радіометра, кг/(с×Бк).

Паралельно, при відборі кожної проби проводили триразове вимірювання величини природного радіаційного γ-фону за допомогою побутового дозиметра «Белла» та визначали його середнє значення яке записували на маркувальну етикетку кожного зразка. Значення об'ємної активності радону природних джерел визначали за допомогою вимірювального комплексу «Альфарад плюс», призначеного для моніторингу радону, торону та їх дочірніх продуктів. Цей комплекс може проводити експресні вимірювання та неперервний оніторинг ОА Радону-222 в пробах води в діапазоні значень від 1 Бк/дм<sup>3</sup> до 800 Бк/дм<sup>3</sup> з відносною похибкою ≤30% (рис. 1). Комплекс забезпечений спеціальними пробовідбірними пристроями, які дозволяють проводити вимірювання вмісту Радону-222 у воді. Вимірювальна камера об'ємом 0,94 дм<sup>3</sup> виконана у вигляді циліндра, з розміщеним всередині високовольтним електродом, і герметично закрита фланцями з обох боків. На вхідному фланці встановлено аерозольний фільтр, а в центрі вихідного – напівпровідниковий детектор. Проба води з відбірної ємкості переливається в пробовідбірник 3, який вставляється в барботер 4. В барботері відбувається аерація води і розчинені гази з води за допомогою повітродувки 1 через патрон-осушувач 5 поступають у вимірювальну камеру радонметра 2.

Принцип визначення ОА Радону-222 базується на електростатичному осадженні заряджених іонів <sup>218</sup>Po із відібраної проби повітря на поверхню α-детектора (напівпровідниковий детектор). Ядро <sup>222</sup>Rn, що розпадається всередині камери, залишає продукт свого розпаду ядро <sup>218</sup>Po як позитивно заряджений іон. Електричне поле всередині камери приводить в рух цей позитивно заряджений іон в напрямку до детектора, до якого він електростатично притягується. ОА <sup>222</sup>Rn визначається за кількістю зареєстрованих α-частинок при розпаді атомів <sup>218</sup>Po, які осіли на детектор. Час відбору проби вноситься в пам'ять радонметра і враховується при визначенні кількості розпадів за період часу від відбору проби до початку вимірювання. Після закінчення вимірювання на екрані комплексу висвітлюються результати, які включають дату, час закінчення вимірювання, кількість імпульсів, режим роботи, значення ОА радону в пробі води, відносну похибку вимірювання, тиск, температуру, вологість (рис. 2).



**Рис. 1.** Схема вимірювання ОА в пробі води. 1 – автономна повітрорудка АВ-7; 2 – блок вимірювання ОА; 3 – пробовідбірник води з розсікачем; 4 – барботер; 5 – патрон-осушувач



**Рис. 2.** Екран приладу при вимірюванні ОА Радону-222 в одному із зразків (для прикладу взято пробу № 88).

## Геологія Здолбунівського району

Здолбунівський район Рівненської області знаходиться в межах Волинської височини. Західний схил Українського кристалічного щита багатий на поклади урану, що залягають на глибині 800-1200 м. Волинську височину поділяють на Галицько-Волинську, Буго-Стирську, Стиро-Горинську фізико-географічні підобласті та Гоцанський ландшафт (Gerenchuk et al., 1964). Корисні копалини – торф, крейда, каолінові глини, пісок. Ріки – Устя, Світенька (басейн Горині). Ґрунти сірі, темно-сірі опідзолені і малогумусні чорноземи.

У межах Волинської височини виділяється система субширотних, субмеридіональних і діагональних розломів, якими пронизані кристалічний фундамент та осадовий чохол, у тому числі й тіло однойменної фізико-географічної області. Кристалічний фундамент занурюється на захід під осадові породи на глибину від 50 м до 6000 м та в місцях глибинних розломів переломлюється зі зміною показників нахилу його поверхні. Нахил його поверхні змінюється від 15 до 35 м/км. Як відомо, підземні води масивів кислих кристалічних порід (гранітів) із глибинними розломами зазвичай відрізняються високою концентрацією радону, що досягає 500 Бк/дм<sup>3</sup> і вище.

Стиро-Горинська фізико-географічна підобласть розташована між меридіональними відрізками долин Стиру та Горині і об'єднує ландшафти горбогірного (Повчанський та Мізоцький), хвилястого рівнинно-горбогірного (Луцько-Рівненський) та улоговинно-горбогірного (Здолбунівський) видів широколистяно-лісового типу. Здолбунівський район знаходиться в межах Мізоцького та Здолбунівського ландшафтів. Тіло згаданого Стиро-Горинського геокмлексу залягає на поверхні палеозойських відкладів, що розташовані на глибинах 50 - 100 м і більше, які в долинах Горині, верхів'ях річок Ікви та Усті виходять під четвертинні відклади.

У південній частині Стиро-Горинської підобласті розташована горбогірна гряда, складена найвищими ландшафтами Волинської височини: Мізоцький, Повчанський. Мізоцький ландшафт площею 601 км<sup>2</sup> видовжений із заходу на схід на 56 км. Завдяки бронюючому горизонту вапняків, що знаходиться у верхній неогеновій товщі під четвертинними лесами, його межиріччя мають вигляд «столових гір». Він є найвищим за середніми абсолютними висотами і єдиним на Волинській височині, у якому ділянки з показниками 260 - 300 м займають 35%, а з висотами понад 300 м над рівнем моря – 18% від його загальної площі. Максимальні відмітки у його північно-західній частині сягають 345 м і є меншими порівняно з Повчанським ландшафтом.

Мізоцька морфоструктура з півночі та півдня обривається тектонічними уступами широтного простягання висотою близько 100 м відповідно до прилеглих улоговинних рівнин Здолбунівського ландшафту та фізико-географічної області Малеого Полісся. Східні та західні межі її теж тектонічні і приурочені до долин Горині та Ікви. У центральній частині описуваний ландшафт ускладнений Хмельницьким (з південного сходу на північний захід) та Суцано-Пержанським (з південного заходу на північний схід) розломами. Ці розломи характеризуються значним мінеральним різноманіттям. Наявність багатьох генерацій рудних мінералів (до трьох-п'яти) і їх значні концентрації свідчать про потужні рудоперспективи Пержанського рудного району і дають змогу зарахувати його до класичних найпродуктивніших рудних районів світу.

Між горбогірними та хвилясто-рівнинно-горбогірним ландшафтами в межах Стиро-Горинської підобласті, розташований Золбунівський фізико-географічний район, який є єдиним представником улоговинно-горбогірного виду Волинської височини. Він видовжений від Горині до Ікви на 50 км, загальна площа – 422 км<sup>2</sup> (Karpets, 2013).

Здолбунівський ландшафт залягає на поверхні палеозойських відкладів. Його тіло складається з сеноманських мергелів, пісків та пісковиків, туронської писальної крейди, неогенових глин, пісків та вапняків, четвертинних алювіальних та водно-льодовикових пісків та супісків, делювіальних та лесоподібних суглинків. Тріщинні води вапняків, пісковиків, сланців зазвичай мають концентрацію радону в межах 10 – 100 Бк/дм<sup>3</sup>. Однак в окремих випадках і в цих породах можуть траплятися підвищені концентрації радону. Підземні води в горизонтах ґрунтових вод, що залягають недалеко від поверхні, зазвичай мають концентрацію радону, яка складає менше 50 Бк/дм<sup>3</sup>. У поверхневих водах концентрація радону, як правило, не перевищує 2 – 5 Бк/дм<sup>3</sup>, головним чином, через те, що радон устигає розпастися або вийти в атмосферу за рахунок аерації.

Біля сіл Верхів та Дермань I на північному схилі Мізоцького кряжу знаходяться витoki річки Устя. Інтенсивно розчленований крутими схилами і вузькими улоговинами рельєф місцевості сприяє виходу підземних вод на дні западин та ярів. У результаті утворюються чисельні джерела, із яких витікає вода у вигляді малих, часто розірваних струмків. Усього в Здолбунівському районі зареєстровано 86 природних водних джерел. У межах розширення об'єктів дослідження проби води брали також із деяких артезіанських свердловин та колодязів (криниць) цього регіону.

В межах території Рівненщини знаходиться три артезіанські басейни: Волино-Подільський, Прип'ятський та Український басейн тріщинуватих та пластових вод. За станом підземних вод їх прогнозні запаси у Здолбунівському районі становлять у середньому 55 млн. м<sup>3</sup>/рік, з них затверджені – біля 13 млн. м<sup>3</sup>/рік, що становить 25 % від прогнозних. У хіміко-бактеріологічному відношенні підземні води доброї якості з мінералізацією до 1 г/дм<sup>3</sup>, гідрокарбонатні кальцієві.

## Результати та їх обговорення

Визначена об'ємна активність (ОА) радону в джерельній воді Здолбунівського району Рівненщини коливається в досить широких межах: від 2 Бк/дм<sup>3</sup> до 14 Бк/дм<sup>3</sup> (табл. 1, 2 та рис. 3). Радіоекологічний моніторинг протягом 4 років спостережень (2014-2017 рр.) показав, що концентрації розчиненого у водних джерелах радону по сезонам та рокам суттєво не змінюються.

**Таблиця 1.** Значення об'ємної активності радону, кількість джерел та частота повторення.

ОА, Бк/дм <sup>3</sup>	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Кількість джерел	1	3	5	6	9	6	5	4	4	2	3	4	6
Частота повторів	0.02	0,05	0.09	0.10	0.16	0.10	0.09	0.07	0.07	0.03	0.05	0.07	0.10

**Таблиця 2.** Статистичні обрахунки щодо концентрації <sup>222</sup>Rn у джерелах питної води Здолбунівського району.

Тип зразків	К-сть зразків	Ар. середнє	Геом. середнє	Середнє квадр. відхилення	Медіана	Макс	Мін
Вода джерел, Бк/дм <sup>3</sup>	58	8.05 ± 0.91	7.39	3.47	7.80	14	2

Результати моніторингу дозволяють умовно поділити обстежені водні джерела за вмістом радону на три групи. До III групи ми віднесли джерела з ОА радону у воді до 5 Бк/дм<sup>3</sup>, за рекомендаціями USEPA це безпечна для людини концентрація. До II – 5-10 Бк/дм<sup>3</sup>, за нашими даними це не шкідлива концентрація, за даними USEPA можуть приводити до захворювань на рак, але з малою ймовірністю. До I – більше 10 Бк/дм<sup>3</sup>, шкідлива. Слід зазначити, що всі отримані значення об'ємної активності радону в джерелах знаходяться в безпечних межах, запропонованих міжнародними органами, такими як UNSCEAR, ICRP, NRPB тощо, і, таким чином, не створюють загрози для жителів місцевості. Таке розміщення джерел за вмістом у воді радону, очевидно, пояснюється вертикальним розломом (Хмельницьким, або його відгалуженням), який існує в кристалічному фундаменті Мізоцького та Здолбунівського ландшафтів, через який поступає радон в поверхневі джерельні води. Оскільки даний фундамент занурюється у товщу землі в західному напрямку, то можливе існування нахилених розломів зі сходу (Український щит) на захід (Волинська височина).

Реперне вимірювання ПА ґрунту за випромінюванням Стронцію-90 та Цезію-137 показало досить низькі значення активності, ПА коливаються в діапазоні від 6 до 30 Бк/кг. Слід відмітити наявність кореляції ПА ґрунту з ОА радону у воді (рис. 4). На нашу думку, це свідчить про те, що через означенні вище розломи в корі на поверхню можуть виноситися мікро кількості Урану, Торію, Радію та ін.

Вимірювання природного у-фону показало, що у всіх досліджених точках він знаходиться в межах норми та не перевищують 10-11 мкР/год.

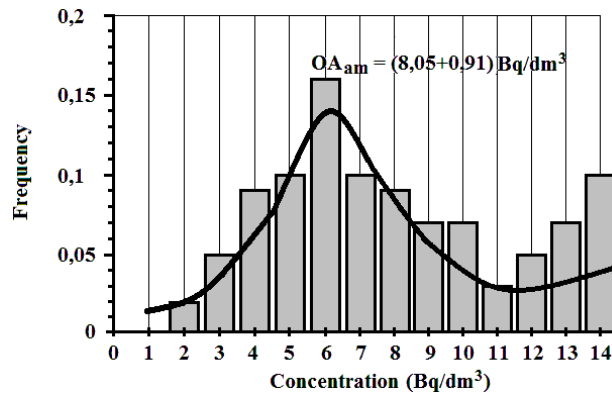


Рис. 3. Частотний розподіл концентрації 222Rn у воді.

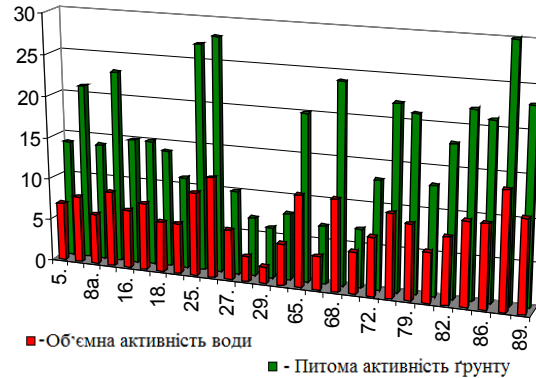


Рис. 4. Гістограми кореляції ОА проб джерельної води (в Бк/дм<sup>3</sup>) і ПА приджерельного ґрунту (в Бк/кг).

Нами проведено розрахунки річної потужності ефективної дози, яку отримують люди за рахунок радону при використуванні досліджуваної води для приготування їжі. Згідно (UNSCEAR, 2000):

$$H_1 \left( \frac{\text{мЗв}}{\text{рік}} \right) = C_{RnW} \times C_W \times EDC, \quad (2)$$

Де  $H_1$  – річна потужність ефективної дози за рахунок радону при використанні води для приготування їжі;  $C_{RnW}$  – концентрація радону у воді (кБк/м<sup>3</sup>);  $C_W$  – питома споживання людиною води (60 л/рік);  $EDC$  – коефіцієнт перерахунку дози (3,5 нЗв/Бк).

Для розрахунку річної потужності ефективної дози, яку отримують люди за рахунок переходу радону з досліджуваної води в повітря приміщення використано іншу формула (UNSCEAR, 2000):

$$H_2 = C_{RnW} \times R_{aw} \times F \times O \times DCF, \quad (3)$$

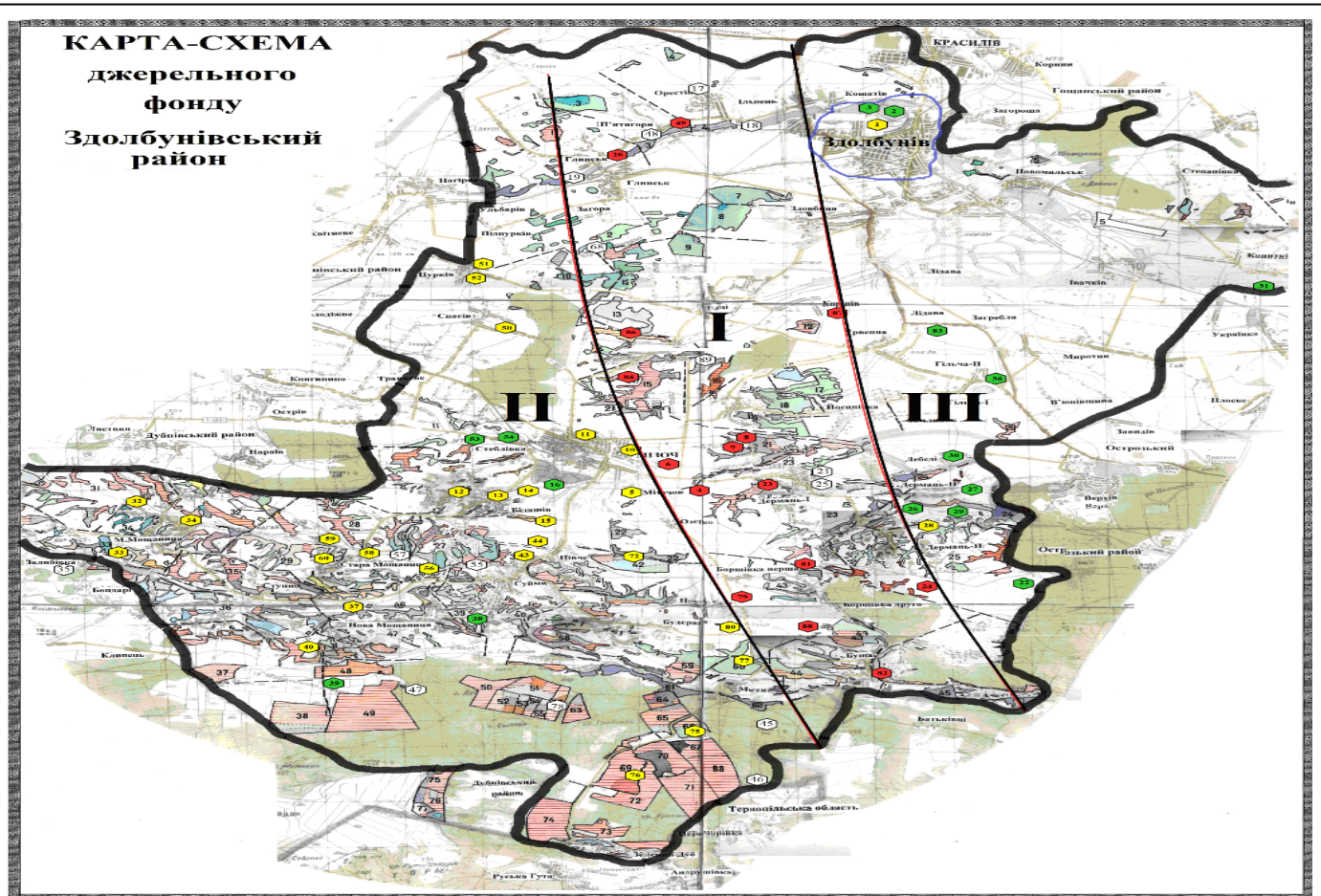
де  $R_{aw}$  – коефіцієнт переходу радону з води в повітря (10-4);  $F$  – коефіцієнт рівноваги між радоном та його дочірніми продуктами розпаду (0,4);  $O$  – середня кількість годин, яку проводить людина в будинку за рік (7000 год/рік);  $DCF$  – коефіцієнт перерахунку дози ( $9 \frac{\text{нЗв} \cdot \text{м}^3}{\text{год} \cdot \text{Бк}}$ ).

Розрахунки показують значення  $H_1$  і  $H_2$  на рівні 1,68 і 0,02 мЗв/рік відповідно.

Нанесені на карту району точки показали, що джерела з високою концентрацією радону (I група) зосереджені в вузькій смузі завширшки 5-7 км, яка простягається майже строго з півдня на північ. Зліва від смуги знаходяться джерела II групи, справа – III (рис. 5).

Для порівняння: найвищі концентрації радону на Рівненщині виявлено в м. Корець, де вміст Радону-222 у воді становить 333-407 Бк/дм<sup>3</sup>, і с. Журавичі на західній межі Рівненської області – 444 Бк/дм<sup>3</sup> (Zalesky, 2014). Корецьке родовище мінеральних вод знаходиться в Корецько-Шепетівській тектонічній зоні. Корецький тектонічний розлом проходить по західній околиці міста, а південну – перетинає Повчинський розлом субширотного спрямування (глибина до 1,5 км, зона тріщинуватості шириною до 1 км).

Для кращого розуміння ситуації по Здолбунівському району Рівненської області, нами проведено порівняння отриманих результатів щодо концентрації радону в воді і отриманих населенням за рахунок цього ефективних доз, з даними інших дослідників по різних країнам (табл. 3). Аналіз показує, що рівень радонової загрози від водних джерел на Здолбунівщині в цілому нижчий, ніж для більшості інших регіонів планети.



**Рис. 5.** Карта радоновмісності природних водних джерел Здолбунівського району Рівненської області. Джерела розподілені за вмістом радону: зелений колір – 2-5 Бк/дм<sup>3</sup>, жовтий – 5-10 Бк/дм<sup>3</sup>, червоний – 10-14 Бк/дм<sup>3</sup>. Джерела оцифровані згідно нумерації, прийнятій в Здолбунівській РДА.

**Таблиця 3.** Порівняння середніх концентрацій радону в зразках води та потужностей ефективних доз (ПЕД) з результатами, отриманими для інших країн.

Місце, країна	Вода (Бк/дм <sup>3</sup> )	ПЕД (мЗв/рік)	Джерело
Ісламабад, Пакистан	88,63	2,023	(Ali et al., 2010)
Муррі, Пакистан	4,38	0,733	(Ali et al., 2010)
Кутахія, Туреччина	0,1-4861,7	300-124200	(Sahin et al., 2013)
Стамбул, Туреччина	1,6-14	-	(Dogan et al., 2018)
о. Джерба, Туніс	0-2860	-	(Telahigue et al., 2018)
Ібадан, Нігерія	2,18-76,75	0,036-1,261	(Ademola & Oyeleke, 2017)
Урмія, Іран	5-49	-	(Amiri et al., 2017)
Індія	8,5	1,7	(Khan, 1994; Singh et al., 2010)
Ліван	0,91-49,6	-	(Abdallah et al., 2007)
Східна Анатолія, Туреччина	3,32	0,015	(Baykara & Dogru, 2006)
Трансільванія, Румунія	0,5-129,3	-	(Cosma et al., 2008)
Етна, Італія	1,8-52,7	-	(D'Alessandro & Vita, 2003)
Північна Кароліна, США	158-811	-	(Vinson et al., 2008)
Токат, Туреччина	0,09-0,83	0,003	(Yigitoglu et al., 2010)
Кенія	37,0	-	(Mustapha et al., 2002)
Фінляндія	1200	-	(Mäkeläinen et al., 2001)
Здолбунівський район, Україна	2-14	1,68	Наші дослідження

Спираючись на отримані нами дані можна припустити, що ще одним прикладним застосуванням вимірювання ОА радону в джерельній воді та ґрунті може бути пошук розломів у кристалічному щиті. Такий паралельний скринінг по радону набагато дешевший і оперативніший за геологічного буріння. Відомо, що якщо у зоні одного розлому утворюється лінійний хрестоподібний виступ (або гранітний вал), то у вузлі перетину тектонічних зон різних напрямів – гранітний купол. Саме куполо- і штокоподібна частина гранітних масивів є найбільш сприятливою для локалізації, наприклад, вольфрам – молібденового зруденіння (S'otmka et al., 2013).

## Висновки

Вперше на великому фактичному матеріалі достовірно визначено рівень об'ємної активності радону в джерельній воді Здолбунівського району. Встановлено, що значення ОА коливається у досить широких межах: від 2 Бк/дм<sup>3</sup> до 14 Бк/дм<sup>3</sup> з середнім арифметичним значенням  $8,05 \pm 0,91$  Бк/дм<sup>3</sup>, середнім геометричним 7,39 Бк/дм<sup>3</sup>, середньоквадратичне відхилення становить 3,47 Бк/дм<sup>3</sup>. Цей показник приблизно співпадає з рівнем ОА радону в Стамбулі (Туреччина) та рівнем середніх значень по Індії, набагато менший ніж у Ісламабаді і Кутахії (Пакистан), та в окремих регіонах США і Фінляндії, але вищий за показники м. Токат (провінція Східна Анатолія, Туреччина) та м. Муррі (Пакистан). У воді 13 джерел (22,4% проб) зафіксовано перевищення рекомендованих Агентством з охорони навколишнього середовища США (USEPA) відносної граничної величини вмісту радону у не питній воді. Проте, ці значення знаходяться в межах стандартів радіаційного захисту, рекомендованих країнами Європейського Союзу. Радіоекологічний моніторинг протягом 4 років спостережень (2014-2017 рр.) показав, що суттєвих коливань концентрацій розчиненого у водних джерелах радону немає. Реперне вимірювання поверхневої активності ґрунту біля джерел забору води виявило кореляцію з об'ємною активністю радону у воді. Вимірювання природного  $\gamma$ -фону показало, що у всіх досліджених точках він знаходиться в межах норми і не перевищують 10-11 мкР/год. Наявність трьох чітких областей з різними значеннями об'ємної активності радону в дослідженому регіоні пояснюється, очевидно, існуванням вертикального розлому (Хмельницького, або його відгалуження) в кристалічному фундаменті Мізоцького та Здолбунівського ландшафтів, через який радон поступає в поверхневі джерельні води. Оскільки даний фундамент занурюється у товщу землі в західному напрямку, то можливе існування нахилених розломів зі сходу (Український щит) на захід (Волинська височина). Тому, одним із паралельних прикладних застосувань вимірювання ОА радону в джерельній воді, та ґрунті може бути пошук розломів у кристалічному щиті. Отримані результати показують, що середні річні ефективні дози від джерельної води, яка використовується в Здолбунівському районі для приготування їжі, становлять 1,68 мЗв/рік. Цей показник є навіть меншим, ніж нижня межа нормованого рівня дії ICRP, тобто 3-10 мЗв/рік (Wrixon, 2008). Оскільки вміст радону у воді є нижчим за визначені різними агентствами з контролю у світі (ICRP, USEPA, UNSCEAR тощо), то можна вважати, що радон розчинений в джерельній воді Здолбунівського району практично не становить жодної загрози здоров'ю та життю людей і тварин у даній місцевості.

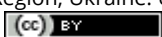
## References

- Abdallah, S.M., Habib, R.R., Nuwayhid, R.Y., Chatila, M., Katul, G. (2007). Radon measurements in well and spring water in Lebanon. *Radiation Measurements*, 42(2), 298-303. doi: 10.1016/j.radmeas.2006.11.004
- Ademola, J. A., Oyeleke, O.A. (2017). Radon-222 in groundwater and effective dose due to ingestion and inhalation in the city of Ibadan, Nigeria. *Journal of Radiological Protection*, 37(1), 189-200. doi: 10.1088/1361-6498/37/1/189
- Ali, N., Khan, E. U., Akhter, P., Khan, F., Waheed, A. (2010) Estimation of mean annual effective dose through radon concentration in the water and indoor air of Islamabad and Murree. *Radiation Protection Dosimetry*, 141(2):183-191. doi:10.1093/rpd/ncq160
- Amiri, V., Nakhaei, M., Lak, R. (2017). Using radon-222 and radium-226 isotopes to deduce the functioning of a coastal aquifer adjacent to a hypersaline lake in NW Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 147, 128-147. doi: 10.1016/j.jseaes.2017.07.015
- Andreev, A. I., Kokovkin, A. A., Medvedeva, M. D. (2011). Radon kak indikator seismogeodinamicheskoy aktivnosti [Radon as an indicator of seismogeodynamic activity]. *Safety in the Technosphere*, 5, 8-13 (in Russian). <https://elibrary.ru/item.asp?id=17032218>
- Baranov, V., Ogil', V., Sokolova, A., Burkser, E. (1930). *Instrukcija k izmereniju radioaktivnosti mineral'nyh istochnikov* [Instructions for Measuring the Radioactivity of Mineral Sources]. Moscow (in Russian).
- Baykara, O., Dogru, M. (2006). Measurements of radon and uranium concentration in water and soil samples from East Anatolian Active Fault Systems (Turkey). *Radiation Measurements*, 41(3), 362-367. doi: 10.1016/j.radmeas.2005.06.016
- Bekman, I. N. (2008). Radon: vrag, vrach i pomoshhnik. Kurs lekcij [Radon: enemy, doctor and assistant. Lecture course]. *Medicine, Moscow* (in Russian).
- Chen, J. (2013). Canadian lung cancer relative risk from radon exposure for short periods in childhood compared to a lifetime. *International journal of environmental research and public health*, 10, 1916-1926. doi: 10.3390/ijerph10051916
- Cosma, C., Moldovan, M., Dicu, T., Kovacs, T. (2008). Radon in water from Transylvania (Romania). *Radiation Measurements*, 43(8), 1423-1428. doi: 10.1016/j.radmeas.2008.05.001
- D'Alessandro, W., Vita, F. (2003). Groundwater radon measurements in the Mt. Etna area. *Journal of Environmental Radioactivity*, 65(2), 187-201. doi: 10.1016/S0265-931X(02)00096-6
- Dogan, M., Ganioglu, E., Sahin, L., Hafizoglu, N. (2018). Investigation of radon concentrations in some reservoirs, spring and tap waters in A degrees Istanbul, Turkey. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 315(3), 653-660. doi: 10.1007/s10967-018-5713-8
- Gerenchuk, K. I., Kojnov, M. M., Cys', P. M. (1964). *Pryrodno-geografichnyj podil L'vivs'kogo ta Podil's'kogo ekonomichnyh rajoniv* [Natural-geographical division of Lviv and Podilsky economic districts]. Publishing House of Lviv University, Lviv (in Ukrainian).
- Gudzenko, V. V., Golikova, T. O., Gudzenko, G. I., Shevchenko, O. L. (2004). Radon v pidzemnyh vodah mista Kyjeva [Radon in the underground waters of the Kiev]. *Bulletin of the Kiev University; Geology*, 29-30, 101-104 (in Ukrainian). [http://www.geolvisnyk.univ.kiev.ua/archive/N29-30\\_2004/index.php](http://www.geolvisnyk.univ.kiev.ua/archive/N29-30_2004/index.php)



- Karpets, Yu. M. (2013). Rol' tektoniki ta geologichnoi' budovy u fizyko-geografichnomu podili Volyns'koi' vysochyny [The role of tectonics and geological structure in the physical and geographical separation of Volyn Upland] (in Ukrainian). <http://geopolitika.crimea.edu/arhiv/2013/tom9-v-1/010karp.pdf>
- Khan, A. J. (1994). Estimation of dose rate for indoor radon from building materials. *Radiation and Environmental Biophysics*, 33(1), 81–84. doi: 10.1007/BF01255276
- Kritz, M. A., Le Roulley, J., Danielsen, E. F. (1990). China Cipper – Fast advective transport of radon – rich air from the Asian boundary layer to the upper troposphere near California. *Tellus, Series B*, 1(42), 46–61. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0889.1990.00007.x>
- Levyn, M. N. (2007). Radon. Uchebnoe posobyie [Radon. Tutorial]. Yzdatel'sko-polygrafycheskyj centr VGU, Voronezh (in Russian).
- Mäkeläinen, I., Arvela, H., Voutilainen, A. (2001). Correlations between radon concentration and indoor gamma dose rate, soil permeability and dwelling substructure and ventilation. *Science of The Total Environment*, 272(1–3), 283–289. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(01\)00705-7](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(01)00705-7)
- Mustapha, A. O., Patel, J. P., Rathore, I. V. S. (2002). Preliminary report on radon concentration in drinking water and indoor air in Kenya. *Environmental Geochemistry and Health*, 24(4), 387–396. <https://link.springer.com/article/10.1023%2FA%3A1020550103471>
- Outkin, V. I. (2000). Radonovaja problema v jekologii [Radon`s problem in ecology]. *Soros Educational Journal*, 3, 73–80 (in Russian). <https://gtpradonkirovohradfeb2012.pbworks.com/w/file/51844934/Уткин%20статья%20Радон.PDF>
- Peterson, E., Aker, A., Kim, J. H., Li, Y., Brand, K., Copes, R. (2013). Lung cancer risk from radon in Ontario, Canada: how many lung cancers can we prevent? *Cancer Causes Control*, 24 (11), 2013–2020. doi: 10.1007/s10552-013-0278-x
- Sahin, L., Cetinkaya, H., Sac, M., Ichedef, M. (2013). Determination of radon and radium concentrations in drinking water samples around the city of Kutahya. *Radiation Protection Dosimetry*, 155(4), 474–482. doi: 10.1093/rpd/nct019
- Singh, J., Singh, H., Singh, S., Bajwa, B. S. (2010). Measurement of soil gas radon and its correlation with indoor radon around some areas of upper Siwaliks, India. *Journal of Radiological Protection*, 30(1), 63–71. doi: 10.1088/0952-4746/30/1/005
- S'omka, V. O., Ponomarenko, O. M., Bondarenko, S. M., Dons'kyj, M. O., S'omka, L. V. (2013). Geologo-strukturni umovy lokalizacii' molibdeno- i vol'framonosnyh metasomatytiv Ukrai'ns'kogo shhyta [Geological and structural conditions of localization of molybdenum- and tungsten-bearing metasomatites of the Ukrainian shield]. *Transactions of UkrNDMI NAN Ukraine*, 13 (part II), 350–375 (in Ukrainian). <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/57260/23-Syomka.pdf?sequence=1>
- Telahigue, F., Agoubi, B., Souid, F., Kharroubi, A. (2018). Groundwater chemistry and radon-222 distribution in Jerba Island, Tunisia. *Journal of Environmental Radioactivity*, 182, 74–84. doi: 10.1016/j.jenvrad.2017.11.025
- Tregub, N. V., Shumakova, E. M. (2015). Metodicheskie aspekty monitoringa koncentracii radona v prizemnom sloe v svyazi s projavleniem geodinamicheskoy aktivnosti na territorii Samarskoj oblasti [Methodological aspects of monitoring the radon concentration in the surface layer in connection with the manifestation of geodynamic activity in the territory of the Samara Region]. *Science and Education in the Modern World*, 4(4), 26–32 (in Russian). <https://elibrary.ru/contents.asp?issueid=1524681>
- Truta, L. A., Hofmann, W., Cosma, C. (2014). Lung cancer risk due to residential radon exposures: estimation and prevention. *Radiation Protection Dosimetry*, 160, 112–116. doi: 10.1093/rpd/ncu062
- Tyhonov, M. N. (2009). Radon: istochniki, dozy i nereshennyye voprosy [Radon: Sources, Doses and Unresolved Issues]. *Sanitary doctor*, 12, 34–42 (in Russian).
- UNSCEAR. (2000). United Nations Scientific Committee on the effects of atomic radiations. The General Assembly with Scientific Annex (New York, United Nations). [http://www.unscear.org/unscear/en/publications/2000\\_1.html](http://www.unscear.org/unscear/en/publications/2000_1.html)
- USEPA. (1991). National primary drinking water regulations; radionuclides; proposed rules. *Federal Regist.* 56(138), 33050. <https://www.federalregister.gov/documents/2000/12/07/00-30421/national-primary-drinking-water-regulations-radionuclides-final-rule>
- Vinson, D. S., Campbell, T. R., Vengosh, A. (2008). Radon transfer from groundwater used in showers to indoor air. *Applied Geochemistry*, 23(9), 2676–2685. doi: 10.1016/j.apgeochem.2008.05.021
- Wrixon, A. D. (2008). Review, new ICRP recommendations. *J. Radio. Protec.* 28, 161–168. <https://pdfs.semanticscholar.org/fbc0/91ce761c3dde2e830b4e2b6e90a2e936c9fb.pdf>
- Yigitoglu, I., Oner, F., Yalim, H. A., Akkurt, A., Okur, A., Ozkan, A. (2010). Radon concentrations in water in the region of Tokat city in Turkey. *Radiation Protection Dosimetry*, 142(2–4), 358–362. doi: 10.1093/rpd/ncq1
- Zaleskyi, I. I. (2014). Radonovi vody Rivnenshhyny [Radon water of Rivne region]. *Bulletin of National University of Water and Environmental Engineering, series "Agricultural Sciences"*, 65(1), 88–93 (in Ukrainian). <http://ep3.nuwm.edu.ua/1322/1/Vs6511.pdf>
- Zelensky, A. V., Buzinny, M. G., Los, I. P. (1993). Radon-222 in water: concentrations, doses, standards. *Problems of Radiation Medicine*, 5, 71–83 (in Russian).

**Citation:** Lebed, O.O., Myslinchuk, V.O., Trusheva, S.S., Mandyhra, Y.M., Lysytsya, A.V. (2018). Radon in the spring water of the Zdolbuniv Region, Ukraine. *Ukrainian Journal of Ecology*, 8(3), 83–91.



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