

Узагальнені дані 20-річного моніторингу радону-222 у питній воді України

- **Бузинний Михайло Георгійович**, д-р біол. наук, ст. науковий співробітник
Державна установа «Інститут громадського здоров'я ім. О. М. Марзєєва
Національної академії медичних наук України», м. Київ, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2812-573X>
- **Михайлова Любов Леонідівна**
Державна установа «Інститут громадського здоров'я ім. О. М. Марзєєва
Національної академії медичних наук України», м. Київ, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4913-4344>

У статті наведено результати статистичного аналізу питомої активності ^{222}Rn у зразках питної води, відібраних з артезіанських свердловин в різних регіонах України протягом 2003 – 2021 рр. Робота виконана в лабораторії радіаційного моніторингу Державної установи «Інститут громадського здоров'я ім. О.М. Марзєєва НАМН України». Періоди усереднення результатів вимірювань (три та чотири роки) пов'язані з вимогами нормативних актів та охопленням зразків води з географічно нових, не охоплених раніше, територій України. Наведено середні арифметичні значення та середньоквадратичні відхилення, а також середні геометричні, медіанні, мінімальні та максимальні значення питомої активності ^{222}Rn у 1228 зразках питної води з артезіанських свердловин. Значення середньоквадратичних відхилень результатів вимірювань та близькість медіанних та середніх геометричних значень свідчать про логнормальний характер розподілу питомої активності ^{222}Rn у вибірці. Встановлено, що для 11 % досліджених зразків води вміст ^{222}Rn перевищує встановлений державний норматив для питної води (100 Бк/л). Виявлені високі рівні ^{222}Rn мають відношення до окремих територій, де необхідне більш детальне вивчення радіоактивності підземних вод з метою підготовки та реалізації заходів для поліпшення радіаційного стану питної води. Порівняння результатів дослідження питомої активності ^{222}Rn у питній воді за 2003 – 2021 рр. з відповідними даними за 1989 – 1991 рр. вказує на їх суттєву відмінність: для періоду 1989 – 1991 рр. середні арифметичні та середні геометричні значення значно вищі. Це пов'язано з тим, що відбірка у 1989 – 1991 рр. була більш випадковою, сконцентрованою переважно на території кристалічного щита та меншою мірою – поза його межами. Водночас дані 2003 – 2021 рр. охоплюють значно більшу кількість регіонів, а в розрахунки внесено повторні (з трирічним періодом) результати вимірювань ^{222}Rn для деяких джерел.

З метою встановлення чіткого стану радіоактивності питної води в Україні та з метою мінімізації опромінення людей від її споживання моніторинг вмісту ^{222}Rn у питній воді для окремих регіонів України має бути поширений на джерела води, які залишаються недослідженими.

Ключові слова: артезіанська свердловина, доза опромінення, медіана, питна вода, природні радіонукліди, радон-222 (^{222}Rn), середнє арифметичне, середнє геометричне.

© Бузинний М. Г., Михайлова Л. Л., 2022

Вступ

Природний радіоактивний газ ^{222}Rn є суттєвим джерелом внутрішнього опромінення людини. ^{222}Rn , який міститься у воді, може потрапляти в організм безпосередньо під час вживання води всередину або під час вдихання з повітря у житлових приміщеннях, де він накопичується від тривалого побутового використання води у ванній кімнаті,

кухні, у місцях розташування пристроїв для очищення води. Його проникнення в організм людини може спричинити опромінення населення, яке несе шкоду для здоров'я, зокрема через онкологічні захворювання шлунку або легенів. ^{222}Rn належить до ланцюга розпаду природного урану. Уран у геологічних породах у результаті послідовності ядерних перетворень розпадається до ^{226}Ra , який стає джерелом ^{222}Rn . ^{222}Rn з породи вивільняється в оточуючий простір (ґрунт, вода), де накопичується

ся і мігрує з підземними водами. На поверхні певна частина ^{222}Rn , яка міститься в ґрунті, виділяється у приземний шар повітря, де розбавляється і на відкритих просторах зазвичай не складає небезпеки для людини. Водночас, коли ^{222}Rn потрапляє всередину приміщення безпосередньо з ґрунту, там він може накопичуватися в небезпечних кількостях. Про це свідчать численні світові дослідження [1], [2]. Так, уже перші результати вимірювання вмісту ^{222}Rn в повітрі житлових будинків в Україні [3], [4] показали, що його потрапляння в приміщення може бути суттєвим на деяких територіях. Тоді ж, на початку 1990-х, в Україні в сільських житлових приміщеннях виявлені також високі рівні торону (^{220}Rn), які ще більше зумовлені відсутністю ізоляції від ґрунту [5]. На територіях з характерними високими рівнями вмісту урану і ^{226}Ra в породах і ґрунтах значну кількість ^{222}Rn виявляють також у воді артезіанських свердловин та колодязів. За побутового використання цієї води для приготування їжі, миття посуду, приймання душу тощо ^{222}Rn виходить із води, проникає до житлових приміщень, накопичується там, перерозподіляється і, якщо не проводяться заходи з його видалення, опромінює мешканців. У разі тривалого споживання води з підвищеним вмістом радіоактивних речовин може відбуватися додаткове опромінення, зокрема і внаслідок ^{222}Rn [1]. Отже, збір і аналіз інформації щодо вмісту ^{222}Rn у підземній воді, яка використовується для питного та господарського забезпечення, є важливим елементом оцінки різних джерел опромінення та збереження здоров'я населення.

Аналіз літературних даних

Вміст природних радіонуклідів у питній воді активно вивчається низкою країн світу з метою оцінки опромінення людей [1], [2]. На основі інформації, отриманої в різних країнах, розробляються нормативні документи, настанови та рекомендації з метою мінімізації можливої шкоди здоров'ю населення від радіоактивних елементів, присутніх у питній воді. Ці документи є основою розвитку концепцій та підходів щодо управління ризиками для здоров'я від споживання питної води, яка містить радіонукліди.

Одним із нещодавніх документів Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ) є Настанова щодо управління радіоактивністю в питній воді (Management of Radioactivity in Drinking-Water) 2018 р. [1]. У цій Наставі наголошено, що хоча ризики для здоров'я від присутніх у питній воді радіонуклідів зазвичай є невисокими для людей, які мешкають на територіях з підвищеними рівнями природної радіоактивності, ці ризики можуть проявитися згодом, після тривалого постійного споживання води зі свердловин. Щоб запобігти цьому,

ВООЗ рекомендує контролювати вміст радіонуклідів у воді і, за необхідності, вживати профілактичних заходів.

Основні принципи та рекомендації щодо радіаційного захисту [6], [7] вироблено Міжнародною комісією з радіологічного захисту (МКРЗ). Згодом саме вони стали основою багатьох національних нормативів і використовуються в діяльності Міжнародного агентства з атомної енергії (МАГАТЕ) [8].

Збором, вивченням і узагальненням інформації щодо вмісту радіонуклідів у питній воді країн світу та можливих наслідків для здоров'я займається Науковий комітет ООН з дії атомної радіації (НКДАР ООН). Згідно зі звітом НКДАР ООН 2000 р. [2], у середньому 90 % внутрішньої дози опромінення, пов'язаної з ^{222}Rn у питній воді, реалізується саме внаслідок його потрапляння в організм через органи дихання, тоді як потрапляння ^{222}Rn з напоями та їжею складає лише 10 %. Частка ^{222}Rn , який може виділятися в повітря приміщення з води, залежить від загального споживання води в будинку, планування будинку, ступеня його провітрювання і може суттєво коливатись з часом. Відомо, що за побутового використання води із питомою активністю ^{222}Rn 1000 Бк/л активність ^{222}Rn в приміщенні може збільшуватися додатково на 100 Бк/м³ [3].

Вироблені принципи радіаційного захисту, розвиток методів дозиметрії та аналіз великих масивів інформації щодо вмісту радіонуклідів у воді створили підґрунтя для прийняття Радою Європейського Союзу 15 липня 1980 року Директиви 80/778/ЄС про якість води, призначеної для споживання людиною [9]. Згодом окремі положення цієї Директиви було скориговано, а зміни відображено в Директиві 98/83/ЄС від 3 листопада 1998 року [10].

Для оцінки радіаційної якості питної води Директива [10] встановлює граничні значення параметрів (названих індикаторними), у разі перевищення яких від держави вимагається ухвалювати рішення щодо необхідності втручання, втім Директива [8] не встановлює ніяких обмежень щодо вмісту конкретних радіонуклідів у питній воді.

У листопаді 2013 року було прийнято Директиву Ради 2013/51/ EURATOM [11], яка, на відміну від Директиви [10], регулює вміст радіонуклідів у питній воді, зокрема ^{222}Rn , встановлюючи параметричне значення 100 Бк/л.

Як було зазначено вище, рівні вмісту ^{222}Rn у воді підземних джерел залежать від географічного розташування, а інтенсивність їх вивчення визначається актуальністю «радонового питання» для певної країни або регіону. Особливий інтерес для нас становить досвід країн, близьких Україні за актуальністю проблеми підвищених рівнів ^{222}Rn у воді, як-то – Фінляндії [12], Німеччини [13], Австрії [14], [15], Естонії [16], Ірландії [17], Польщі [18], [19], Угорщини [20].

У Фінляндії природну радіоактивність питної води визначали в більш ніж півтисячі приватних свердловин [12]. Приблизно для 10 % свердловин питома активність ^{222}Rn була вищою 1000 Бк/л. Для споживачів свердловинної води оцінка ефективної дози, зумовленої ^{222}Rn , склала 75 % загальної дози, отриманої від усіх природних радіонуклідів.

Варіації вмісту природних радіонуклідів і оцінку впливу опромінення від споживання питної води досліджено в Німеччині [13]. Установлено, що опромінення переважно створюють ^{222}Rn , ^{228}Ra , ^{210}Po і ^{210}Pb . Питома активність ^{222}Rn у воді зі свердловин складала від 1 до 1800 Бк/л, що дає один із переважаючих внесків у дозу опромінення дорослих (> 17 років) та дітей (від 0 до 1 року).

Питома активність ^{222}Rn у підземних водах Австрії, за даними [14] і [15], в деяких випадках перевищує 100 – 200 Бк/л.

В Естонії під егідою Європейського Союзу було реалізовано проєкт [16] з дослідження і створення бази даних щодо радіаційних характеристик питної води і результатів анкетування населення. Дані дозволили оцінити ефективні дози опромінення населення, зокрема для дітей та немовлят. Важливим результатом виконання цього проєкту було вироблення стратегії моніторингу (вибору точок та частоти відбору проб води) [17].

В Ірландії вимірювали вміст ^{222}Rn в 217 джерелах ґрунтових вод, відбираючи по три зразки для врахування мінливості активності ^{222}Rn в період між відбором та вимірюванням [18]. За вмістом ^{222}Rn всі джерела були визнані такими, що відповідають національному нормативу 500 Бк/л. Максимальна активність ^{222}Rn у воді складала 345 Бк/л.

Підвищені рівні ^{222}Rn мають місце в підземних водах Польщі [19], [20]. За даними [20], в окремих місцях Судет та Південної Польщі питома активність ^{222}Rn у воді свердловин сягає понад 3000 Бк/л (середні значення для цих регіонів складають відповідно 541 і 437 Бк/л).

Дані щодо вмісту ^{222}Rn у підземних водах європейських країн, зібрані Jobbágy [21], свідчать про підвищені рівні цього радіонукліда на територіях Угорщини, Іспанії, Португалії, Бельгії, Швеції, Норвегії. В [21] також наведено інформацію щодо методів вимірювання вмісту ^{222}Rn , які на сьогодні широко використовуються в рутинних дослідженнях радіоактивності питної води.

Розуміння важливості оцінки ризиків внутрішнього опромінення від ^{222}Rn у воді зумовило необхідність систематичних спостережень за вмістом радіонуклідів у питній воді та вироблення заходів для поліпшення її радіаційних характеристик.

Після виявлення областей, де ризики появи високих рівнів ^{222}Rn у питній воді є високими, актуальним стає вжиття заходів для видалення радіоактивності із води. Наприкінці 1990-х років у Європейському Союзі було ініційовано міжнарод-

ний проєкт TENAWA [22]. Метою цього проєкту була перевірка можливостей різного устаткування і методів видалення радіоактивних елементів з питної води. У результаті його виконання узагальнено дані щодо вмісту радіонуклідів у підземних, поверхневих, мінеральних водах 17 країн Європейського Союзу, проведено велику кількість експериментів із застосування різного обладнання і способів очищення води від радіонуклідів, зокрема ^{222}Rn , на території Швеції та Фінляндії. Виконання проєкту дозволило розробити основні засади з планування експериментів (встановлення місць і частоти відбору проб), технологій обробки води та поводження з відходами з підвищеною радіоактивністю, що накопичуються під час очищення води. Важливу роль відігравав обмін інформацією між партнерами проєкту [22] щодо різних технологій очищення, які ними тестувалися. Розглядали такі методи, як-то аерація та фільтрація на гранульованому активованому вугіллі, витримування води до самовільного розпаду ^{222}Rn . Результати виконання проєкту TENAWA [22] становлять практичну користь і для України, оскільки вони значною мірою стосуються видалення ^{222}Rn з питної води [23].

Вивчення природної радіоактивності води в Україні

Вивчення вмісту ^{222}Rn у питній воді України було розпочато в 1989 році. Результати систематизованих досліджень вмісту природних радіонуклідів у питній воді опубліковано в 1993 році [24], [26]. До 1992 року в ДУ «Національний науковий центр радіаційної медицини» було досліджено більше 1400 зразків води зі свердловин п'яти областей України, які географічно знаходяться на Українському кристалічному щиті, та трьох областей, розташованих поза його межами. Отримані дані засвідчили надзвичайну неоднорідність вмісту ^{222}Rn у підземних водах різних регіонів країни. Значна частина вказаних даних ^{222}Rn у воді свердловин у межах кристалічного щита була на рівні кількох сот бекерелів на літр з максимальним значенням 2660 Бк/л і значно перевищувала активність ^{222}Rn на територіях поза межами кристалічного щита. Ці дані актуалізували проблему, спонукали розглядати ^{222}Rn як важливий фактор формування доз внутрішнього опромінення населення України і стали основою для вироблення національних нормативів [26]. За результатами цих досліджень було підтверджено отримане раніше [3] значення усередненого коефіцієнта переходу вода-повітря, що дорівнює $1,0 \times 10^{-4}$. Це означає, що ^{222}Rn у воді з питомою активністю, наприклад 1000 Бк/л, буде зумовлювати збільшення на 100 Бк/м³ вміст ^{222}Rn у повітрі приміщення).

У документі «Норми радіаційної безпеки України» (НРБУ-97) [26], затвердженому в 1997 році, встановлено рівень дій щодо питомої активності ^{222}Rn у воді питного та господарського водозабезпечення як 100 Бк/л. Згодом питому активність ^{222}Rn у воді стали досліджувати на замовлення комунальних підприємств, постачальників води та виробників харчової продукції. Бужинним М. [27] було проаналізовано результати вимірювання вмісту ^{222}Rn у 140 зразках води, відібраних у межах Київської, Вінницької та Житомирської областей протягом 2001 - 2002 рр. Результати показали низькі та помірні значення питомої активності ^{222}Rn у воді свердловин з Вінницької області, представленої одним районом, а також м. Києва та його найближчих околиць. У межах Київської області в південному напрямку спостерігали зростання питомої активності ^{222}Rn у воді свердловин, в окремих випадках – перевищення нормативу. Питома активність ^{222}Rn у воді Житомирської області також була надзвичайно нерівномірною і змінювалася від 2 до 350 Бк/л.

Починаючи з 2003 року в лабораторії радіаційного моніторингу Державної установи «Інститут громадського здоров'я ім. О. М. Марзеєва НАМН України» систематичні дослідження радіаційних показників води виконувалися на комерційній основі, в межах періодичного контролю якості води відповідно до вимог чинного законодавства [26], [30], водночас розширювався перелік населених пунктів різних регіонів країни, з яких надходили зразки [29], [32].

Після затвердження 2010 року Державних санітарних правил та норм ДСанПіН 2.2.4-171-10 [30] акцент у дослідженнях радіаційної якості питної води було перенесено на вимірювання сумарної альфа- та сумарної бета-активності. Причому, зважаючи на досвід попередніх досліджень, які свідчать про високу ймовірність появи високих рівнів ^{222}Rn у воді деяких частин території України, вимірювання цього важливого радіаційного показника проводили для всіх зразків.

У цій статті проведено статистичний аналіз результатів вимірювання вмісту ^{222}Rn у воді підземних джерел різних областей України за 20 років спостережень. Метою є встановлення рівнів ^{222}Rn , характерних для окремих областей України і виявлення регіонів, де необхідні більш детальні дослідження ^{222}Rn у питній воді..

Експериментальна частина

Матеріали дослідження. Зразки води доставлялися в лабораторію радіаційного моніторингу Державної установи «Інститут громадського здоров'я ім. О.М. Марзеєва НАМН України» безпосередньо представниками замовника або поштови-

ми службами. Відбір зразків замовники здійснювали своїми силами, але перед цим кожен із них був поінформований про правила відбору: використання чистого, бажано скляного посуду; у разі використання пластикової тари перед заповненням її потрібно було декілька разів прополоскати водою, що відбирається; для уникнення втрати ^{222}Rn воду потрібно було наливати в ємність повільно, тару закривати герметично; доцільним вважався відбір декількох зразків. Під час консультування замовників щоразу наголошували, що період між відбором зразка та надходженням до лабораторії має складати не більше двох-трьох діб. Наклейки на ємностях з відібраними зразками мали містити назву зразка води, а також дату, час і місце його відбору

Експериментальні методи. Після надходження зразків у лабораторію їх негайно готували до вимірювань на вміст ^{222}Rn . У спеціальні пластикові або скляні флакони за допомогою піпетки набирали 10 мл сцинтиляційної рідини на основі толуолу або орто-ксилолу і додавали 10 мл води. Як сцинтилятори використовували РРО – 4 г/л та РОРОР – 0,1 г/л. Пробу ретельно струшували для перемішування фаз і розміщували в приладі для вимірювань (пробу вважали готовою до вимірювань через 10 хв. після розділення фаз). Вимірювання питомої активності ^{222}Rn проводили за допомогою низькофонового рідинно-сцинтиляційного спектрометра Quantulus 1220TM. Тривалість вимірювань складала 20 хв. Для розрахунків використовували частину спектра альфа-випромінювання, що відповідає сумі спектрів ^{222}Rn та ^{218}Po ; ефективність реєстрації складала близько 200 %. Під час підготовки остаточного результату вимірювання ^{222}Rn вносили поправку на радіоактивний розпад за час від моменту відбору проби води до моменту вимірювань. Якість результатів вимірювань засвідчувалась неодноразовою участю в міжлабораторних порівняльних тестах, зокрема, [28].

Результати та обговорення

Для статистичної обробки результатів вимірювань вмісту ^{222}Rn у воді використовували можливість програми Excel. Визначали такі характеристики, як середнє арифметичне, середньоквадратичне відхилення, медіана, середнє геометричне, мінімальне та максимальне значення. У таблиці 1 результати аналізу розподілені на умовні періоди – з 2003 до 2006 рр. – з часу формування лабораторії радіаційного моніторингу, коли кількість звернень щодо вимірювань вмісту природних радіонуклідів у воді була відносно невеликою і охоплювала лише частину областей України. З 2007 до 2010 рр. додавалися результати вимірювань з більшої кількості територій. З 2010 року, після затвердження

Таблиця 1 – Узагальнені результати вимірювання питомої активності ^{222}Rn у воді свердловин України за 2003 – 2021 рр. та дані 1988-1991 рр. [21]

Період	Кількість результатів	Середнє арифметичне, Бк/л	СКВ, Бк/л	Медіана, Бк/л	Середнє геометричне, Бк/л	Мінімальне значення, Бк/л	Максимальне значення, Бк/л
2003-2006	193	39,3	79,6	6,5	10,1	0,4	450,0
2007-2010	216	24,5	72,5	4,4	5,7	0,2	650,0
2011-2013	222	37,3	106,4	4,8	6,0	0,1	895,0
2014-2016	248	39,1	94,8	8,0	9,8	0,3	761,0
2017-2019	204	47,4	104,1	6,0	10,1	0,1	560,0
2020-2021	145	18,3	40,0	7,5	7,0	0,4	335,0
2003-2021	1228	35,2	88,5	6,0	7,9	0,1	895,0
1988 – 1991*	1536	102	-	-	26,0		2661

Примітка. * За даними [24].

ДСанПІН 2.2.4-171-10 [30], кількість звернень зростає і географічне походження зразків розширилося. Відповідно до вимог ДСанПІН 2.2.4-171-10 [30] було встановлено періодичність досліджень – три роки. Отже, у таблиці 1 після 2010 року періоди, за якими аналізувалися результати, склали три роки. Для кожного із періодів характерний значний розкид результатів – від десятих часток до кількох сот Бк/кг, а за весь період спостережень він складає від 0,1 до 895 Бк/кг. Якщо розглядати середні значення вмісту питомої активності ^{222}Rn та їх середньоквадратичні відхилення, то для наборів значень середньоквадратичні відхилення вдвічі і майже втричі більші за середні значення. Це свідчить про те, що дані ^{222}Rn у воді свердловин через надто широкий діапазон отрима-

них величин не відповідають нормальному закону розподілу. Для різних періодів було розраховано також медіану та середнє геометричне значення. На рисунку 1 показано розподіл середніх арифметичних, медіанних та середніх геометричних значень питомої активності ^{222}Rn у воді свердловин України за періодами.

Вигляд гістограми демонструє сильний вплив екстремальних результатів на середні арифметичні значення і суттєву різницю між середніми арифметичними та медіанними значеннями для усіх періодів спостережень.

Між тим, і медіанні, і середні геометричні значення на гістограмі є досить близькими, що говорить про те, що частотний розподіл відповідних даних подібний до логнормального.

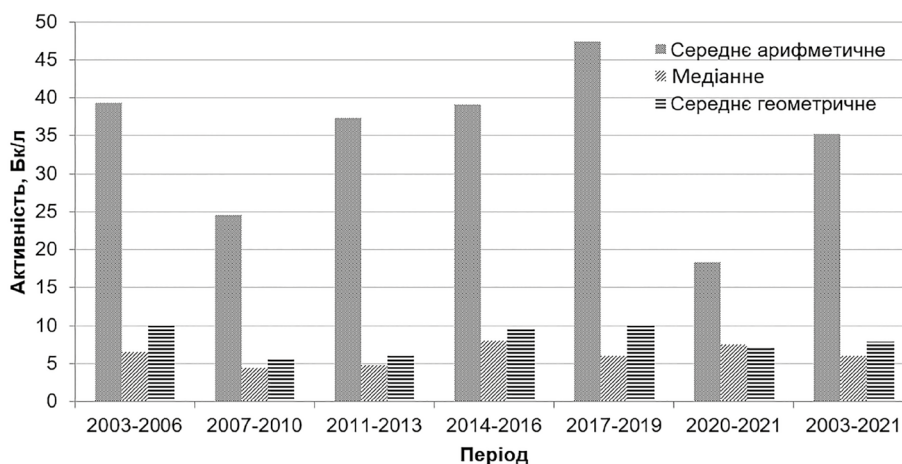


Рисунок 1 – Розподіл середніх арифметичних, медіанних та середніх геометричних значень питомої активності ^{222}Rn у воді свердловин України (2003 – 2021 рр.)

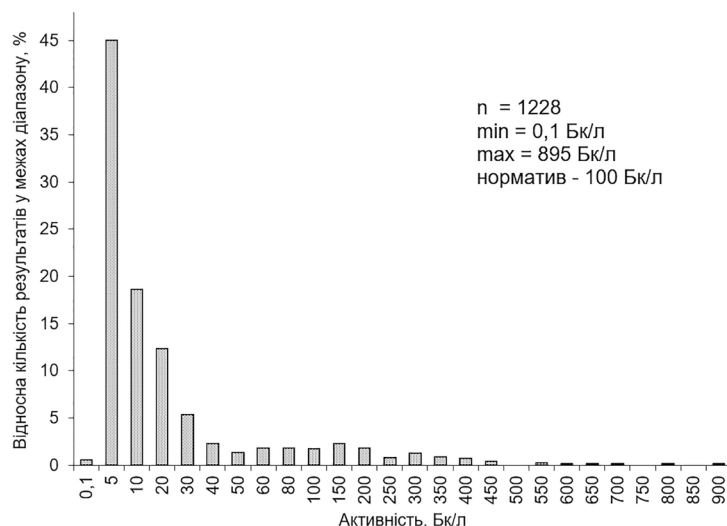


Рисунок 2 – Розподіл значень питомої активності ²²²Rn у воді свердловин України (2003 – 2021 рр.)

Таблиця 2 – Питома активність ²²²Rn у воді свердловин України (2003 – 2021 рр.)

№	Область	2003 – 2010			2011 – 2021			2003 – 2021		
		n	Середнє, Бк/л	Діапазон, Бк/л	n	Середнє, Бк/л	Діапазон, Бк/л	n	Середнє, Бк/л	Діапазон, Бк/л
1	Вінницька	17	19,1	2,0 – 105	88	19,9	1,0 – 290	105	19,8	1 – 290
2	Волинська	–			2	8,0	2 – 14	2	8,0	2 – 14
3	Дніпропетровська	5	17,4	0,8 – 30	11	6,0	0,5 – 18	16	9,6	0,5 – 30
4	Донецька	2	225,4	0,8 – 450	1	127,0	–	3	192,6	0,8 – 450
5	Житомирська	107	66,7	0,9 – 377	89	61,7	0,4 – 388	196	64,4	0,4 – 388
6	Закарпатська	5	2,0	0,5 – 3	7	10,2	1 – 17	12	6,7	0,5 – 17
7	Запорізька	15	24,6	1,5 – 197	14	11,3	0,5 – 52	29	18,2	0,5 – 197
8	Івано-Франківська	5	2,8	0,2 – 12,5	9	2,3	0,4 – 5,6	14	2,5	0,2 – 12,5
9	Київська	125	25,9	0,4 – 650	258	10,7	0,1 – 329	383	15,7	0,1 – 650
10	Кіровоградська	1	0,7	–	9	48,4	1 – 260	10	43,7	0,7 – 260
11	Луганська	39	6,3	1 – 62	7	3,2	0,4 – 14	46	5,9	0,4 – 62
12	Львівська	–			11	10,3	3,8 – 23	11	10,3	3,8 – 23
13	Миколаївська	25	3,3	0,5 – 8	20	21,6	0,3 – 218	45	11,4	0,3 – 218
14	Одеська	1	3,8	–	6	12,6	0,5 – 30	7	11,0	0,5 – 30
15	Полтавська	16	10,7	1,3 – 24,6	45	6,2	0,6 – 30,7	61	7,4	0,6 – 30,7
16	Рівненська	5	3,9	0,8 – 8,3	16	12,1	0,5 – 52	21	10,1	0,5 – 52
17	Сумська	1	1,0	–	1	20,0	–	2	10,5	1 – 20
18	Тернопільська	1	5,8	–	3	18,1	3,2 – 27	3	15,0	3,2 – 27
19	Харківська	1	6,9	–	26	5,1	0,3 – 16	27	5,1	0,3 – 16
20	Херсонська	2	268,8	7,5 – 530	2	3,3	3 – 3,6	4	136,0	3 – 530
21	Хмельницька	1	2,5	–	8	6,6	0,2 – 14,1	9	6,1	0,2 – 14,1
22	Черкаська	4	6,5	0,8 – 18,2	138	129,5	0,3 – 895	142	126,0	0,3 – 895
23	Чернігівська	31	3,8	1 – 16	48	4,8	0,1 – 21	79	4,4	0,1 – 21

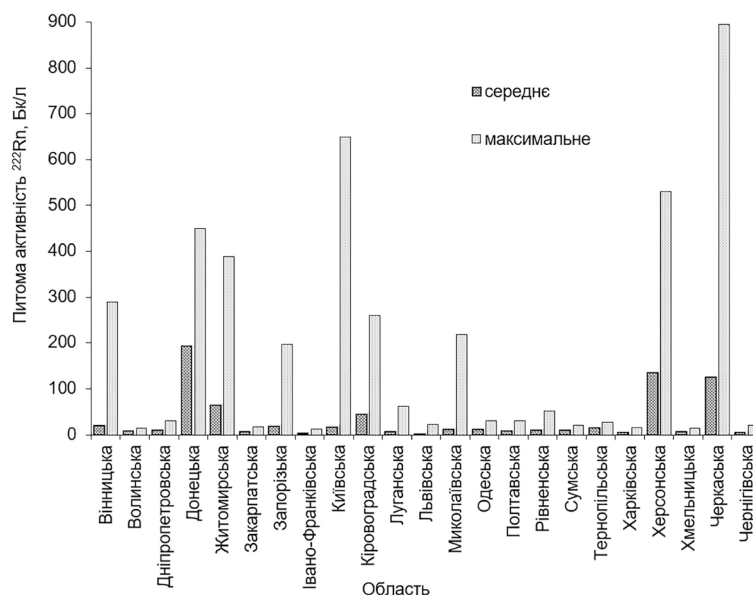


Рисунок 3 – Середні та максимальні значення питомої активності ²²²Rn у воді свердловин адміністративних областей України (2003 – 2021 рр.)

На рисунку 2 зображено розподіл усіх отриманих за 2003 – 2021 рр. значень питомої активності ²²²Rn у воді свердловин України. Встановлено, що для 46 % всієї кількості проб води питома активність ²²²Rn не перевищувала 5 Бк/л; для 30 % вона складала від 10 до 20 Бк/л, а для 13 % – від 30 до 80 Бк/л.

Для решти 11 % зразків води питома активність ²²²Rn перевищувала норматив (100 Бк/л) у три – чотири, інколи у п’ять – дев’ять разів. Такі значення характерні для окремих регіонів України.

У таблиці 2 наведено результати вимірювання питомої активності ²²²Rn у воді свердловин за адміністративними областями. Вони свідчать про випадки перевищень нормативу у Вінницькій, Донецькій, Житомирській, Київській, Кіровоградській, Миколаївській, Херсонській та Черкаській областях. Найбільшу кількість зразків води було надано із Київської та Житомирської областей, а також Черкаської та Вінницької.

Це можна пояснити як їх відносно близьким розташуванням до вимірювальної лабораторії саме в м. Києві, так і вимогам контролюючих органів щодо необхідності періодичної перевірки радіаційної якості питної води на території вказаних областей. До того ж, вказані області переважно знаходяться в межах українського кристалічного щита, де ймовірні високі рівні природної радіоактивності в підземних джерелах води. З іншого боку, з таблиці 2 видно, що високі значення питомої активності ²²²Rn зустрічаються у воді джерел південно-східних і південних регіонів України, а саме областей: Донецької (до 450 Бк/л), Запорізької (до 197 Бк/л), Кіровоградської (до 260 Бк/л), Миколаївської (до 218 Бк/л) та Херсонської (до 530 Бк/л). Для даних характерний значний розкид. Зважаючи

на те, що, наприклад, на території Кіровоградської області працюють шахти з видобутку урану, ймовірність виявлення у підземних водах помітних рівнів природних радіонуклідів є досить високою. Це стосується й інших промислових регіонів.

Рисунок 3, на якому зображено середні та максимальні значення вмісту ²²²Rn у воді за адміністративними областями України, демонструє неоднорідний характер вмісту ²²²Rn як по всій території країни, так і в межах окремих областей.

Висновки

1. Статистичний аналіз результатів 20-річного періоду дослідження питомої активності ²²²Rn у зразках води із свердловин підтвердив її надзвичайну неоднорідність на території України та недостатню вивченість для низки областей.
2. Результати статистичного аналізу 1228 зразків води виявили, що для 11 % підземних джерел в Україні досліджені рівні ²²²Rn перевищують державний норматив 100 Бк/л.
3. Найбільшими значення питомої активності ²²²Rn є у Вінницькій, Донецькій, Житомирській, Київській, Кіровоградській, Миколаївській, Херсонській та Черкаській областях.
4. На територіях з виявленим понаднормовим вмістом ²²²Rn у воді свердловин необхідне детальніше вивчення радіаційних показників води з подальшим застосуванням різних систем очищення води від ²²²Rn для випадків його високого вмісту.
5. Порівняння результатів статистичного аналізу питомої активності ²²²Rn у питній воді за 2003 – 2021 рр. з даними 1988 – 1991 рр. [24] вказує на їх суттєву відмінність: для періоду 1988 – 1991 рр.

середні арифметичні та середні геометричні значення значно вищі. Це пов'язано з тим, що відбір зразків 1988 – 1991 рр. було сконцентровано на великій території України в межах кристалічного щита та меншою мірою – поза його межами. Результати 2003 – 2021 рр. охоплюють значно більшу кількість регіонів, до того ж, у розрахунки внесено повторні (з трирічним періодом) результати вимірювань ^{222}Rn для деяких джерел.

6. З метою встановлення радіоактивного стану питної води в Україні та з метою мінімізації опромінення людей від її споживання моніторинг вмісту ^{222}Rn у питній воді для окремих регіонів України має бути поширений на джерела води, які залишаються недослідженими.

Список використаної літератури

1. Management of Radioactivity in Drinking-Water. Geneva: World Health Organization, 2018. 124 p. URL : <https://www.who.int/publications/i/item/9789241513746>
2. United Nation Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing radiation. 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. Annex A. New York : United Nations, 2000. P. 93-108.
3. Зеленский А. В., Лось И. П., Бузинный М. Г., Николаев А. В., Воробьев И. В. Концентрация радона в жилых помещениях Украинской ССР в 1989 г. *Вестн. акад. мед. наук СССР*. 1991. № 8. С. 52-54. PMID: 1950163. URL: <https://europepmc.org/article/med/1950163>.
4. Nikolaev V. A., Buzynnyy M. G., Vorobiev I. B., Gromov A. V., Krivokhatskiy A. S., Los I. P., Zelenskiy A. V., Tomilin Yu. A. Application of the track method for radon measurement in Ukraine. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*. 1993. Vol. 21, Is. 3, P. 433-436. doi: 10.1016/0969-8078(93)90243-W.
5. Los I., Buzinny M., Pavlenko T. Radon studies in Ukraine: Results and Plans for future researches. *Annales de Association Belge de Radioprotection*. 1996. Vol. 21. P. 131-143.
6. Protection from Potential Exposure: A Conceptual Framework: ICRP Publication 64. *Ann ICRP*. 1993. Vol. 23 (1). P. 1-28. URL : https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/ANIB_23_1.
7. Environmental Protection – the Concept and Use of Reference Animals and Plants: ICRP Publication 108. *Ann. ICRP*. 2008. Vol. 38 (4-6).
8. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. General Safety Requirements Part 3 No. GSR Part 3. Vienna : IAEA, 2014. URL: <https://www.iaea.org/publications/8930/radiation-protection-and-safety-of-radiation-sources-international-basic-safety-standards>.
9. Council Directive 80/778/EEC of 15 July 1980 on the quality of water intended for human consumption. *Official J. Eur. Commun.* 1980. L229. P. 11 – 29.
10. Council Directive 1998 98/83/EC of 3 November 1998 on the quality of water intended for human consumption. *Official J. Eur. Commun.* 1998. L330/32.
11. Council Directive 2013/51/EURATOM of 22 October 2013 laying down requirements for the protection of the health of the general public with regard to radioactive substances in water intended for human consumption. *Official J. Eur. Commun.* 2013. L296/12.
12. Auvinen A., Salonen L., Pekkanen. J. et al. Radon and other natural radionuclides in drinking water and risks of stomach cancer: a case-cohort study in Finland. *International Journal of Cancer*. 2005. Vol. 10. P. 109-113.
13. Beyermann M., Bünger T., Schmidt K., Obrikat D. Occurrence of natural radioactivity in public water supplies in Germany: ^{238}U , ^{234}U , ^{235}U , ^{228}Ra , ^{226}Ra , ^{222}Rn , ^{210}Pb , ^{210}Po and gross α activity concentration. *Radiation Protection Dosimetry*. 2010. Vol. 141. No 1. P. 72-81.
14. Wallner G., Herincs E., Ayromlou Sh. Determination of Natural Radionuclides in Drinking Water from the Waldviertel, Austria. *Advances in Liquid Scintillation Spectrometry: Proceedings of the 2008 International Liquid Scintillation Conference, Davos, Switzerland, 25-30 May 2008 / ed. Eikehberg J., Jäggi M., Beer H. Tucson : Radiocarbon, The University of Arizona, 2009. P. 345-353.*
15. Wallner G., Steininger G. Radium isotopes and ^{222}Rn in Austrian drinking waters. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2007. Vol. 274. No 3. P. 511-516.
16. Estimation of concentrations of radionuclides in Estonian ground waters and related health risks : Light Contract No. EE06-IB-TWP- ESC-03. European Commission, 2010. URL: https://www.arpalombardia.it/sites/DocumentCenter/Documents/RADIOATTIVIT%C3%80/Final_Report_Estonia.pdf.
17. Forte M., Bagnato L., Caldognetto E., Risica S., Trotti F., Rusconi R. Radium isotopes in Estonian groundwater: measurements, analytical correlations, population dose and a proposal for a monitoring strategy. *Journal of Radiological Protection*. 2010. Vol. 30. P. 761-780.
18. Dowdall A., Currvan L., Hanley O., Kelleher, K., Long, S., McCrory, A., McGinnity, P., McKittrick, L., McMahan, C., O'Colmain, M., Pollard, D., Wong, J. Radioactivity levels in groundwater sources in Ireland. Radiological Protection Institute of Ireland, 2013. URL : https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/44/122/44122590.pdf?r=1&r=1.
19. Walencik A., Kozłowska B., Dorda J., Szłapa P., Zipper W. Natural Radioactivity in Underground Waters. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2010. Vol. 19. No. 2. P. 461–465.
20. Przylibski T. A., Gorecka J., Kula A., Fijałkowska-Lichwa L., Zagodzón K., Zagodzón P., Miśta W., Nowakowski R. ^{222}Rn and ^{226}Ra activity concentrations in groundwaters of southern Poland: new data and selected genetic relations. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2014. Vol. 301. P. 757-764.
21. Jobbágy V., Altitzoglou T., Malo P., Tanner V., Hult M. A brief overview on radon measurements in drinking water. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2017. Vol. 173. P. 18-24. doi: 10.1016/j.jenvrad.2016.09.019.
22. Annanmaki M., Turtianen T. Treatment Technologies for Removing Natural Radionuclides from Drinking Water: Final Report of the TENAWA Project, STUK-A169. Helsinki : Radiation and Nuclear Safety Authority, 2000. URL: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/32/018/32018426.pdf.

23. Бузинний М. Г., Михайлова Л. Л. Обробка питної води для видалення радону. Огляд методів за європейським проектом. *Довкілля та здоров'я*. 2018. № 4 (89). С. 10-15. doi: 10.32402/dovkil2018.04.010.

24. Zelensky A., Buzynny M., Los' I. Measurement of Radium-226, Radon-222, and Uranium-238, 234 in Underground Water of the Ukraine with Ultra Low-Level Liquid Scintillation Counter. *Radiocarbon*. 1993. P. 405-411.

25. Зеленский А., Бузынний М., Лось И. Радон-222 в воде: концентрации, дозы, нормирование. *Проблемы радиационной медицины: респ. межвед. сб.* 1993. Вып. 5. С. 573-581.

26. Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97) : державні гігієнічні нормативи. Київ, 1997. 121 с.

27. Бузинний М. Г. Природна радіоактивність питної води свердловин на території України. *Гігієнічна наука та практика на рубежі століть*: матеріали XIV з'їзду гігієністів України (19-21 травня 2004 р., Дніпропетровськ). К., 2004. Т. II. С. 308-310.

28. Buzinny M., Sakhno V., Romanchenko M. Natural Radionuclides in Underground Water in Ukraine. *LSC-2010. Advances in Liquid Scintillation Counting/* ed. by Philippe Cassette. 2010. P. 81- 85.

29. Бузинний М., Михайлова Л., Сахно В., Романченко М. Дослідження природних радіонуклідів у підземній воді в Україні. *Довкілля та здоров'я*. 2011. № 1. С. 31-35.

30. Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною: Державні санітарні норми та правила ДСанПіН 2.2.4-171-10. К., 2010. С. 32.

31. Jobbagy V., Hult M. Performance evaluation report of the REM 2018 radon-in-water proficiency test. European Commission, Geel, 2019, JRC116812 (Lab code #27). URL: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC119713>.

32. Михайлова Л., Бузинний М., Сахно В., Романченко М. Статистичний аналіз радіаційних показників води, дослідженої у 2012-2014 р.р. *Гігієна населених місць: зб. наук. пр.* К., 2015. Вип. 65. С. 179-185.

Application of the track method for radon measurement in Ukraine. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, 21, 3, 433-436. doi: 10.1016/0969-8078(93)90243-W.

5. Los, I., Buzynnyi, M., Pavlenko, T. (1996). Radon studies in Ukraine. Results and Plans for future researches. *Annales de Association Belge de Radioprotection*, 21, 131-143.

6. Protection from Potential Exposure: A Conceptual Framework: ICRP Publication 64. *Ann ICRP*, 1993, 23 (1), 1-28. URL: https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/ANIB_23_1.

7. Environmental Protection – the concept and use of reference animals and plants: ICRP Publication 108. *Annals of the ICRP*, 2008, 38, 4-6.

8. Radiation protection and safety of radiation sources: international basic safety standards. IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3. Vienna, IAEA, 2014. URL: <https://www.iaea.org/publications/8930/radiation-protection-and-safety-of-radiation-sources-international-basic-safety-standards>.

9. Council Directive 80/778/EEC of 15 July 1980 on the quality of water intended for human consumption. *Official J. Eur. Commun*, 1980, L229, 11–29.

10. Council Directive 1998 98/83/EC of 3 November 1998 on the quality of water intended for human consumption. *Official Journal of the European Community*, 1998, L330/32.

11. Council Directive 2013/51/EURATOM of 22 October 2013 laying down requirements for the protection of the health of the general public with regard to radioactive substances in water intended for human consumption. *Official Journal of the European Community*, 2013, L296/12.

12. Auvinen, A., Salonen, L., Pekkanen, J., Pukkala, E., Ilus, T., Kurttio, P. (2005). Radon and other natural radionuclides in drinking water and risks of stomach cancer: a case-cohort study in Finland. *International Journal of Cancer*, 10, 109-113.

13. Beyermann, M., Bünger, T., Schmidt, K., Obrikat, D. (2010). Occurrence of natural radioactivity in public water supplies in Germany: 238U, 234U, 235U, 228Ra, 226Ra, 222Rn, 210Pb, 210Po and gross α activity concentration. *Radiation Protection Dosimetry*, 141, 1, 72-81.

14. Wallner, G., Herincs, E., Ayromlou, Sh. (2009). Determination of natural radionuclides in drinking water from the Waldviertel, Austria. *Advances in liquid scintillation spectrometry: proceedings of the 2008 International Liquid Scintillation Conference, Davos, Switzerland, 25-30 May 2008*, edited by Eikehberg, J., Jäggi, M., Beer, H. *Radiocarbon*, the University of Arizona, 345-353.

15. Wallner, G., Steininger, G. (2007). Radium isotopes and ²²²Rn in Austrian drinking waters. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 274, 3, 511-516.

16. Estimation of concentrations of radionuclides in Estonian ground waters and related health risks : Light Contract No. EE06-IB-TWP- ESC-03. European Commission, 2010. URL: https://www.arpalombardia.it/sites/DocumentCenter/Documents/RADIOATTIVIT%C3%80/Final_Report_Estonia.pdf.

17. Forte, M., Bagnato, L., Caldognetto, E., Risica, S., Rusconi, R. (2010). Radium isotopes in Estonian groundwater: measurements, analytical correlations, population dose and a proposal for a monitoring strategy. *Journal of Radiological Protection*, 30, 761-780.

References

1. Management of Radioactivity in Drinking-Water. Geneva: World Health Organization, 2018, 124 p. URL : <https://www.who.int/publications/i/item/9789241513746>.

2. Sources and effects of ionizing radiation: UNSCEAR report/United Nation Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. New York, 2000, Annex A, 93-108.

3. Zelenskyi, A., Los, I., Buzynnyi, M., Nikolaiev, A., Vorobyov, I. (1991). Radon concentration in living accommodations in the Ukrainian SSR in 1989. *Bulletin of the Academy of Medical Sciences of SSSR*, 8, 52-54. PMID: 1950163. Retrieved from: <https://europepmc.org/article/med/1950163>.

4. Nikolaiev, V., Buzynnyi, M., Vorobyov, I., Gromov, A., Krivokhatskyi, A., Los, I., Zelenskyi, A., Tomilin, Yu. (1993).

18. Dowdall, A., Currivan, L., Hanley, O. (2013). Radioactivity levels in groundwater sources in Ireland. *Radiological Protection Institute of Ireland*. Retrieved from: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/44/122/-44122590.pdf?r=1&r=1.

19. Walencik, A., Kozłowska, B., Dorda, J., Sziapa, P., Zipper, W. (2010). Natural radioactivity in underground waters. *Polish Journal of Environmental Studies*, 19(2), 461-465.

20. Przylibski, T., Gorecka, J., Kula A., Fijałkowska-Lichwa, L., Zagozdzon, K., Zagozdzon, P., Miśta, W., Nowakowski, R. (2014). ^{222}Rn and ^{226}Ra activity concentrations in groundwaters of southern Poland: new data and selected genetic relations. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 301, 757-764.

21. Jobbagy, V., Altitzoglou, T., Malo, P., Tanner, V., Hult, M. (2017). A brief overview on radon measurements in drinking water. *Journal of Environmental Radioactivity*, 173, 18-24. doi: 10.1016/j.jenvrad.2016.09.019.

22. Annanmaki, M., Turtianen, T. (2000). Treatment technologies for removing natural radionuclides from drinking water: final report of the TENAWA project, STUK-A169, Helsinki, Radiation and Nuclear Safety Authority. Retrieved from: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/32/018/32018426.pdf.

23. Buzynnyi, M., Mykhailova, L. (2018). Treatment of drinking water to remove radon. Review of methods according to the European project. *Environment and Health*, 4 (89), 10-15. doi: 10.32402/dovkil2018.04.010.

24. Zelenskyi, A., Buzynnyi, M., Los, I. (1993). Measurement of Radium-226, Radon-222, and Uranium-238, 234 in Underground Water of the Ukraine with ultra-low-level liquid scintillation counter. *Radiocarbon*, 405-411.

25. Zelenskyi, A., Buzynnyi, M., Los, I. (1993). Radon-222 in water: concentrations, doses, standardization. *Problems of Radiation Medicine*, 5, 573-581.

26. Radiation safety standards of Ukraine (NRBU-97): state health and safety standards, Kyiv, 1997, 121.

27. Buzynnyi, M. (2004). Natural radioactivity of drinking water wells in Ukraine. *Hygienic science and practice at the turn of the century: materials of the XIV Congress of Ukrainian Hygienists* (May 19-21, 2004, Dnipropetrovsk). Kyiv, 308-310.

28. Buzynnyi, M., Sakhno, V., Romanchenko, M. (2010). Natural radionuclides in underground water in Ukraine. LSC-2010. *Advances in Liquid Scintillation Counting*, edited by Philippe Cassette, 81-85.

29. Buzynnyi, M., Mykhailova, L., Sakhno, V., Romanchenko, M. (2011). Study of natural radionuclides in underground water in Ukraine, *Environment and Health*, 1, 31-35.

30. Hygienic requirements for drinking water intended for human consumption: state health and safety standards and rules DSanPiN 2.2.4-171-10, Kyiv, 2010, 32.

31. Jobbagy, V., Hult, M. (2019). Performance evaluation report of the REM 2018 radon-in-water proficiency test. European Commission, Geel, 2019, JRC116812 (Lab code #27). URL: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC119713>.

32. Mykhailova, L., Buzynnyi, M., Sakhno, V., Romanchenko, M. (2015). Statistical analysis of radiation parameters of water investigated in 2012-2014, *Hygiene of Settlements*, 65, 179-185.

Generalized Data for 20 Years of Radon-222 Monitoring in Drinking Water of Ukraine

M. Buzynnyi, L. Mykhailova

State Institution "O.M. Marzieiev Institute of Public Health of NAMSU", Kyiv, Ukraine

The paper presents the results of the statistical analysis for ^{222}Rn concentration in drinking water samples taken from artesian wells in different regions of Ukraine during 2003 - 2022. The work was carried out in the radiation monitoring laboratory of the O.M. Marzieiev Institute of Public Health of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine. The periods of averaging the measurement data (three and four years) are related to the requirements of regulatory documents and covering of water samples in the analysis from geographically new, previously unreached territories of Ukraine. Arithmetic mean values and root mean square deviations, as well as geometric mean, median, minimum and maximum values of ^{222}Rn specific activity in 1228 drinking water samples were calculated. The values of the root mean square deviations of the measurement data and likeness of the median and geometric mean values show the lognormal nature of ^{222}Rn specific activity distribution in the sampling set. It was determined that for 11 % of the tested water samples, ^{222}Rn concentration exceeds the established state standard for drinking water (100 Bq/l). The detected high levels of ^{222}Rn are related to certain areas, where a more detailed study of underground water radioactivity is required in order to develop and implement measures to improve the radiation condition of drinking water. A comparison of the results of analyzing ^{222}Rn concentration in drinking water for 2003-2021 with the data obtained during 1989-1991 indicates their significant difference: for the period of 1989-1991, the arithmetic mean and geometric mean values are significantly higher. This is because the sampling of 1989-1991 was more randomized, held mainly within the Ukrainian crystalline shield and less beyond it. At the same time, the data (2003 to 2021) cover a much larger number of regions, and, in addition, the results of repeated (with a three-year period) ^{222}Rn measurements data for some sources are included in the calculations.

In order to determine the radioactive condition of drinking water in Ukraine and in order to minimize public exposure due to its consumption, monitoring of ^{222}Rn content in drinking water for some regions of Ukraine should be extended.

Keywords: radon-222 (^{222}Rn), natural radionuclides, artesian wells, drinking water, exposure dose, arithmetic mean, geometric mean, median.

Отримано 09.09.2022