

ГЕОФІЗИКА

УДК 550.422

С. Вижва, д-р геол. наук, проф., зав. каф. геофізики
E-mail: vsa@univ.kiev.ua;О. Шабатура, канд. геол. наук, ст. наук. співроб.
E-mail: sand@univ.kiev.ua;Д. Онищук, канд. геол. наук
E-mail: boenerges@ukr.net;І. Онищук, канд. геол. наук, ст. наук. співроб., зав. НДП
E-mail: oivan1@ukr.net;Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна

РАДІАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДОНОВИХ ВОД М. ХМІЛЬНИК

(Рекомендовано членом редакційної колегії д-ром геол. наук, доц. О.Є. Кошляковим)

У підземних водах з кристалічних порід кислого складу іноді можуть формуватися високі вмісти радону. 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. З цією метою вивчалися підземні води з водоносних горизонтів кристалічного фундаменту м. Хмельник. За пробями із серії водопунктів (5 глибких свердловин) проведено комплексні хіміко-радіологічні лабораторні дослідження, що вимагали виконання еманційних вимірювань приладом РРА-01М-03 з точністю 30% і ряду гамма-спектрометричних вимірювань. Отримано дані про масовий вміст радію-226, загальний об'ємний вміст радону, який змінювався в межах від 15 до 44 МБк/м³, та вміст радону, який утворився за рахунок розчиненого й сорбованого радію. Аналіз компонент радону різного походження виявив, що накопичення радону у підземних водах має, головним чином, "еманційно-дифузійну" природу і мало залежить від хімічного складу вод. Не виявлено стійкого зв'язку між концентрацією радону та хімічними компонентами вод, окрім вуглекислоти, марганцю, SO₄²⁻ та Cl⁻. Швидше за все, вміст цих компонентів впливає на фізико-хімічні процеси сорбції радію. Оцінка потенційних доз опромінення радоном з підземних вод м. Хмельник здійснювалася шляхом розрахунку річних еквівалентних доз для різних водопунктів. Результати підрахунку свідчать, що 100-годинна експозиція максимальної концентрацією розчиненого радону спроможна формувати досить значимі дози опромінення (від 0,005 до 0,025 мЗв/рік), співставні з тими, які отримують пацієнти при проходженні курсу радонотерапії. Дози від опромінення радоном від найбільш радономістких водопунктів (свр. 8 і свр. 12) при експозиціях більше 1000 год за рік вже сягають величин в 0,3-0,4 мЗв/рік, що відповідає рівням санітарно-нормативного регулювання (НРБУ-97/Д-2000). Запропонований спосіб виявлення окремих фізико-хімічних механізмів формування радонових рілень у підземних водах дозволить точніше описувати його часову й просторову варіативність, а отримані результати показують свою важливість при радіологічних розрахунках у радонотерапії та санітарно-радіаційному регулюванні.

Ключові слова: радон, радій, поглинені дози опромінення, Хмельник, підземні води.

Вступ. До радіоактивних відносяться води, що містять радон-222 з об'ємною активністю більше 1,85·10⁵ Бк/м³, радію-226 – більше 1·10⁻⁸ г/м³ або урану – більше 3·10⁻² г/м³ [1]. За оцінками Наукового комітету з дії атомної радіації ООН, на даний час близько 10% населення Землі вживає воду з активністю радону від 0,1 МБк/м³ і 1% – вище 1 МБк/м³. Іноді сумарна доза радіації при використанні води з підвищеною концентрацією радону може бути дуже високою. За даними шведських учених, більше 60000 жителів країни щодня споживають воду з активністю радону вище 1 МБк/м³, що призводить до 50 випадків захворювань на рак легенів на рік [13].

Радіаційна небезпека, викликана високими концентраціями радону у воді, визначається декількома причинами:

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

Інтенсивне вимивання природних радіонуклідів з товщ гірських порід призводить до утворення у деяких районах радіоактивних вод. Добра розчинність радону обумовлює досить швидке насичення ним підземних вод. Залежно від геологічних і гідрогеологічних умов, у різних регіонах спостерігається широкий спектр фонових концентрацій радону. В середньому, вміст радону у воді коливається від 3700 Бк/м³ до 37 МБк/м³ [1]. Поряд з районами з пониженими фоновими концентраціями радону в водах, є території з досить високими, "ураган-

ними", вмістами радону. Такі території виявлені в Бразилії, Індії, Канаді, Ірані, скандинавських країнах, США, Казахстані, Росії [1, 9, 11].

Зазвичай у воді, яка використовується населенням, концентрація радону дуже мала, але в глибких артезіанських свердловинах створюються умови для накопичення надзвичайно високої активності радону, іноді до 100 МБк/м³. 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/л [14]; у підземних водах кристалічного фундаменту в околищах Києва вміст радону становить 70-1657 Бк/л [3].

Підвищений вміст радону у водах створює можливість використання її з лікувальною метою. Тому їх широко використовують при лікуванні захворювань кістково-м'язової, нервової систем та ряду інших захворювань. Результатом прийому радонових ванн є виражена седативна й знеболююча дія. Радіоактивні води за переважанням вмістом конкретних радіонуклідів поділяються на радонові (курорти Білокуриха, Желєзноводськ, П'ятигорськ), радієві (курорти Істі-Су, Кисловодськ, Цхалтубо), радоно-радієві (курорт Мацеста, Ільменські й Слов'янські джерела), радоно-радієво-уранові, уран-радієві та уранові [1]. В Україні з великими радоновими ресурсами, води із вмістом радону більше 185 Бк/л є мінеральними (радоновими) й можуть використовуватися у медицині [9, 12].

При відсутності централізованого й технічно обгрунтованого водопостачання, неспецифічні умови поводження з радоновими водами можуть створювати до-

даткове внутрішнє й зовнішнє опромінення. В таких випадках здійснюється періодичний радіаційний контроль питної води, який відносно просто регламентується і за яким можливе визначення ефективної поглиненої дози. На основі міжнародного й національного досвіду практичного застосування нормативів щодо використання вод для питного вживання, відбувається їх постійне уточнення й удосконалення [7, 9] і, як правило, додатковий радіаційний вплив від цих джерел опромінення мінімізується. 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 гранично допустимі концентрації встановлено на рівні 300 Бк/л, у Швеції – 300 Бк/л, у Ірландії – 200 Бк/л [1], в Україні – 100 Бк/л. Агентство з охорони навколишнього середовища США USEPA рекомендує застосовувати граничну величину вмісту радону у воді на рівні 11,1 Бк/л, що, однак, не знайшло поки що відображення в американському національному стандарті якості води (цей параметр не нормується). У російських нормах радіаційної безпеки [7] граничний рівень вмісту радону у воді, при якому вже потрібне втручання, встановлений на рівні 60 Бк/л при відсутності у воді інших радіоактивних речовин. До цього "Санітарні правила і норми для централізованого водопостачання" дозволяли користуватися водою з вмістом радону до 120 Бк/л.

Окрім внутрішнього опромінення від вживання вод, збагачених радоном, досить вагома частка дози може створюватися за рахунок інгаляційного та маловивченого трансдермального потрапляння радону в організм людини. Якщо враховувати невизначеності радіаційного опромі-

нення радоном, пов'язані з відмінностями у концентраціях і умовах дегазації у повітря житлових або виробничих приміщень, то зрозуміло, що не існує універсального й єдиного методу щодо оцінювання доз опромінення радоном і пов'язаних з ними ризиків для здоров'я. Як правило, здійснюється екстраполяція отриманих рівнів еквівалентної рівноважної активності радону (ЕРОА) для певних категорій населення на певний термін зі встановленням колективних ефективних доз. Наприклад, під час радіологічного вивчення циклу технологічних операцій радонотерапії (приготування радонових ванн, порціювання, транспортування сумішей тощо) розраховували сумарну величину ефективної дози [9]. Для внутрішнього опромінення вона складала близько 1350 мЗв/рік, а зовнішнього – 2,57 мЗв/рік. З цього випливав висновок, що основну дозу формує внутрішнє опромінення, хоча воно не перевищувало допустимих рівнів, встановлених НРБУ-97 [7, 9], але потребує інспекційного або моніторингового вивчення.

Нами досліджувався вміст радону та радію у підземних водах (5 глибоких свердловин) відомого бальнеологічного курорту України – м. Хмельник (рис. 1), де радонові води використовуються у низці закладів курортно-лікувального призначення (6 санаторіїв), з метою встановлення широкого кола радіаційних характеристик цих об'єктів. Джерелом постачання в лікувально-санаторні заклади виступає Хмельницьке родовище радонових вод з експлуатаційними запасами 2000 м³/добу [9]. Радіаційний контроль за станом підземних вод м. Хмельник здійснює локальна служба моніторингу за станом підземних вод, яка виконує спостереження за положенням рівня підземних вод, каталогізує хімічний склад підземних вод водопункту і, в тому числі, виконує скринінгові вимірювання вмісту радону.

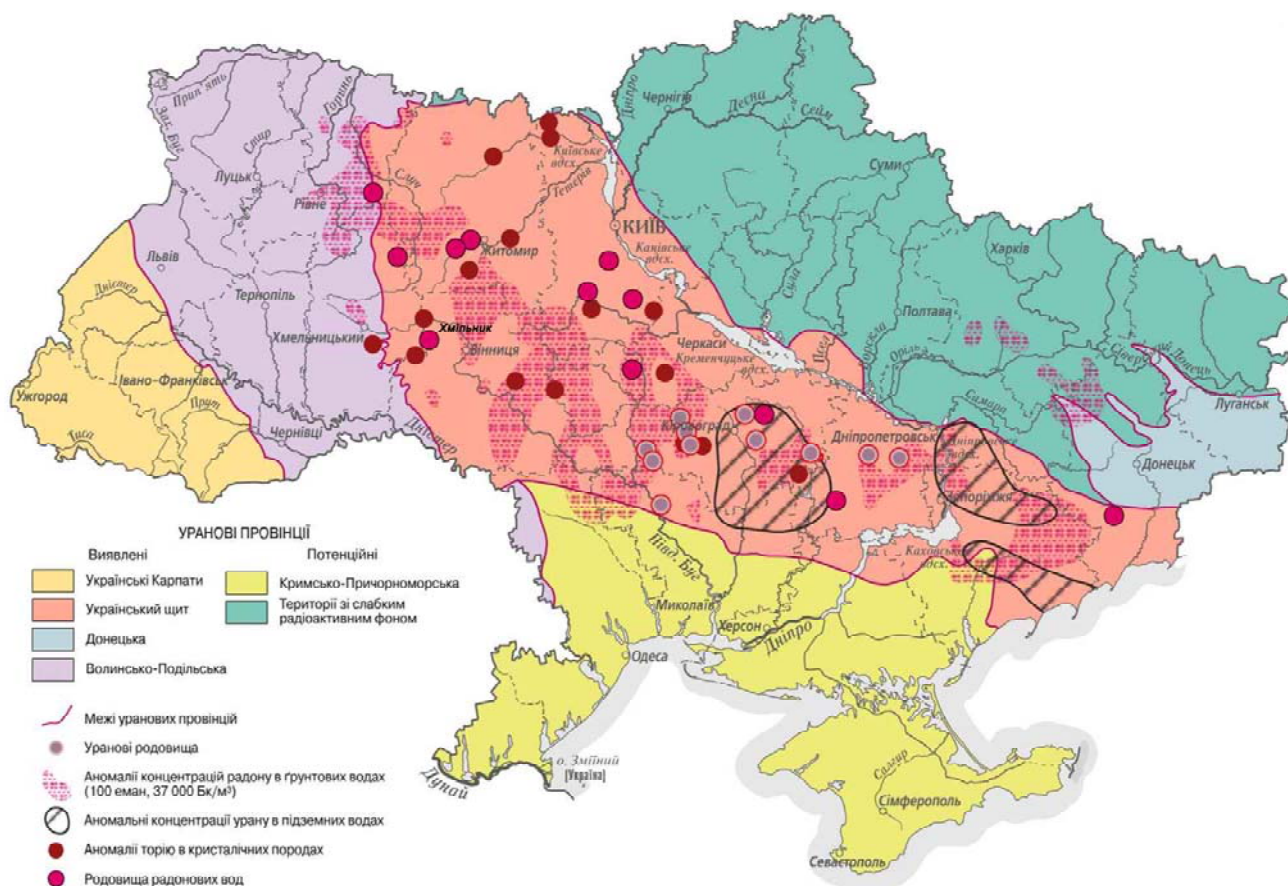


Рис. 1. Карта розміщення родовищ радонових вод на території України (з www.skyworld.net)

Раніше проведене спеціалізоване радіоекологічне дослідження ванних відділень 4-х санаторіїв м. Хмільник [9] встановило, що ЕРОА в повітрі складає 105-711 Бк/м³, причому ефективні дози опромінення персоналу за рахунок зовнішнього опромінення складають 1,084 мЗв/рік за 1200 годин роботи. Об'ємні активності радону вод, які використовують для прийняття ванн обласної фізіотерапевтичної лікарні, – 600-1200 Бк/л, що майже в 2-2,5 рази вище у водах із експлуатаційних свердловин санаторіїв м. Хмільник.

Експериментальні дослідження. Лабораторні аналітичні роботи включали визначення об'ємної активності радону і торону проб води, а також вмісту радію-226 у

пробах за допомогою напівпровідникового гамма-спектрометра. Програмне забезпечення гамма-спектрометра дозволяє за наявними фотопіками у спектрі визначати активність зразків та розраховувати статистичну похибку таких вимірів. При цьому мінімальна активність зразка, що може бути виміряна з певною статистичною точністю, визначається фоновими умовами та часом виміру.

Методика визначення ²²²Rn у підземних водах полягає у переведенні газу з проби води у вимірювальну камеру еманометра [6]. Вилучення радону з проби і переведення його до вимірювальної камери приладу РРА-01М-03 проводилося циркуляційним способом (рис. 2).

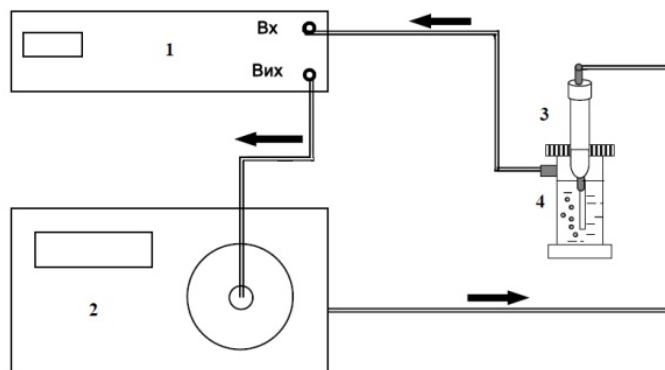


Рис. 2. Блок-схема переведу повітря із проби води у вимірювальну камеру еманометра:

1 – пробовідбірний пристрій, 2 – радіометр-радон, 3 – пробовідбірник води, 4 – барботер

Вимірювання об'ємної активності радону у камері радіометра-радону Q виконувалося не менше 5 разів з наступним осередненням за формулою:

$$Q = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Q_i, \quad (1)$$

де Q_i – рядовий вимір об'ємної активності радону, Бк·м³; N – кількість вимірів.

Власне розрахунок об'ємної активності радону Q_n здійснюється шляхом введення апаратних і методичних поправок:

$$Q_n = \left(Q \left(\alpha + \frac{V_2}{V_1} \right) - Q_\phi \frac{V_2}{V_1} \right) \exp(\lambda_{Rn} t), \quad (2)$$

де Q_ϕ – фонове значення; V_2 – об'єм вимірювальної камери; V_1 – об'єм проби; t – час, що пройшов з моменту відбору проби до початку аналітичної процедури, хв; λ_{Rn} – постійна розпаду радону, $1,26 \cdot 10^{-4}$ хв⁻¹; $\alpha=0,25$ – коефіцієнт розчинності радону у воді.

Підрахунок кількості радону за вмістом радію здійснювався за формулою:

$$Q_{Rn} = Q_{Ra} (1 - \exp(-\lambda_{Rn} t)), \quad (3)$$

де Q_{Rn} – вміст радону, розрахований за концентрацією радію Q_{Ra} .

Вміст радону і радію у підземних водах м. Хмільник. Концентрація радону у водах залежить від концентрації материнських елементів (торію, урану, радію) у гірських породах, що омиваються нею, коефіцієнту еманування, їхньої пористості або тріщинуватості. Коефіцієнт еманування тим вищий, чим вищі тріщинуватість порід та швидкість руху води. Суперпозиція цих факторів обумовлює наявність у водах радону різного походження – "радієвого", "еманаційно-

дифузійного" та "конвекційного". Визначення вмісту радію-226 у геологічному середовищі необхідне для оцінки цих співвідношень у загальному балансі вмісту радону. Численні вимірювання концентрації радону у ґрунтовому повітрі, суміщені з дослідженням вмісту радію та урану у ґрунтових розрізах, показують, що існує стійка кореляція між цими величинами.

Часто у прикладних задачах спосіб підрахунку кількості радону за вмістом радію можна використати для визначення ґрунтового горизонту, відповідального за генерацію радону. Звичайною є ситуація, коли концентрація радію-226 у 12 Бк/кг (або 1 ppm урану) дає максимум концентрації радону у 20 Бк/м³ у ґрунтовому поровому просторі [13].

Стосовно водного середовища, то сполуки радію, розчинені у воді або адсорбовані на завислих частинках, формують т.з. "радієву компоненту" вмісту радону. Більша частина радону потрапляє у водне середовище внаслідок транспортування радону з більш глибоких горизонтів та "еманаційно-дифузійним" шляхом. Відмінність гідродинамічних, фізико-механічних та ємнісних характеристик водних систем обумовлює різні механізми акумуляції радону у водах (рис. 3, табл. 1).

Вміст сорбованого радію (табл. 1, рис. 3б), який формує "еманаційно-дифузійну" компоненту радону у воді, можна оцінити за логарифмічною залежністю [2]:

$$\lg Ra_{adc} = \frac{1}{2} \lg (10^{-0.57 pH - 3} + C_{Ra}^0 10^{0.86 pH}) + K, \quad (4)$$

де Ra_{adc} – кількість сорбованих іонів радію-226 (моль/(см² поверхні)); K – деяка постійна, пов'язана з особливостями геометрії, C_{Ra}^0 – концентрація іонів радію (г·моль/мл).

Відзначається пряма залежність між активністю сорбованого радію та активністю "аутигенного" радону, сформованого сполуками радію у воді (рис. 4а), та обернена залежність між вмістом сорбованого радію й вмі-

стом радону у воді "еменаційно-дифузійного" походження (рис. 4б). Тільки незначна частина радону, який акумулюється у воді, накопичується разом з радієм. Тому найвищі рівні радону у воді зустрічаються у тих водних системах, що омивають кристалічні породи з високою тріщинуватістю та з високим вмістом радію і

мають сприятливі умови для потрапляння радону "еменаційно-дифузійним" шляхом. Підземна вода збирає радон з величезних масивів геологічних порід, тому активність радону у воді істотно вища за активність радію, часто в десятки й сотні разів. У нашому випадку, в середньому це відношення складає 220-300.

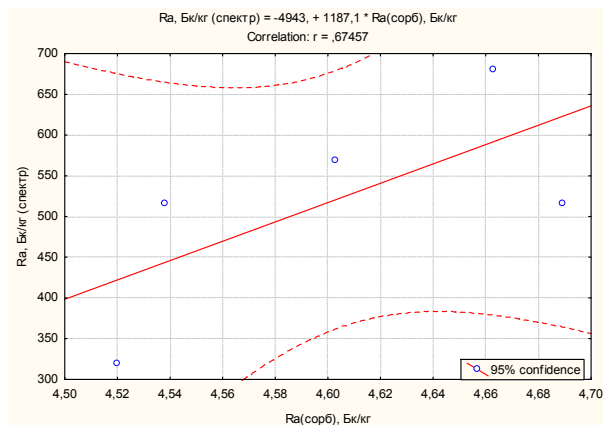
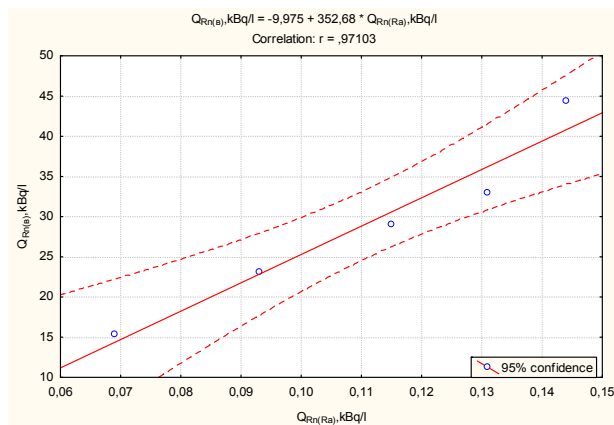


Рис. 3. Співвідношення між вмістом радію-226 (а), вмістом сорбованого радію-226 (б) і концентрацією радону у підземних водах м. Хмільник

Таблиця 1

Еменаційні характеристики радонових вод м. Хмільник

Номер свердловини	Виміряна концентрація радону, Q_{Rn} , МБк/м ³	Вміст ²²⁶ Ra, Бк/кг	Адсорбований вміст ²²⁶ Ra, віднесений до його загального вмісту, %	Торон-радонове відношення, Tn/Rn
№ 13	23,1	517	0,95	0,0019
№ 8	44,4	680	0,69	0,0085
№ 12	32,9	569	0,81	0,0270
№ 0	29,0	515	0,88	0,0221
№ 14	15,3	319	1,42	0,0475

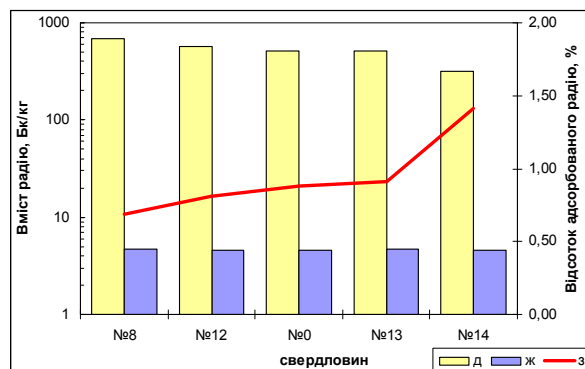
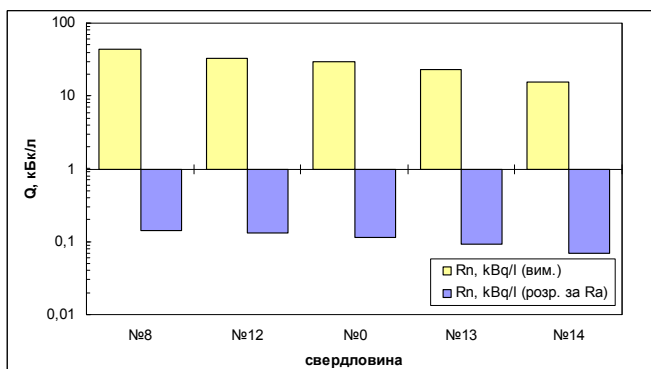


Рис. 4. Вміст радону (а) і радію (б) у підземних водах м. Хмільник:

д – вміст радію у воді, отриманий за гамма-спектрометричними даними,

ж – кількість сорбованого радію, з – відношення сорбованого радію до його загальної кількості, в %

На фізико-хімічні фактори сорбції радію, окрім впливу поглинального комплексу ґрунтових частинок, впливають як температура, так і хімічний склад води. Зі збільшенням рН, лужності (карбонатної), вмісту SiO_2 , PO_4^{2-} , SO_4^{2-} , Na^+ адсорбційна здатність радію підвищується; навпаки, при зростанні вмісту вуглекислоти, NO_3^- , NH_4^+ – знижується (рис. 5б). Даний ефект можна проінтерпретувати як витіснення іонів радію йонами водню або комплексом катіонів. Саме тому відстежується пряма залежність між кількістю адсорбованого радію і рН середовища (рис. 5а).

Хімічний склад вод. Радонові мінеральні води мають різний хімічний і газовий склад. Серед радонових вод найбільшу цінність становлять води, збагаченні вуглекислотою, кремнієм, іншими біологічно активними елементами [1, 9]. Підземні радонові води м. Хмільник –

гідрокарбонатні кальцієво-магнієві зі змінними кількостями макро- й мікрокомпонентів. У всіх водопунктах відмічено перевищення концентрації марганцю (табл. 2, 3).

Як правило, для радонових вод не встановлюється будь-якого стійкого зв'язку між мінералізацією та складом вод, з одного боку, та концентрацією радону – з іншого. Натомість, для підземних вод м. Хмільник виявлено ряд кореляційних залежностей між компонентами складу та вмістом радону. Так, вміст HCO_3^- ($r=-0,50$), Mn^{2+} ($r=-0,80$) проявляє обернену залежність від вмісту радону у воді, а SO_4^{2-} ($r=0,82$), Cl^- ($r=0,67$) – пряму (табл. 4). На нашу думку, всі зазначені варіації цих аніонів і катіонів є відбиттям вмісту радію у воді та процесів його хімічного зв'язування з карбонатами, сульфатами, фізичної адсорбції на глинистих, органічних та інших компонентах вод.

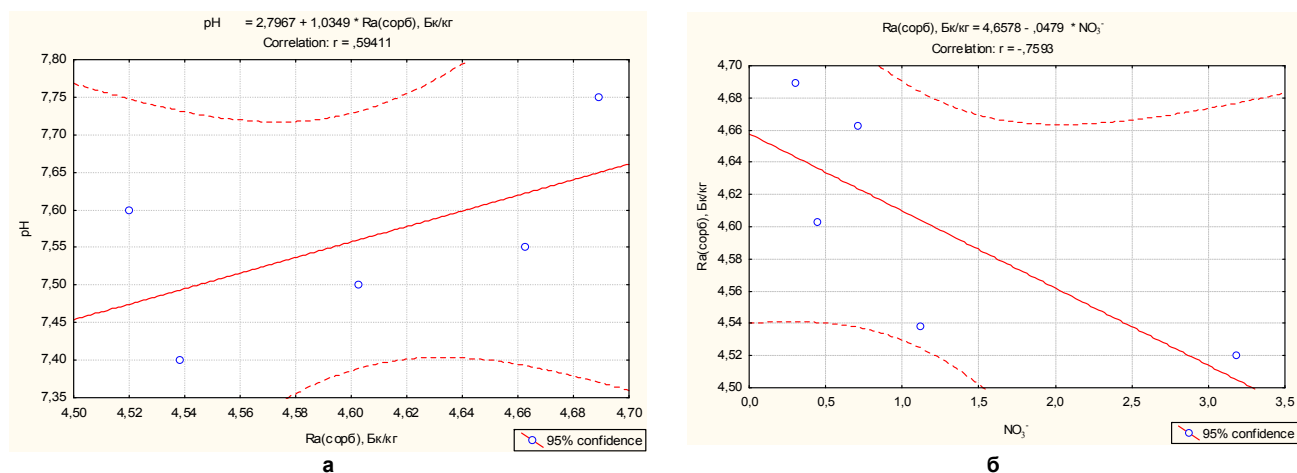


Рис. 5. Співвідношення між вмістом сорбованого радію-226 і величиною pH (а) та вмістом аніону NO_3^- і вмістом сорбованого радію-226 (б) у підземних водах м. Хмільник

Таблиця 2

Хімічний склад радонових вод м. Хмільник (за даними О.Л. Шевченка)

Показники хімічного складу		Макрокомпоненти, мг/дм ³ /мг-екв.		Проби (норматив)		св. № 13	св. № 8	св. № 12	св. № 0	св. № 14	ГДК в мінеральних і питних водах
				pH	Лужність за CaCO ₃ , мг/дм ³	7,75	7,55	7,5	7,4	7,6	6,5-8,5
	Аніони	HCO ₃ ⁻	475,9	451,5	457,6	512,6	482,1	-			
			7,8	7,4	7,5	8,4	7,9				
		SO ₄ ²⁻	59,43	72,7	76,82	67,92	24,72	≤250 (≤500)			
			1,24	1,51	1,6	1,41	0,51				
		Cl ⁻	22,01	27,6	21,57	24,88	22,8	≤250 (≤350)			
			0,62	0,77	0,61	0,7	0,64				
		NO ₃ ⁻	0,304	0,71	0,444	1,12	3,182	50			
		CO ₃ ²⁻	12	-	-	-	-	-			
			0,4								
		Катіони	Ca ²⁺	140,3	135,3	142,9	145,3	125,3	-		
				7	6,75	7,13	7,25	6,25			
			Mg ²⁺	27,4	27,4	27,4	21,3	27,4	-		
	2,25			2,25	2,25	1,75	2,25				
	Na ⁺		20	15	15	21	6	≤200			
			0,87	0,65	0,65	0,91	0,26				
	K ⁺		2	2	2	2	1,0	-			
			0,05	0,05	0,05	0,05	0,03				
	Мікрокомпо- ненти, мг/дм ³	NH ₄ ⁺	0,007	0,015	0,239	0,728	0,067	≤0,5 (≤2,6)			
Mn		2,84	0,66	1,52	1,82	1,99	≤0,05 (≤0,5)				
SiO ₂		14,2	9,52	9,61	10,2	9,86	≤10				
PO ₄ ³⁻		0,087	0,017	0,03	0,011	0,014	≤3,5				
Al		0,043	0,053	0,052	0,039	0,054	≤0,2 (≤0,50)				
Cu		0	0	0	0	0,1	≤1,0				
Zn		0,49	0,23	0,44	0,12	0,33	≤1,0				

Таблиця 3

Формула мінералізації радонових вод м. Хмільник (за даними О.Л. Шевченка)

Свердловина	Формула складу	Тип вод	Санітарний висновок
№ 13	$M_{0.747} \frac{\text{HCO}_3 81}{\text{Ca} 69 \text{Mg} 22}$	Гідрокарбонатна кальцієво-магнієва	Перевищення вмісту марганцю для водопровідної питної води в 56,7 разів згідно з ДСанПіН 2.2.4-171-10
№ 8	$M_{0.731} \frac{\text{HCO}_3 76}{\text{Ca} 70 \text{Mg} 23}$	Гідрокарбонатна кальцієво-магнієва	Незначне перевищення вмісту марганцю за нормативом для вод із колодязів та каптажів джерел і перевищення для водопровідної питної води в 13 разів згідно з ДСанПіН 2.2.4-171-10
№ 12	$M_{0.743} \frac{\text{HCO}_3 77}{\text{Ca} 71 \text{Mg} 22}$	Гідрокарбонатна кальцієво-магнієва	Перевищення вмісту марганцю для водопровідної питної води в 30 разів згідно з ДСанПіН 2.2.4-171-10
№ 0	$M_{0.795} \frac{\text{HCO}_3 80}{\text{Ca} 73}$	Гідрокарбонатна кальцієва	Перевищення вмісту йонів амонію, що свідчить про поточне забруднення органічними речовинами, перевищення вмісту марганцю за нормативом для водопровідної питної води в 36 разів згідно з ДСанПіН 2.2.4-171-10
№ 14	$M_{0.689} \frac{\text{HCO}_3 87}{\text{Ca} 71 \text{Mg} 26}$	Гідрокарбонатна кальцієво-магнієва	Перевищення вмісту марганцю для водопровідної питної води в 40 разів згідно з ДСанПіН 2.2.4-171-10

В основу класифікації вмісту радону, радію й урану в природних водах, окрім вмісту радіоактивних елементів, покладено форму їх знаходження у гірських породах та гідродинамічну зональність. Перша особливість

описує можливість збагачення підземних вод радіоактивними елементами, а друга – визначає геохімічні умови переходу радіоактивних елементів із гірських порід і руд у природні води (табл. 5).

Таблиця 4

Коефіцієнти кореляції між радіаційними та хімічними показниками вод м. Хмільник
(виділено статистично значимі коефіцієнти кореляції)

Параметр	$Q_{Rn(a)}$	Ra	$Ra_{срб}$	$\Delta Q_{Ra(adc)}$	Tn/Rn
$Q_{Rn(a)}$	1	0,95	0,48	-0,88	-0,54
Ra	0,95	1	0,67	-0,97	-0,75
Ra(adc)	0,48	0,67	1	-0,64	-0,88
$\Delta Q_{Ra(adc)}$	-0,88	-0,97	-0,64	1	0,78
Tn/Rn	-0,54	-0,75	-0,88	0,78	1
pH	-0,37	-0,18	0,59	0,23	-0,32
alc	0,27	0,50	0,43	-0,68	-0,70
HCO_3^-	-0,51	-0,49	-0,61	0,35	0,23
SO_4^{2-}	0,82	0,91	0,50	-0,97	-0,66
Cl ⁻	0,68	0,53	0,11	-0,41	-0,29
NO_3^-	-0,63	-0,83	-0,76	0,91	0,85
CO_3^{2-}	-0,30	-0,01	0,65	-0,06	-0,61
Ca^{2+}	0,40	0,56	0,26	-0,73	-0,55
Mg^{2+}	0,00	0,02	0,48	0,12	-0,02
Na^+	0,36	0,57	0,45	-0,72	-0,78
K^+	0,70	0,86	0,62	-0,95	-0,82
$NH_4H_2PO_4^+$	0,02	-0,02	-0,56	-0,14	0,15
Fe	-0,70	-0,86	-0,62	0,95	0,82
Mn	-0,80	-0,58	0,02	0,43	-0,04
SiO_2	-0,36	-0,08	0,56	-0,02	-0,58
PO_4^{3-}	-0,23	0,06	0,71	-0,14	-0,61
Al	0,13	-0,04	-0,02	0,23	0,43
Cu	-0,70	-0,86	-0,62	0,95	0,82
Zn	-0,30	-0,11	0,48	0,09	-0,13

Таблиця 5

Порівняльна характеристика природних радіоактивних вод і підземних вод м. Хмільник

Тип вод [6]	Природна обстановка	Радон, ГБк/л			Радій, г/л (10^{-13})			Уран, г/л (10^{-7})		
		мін.	макс.	сер.	мін.	макс.	сер.	мін.	макс.	сер.
Води кислих магматичних порід у зонах інтенсивного водообміну	Води кори вивітрювання	0	2,13	0,08	1	50	1	2	5000	80
	Води глибоких тектонічних тріщин	0	0,91	0,06	20	100	4	2	100	40
Радон-урано-радієві води, пов'язані з рудними концентраціями радіоактивних елементів у породах	Тріщинні й тріщинно-жилінні	до 1480			до 5000			до $n \cdot 10000000$		
	Тріщинні й тріщинно-жилінні, пластово-порові води	до 37			до 10000			до $n \cdot 100000$		
Підземні води м. Хмільник, ГБк/л		0,015	0,04	0,029	0,862	1,84	1,41	-	-	-

За класифікаційними ознаками радонові води м. Хмільник можна співставити з водами глибоких тектонічних тріщин у зонах інтенсивного водообміну, в яких постачання радіоактивних елементів відбувається з кислих магматичних порід, а за величиною концентрації радону – з високорадоновими водами [9].

Концентрація радону у питній воді систем централізованого водопостачання зазвичай мізерна й при вживанні він діє подійно. З одного боку, радон разом з водою потрапляє у травну систему, а з іншого, при диханні – у легені. При дегазації радону з води, його концентрація у кухні або ванній кімнаті може у 30-40 разів перевищувати рівень у інших приміщеннях.

Встановлено, що коефіцієнт переходу радону з води у повітря приміщення складає $(0,5-1,0) \cdot 10^{-4}$ [13]. Попередній перерахунок показує, що активності радону у воді 100 Бк/л відповідає додаткова кількість радону в повітрі приміщення на рівні 6 Бк/м³, що менше фонового вмісту радону в житлових приміщеннях. Тільки при значному перевищенні нормативу щодо радону у воді, його внесок у дозу опромінення може бути порівняним з внеском радону, який надходить з ґрунту і/або будівельних матеріалів. Одним із джерел такого підсиленого надходження радону, розчиненого у воді, є потрапляння

води з глибоких свердловин або природних вод, збагачених радоном.

Таким чином, миттєвий ризик для здоров'я від споживання води, що має невисоку активність радону, незначний. Основний вплив радону з води на людину пов'язаний з його інгаляційним надходженням [4-5]. Одним з методичних підходів до оцінювання радіаційного ризику від опромінення радоном є нормування отриманої ЕРОА радону на відповідну експозицію опромінення, яка за кількісними критеріями відповідає обраній моделі розрахунку ризику (адитивній або мультиплікативній). Як правило, для цього використовуються величини середньорічної або середньомісячної еквівалентної рівноважної активності радону, віднесеної до кількості годин опромінення на рік. З цією метою було розраховано річні еквівалентні дози опромінення радоном [5] від досліджених вод м. Хмільник із заданим часом експозиції (кількість годин на рік – рис. 5а):

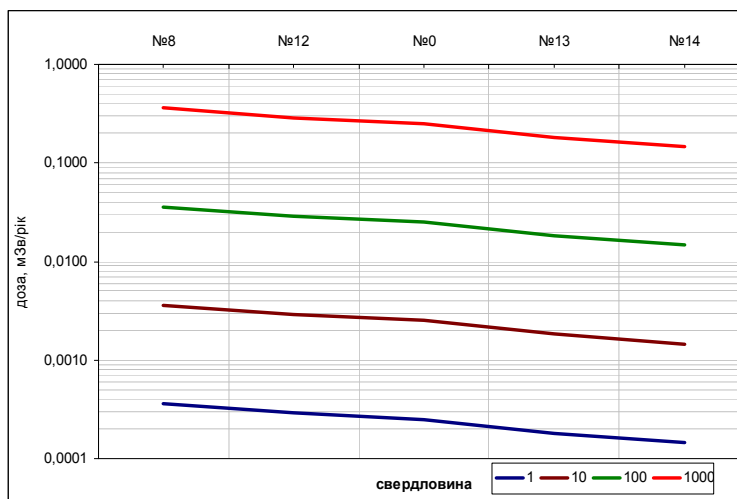
$$D_{Rn} = 10^{-6} (7,8 C_{екв, Rn} + 36 C_{екв, Tn}) \cdot t, (мЗв / рік),$$

де $C_{екв, Rn}$ – середнє значення еквівалентної рівноважної об'ємної активності радону, Бк/м³; $C_{екв, Tn}$ – середнє значення еквівалентної рівноважної об'ємної активності торону, Бк/м³; t – час (год на рік).

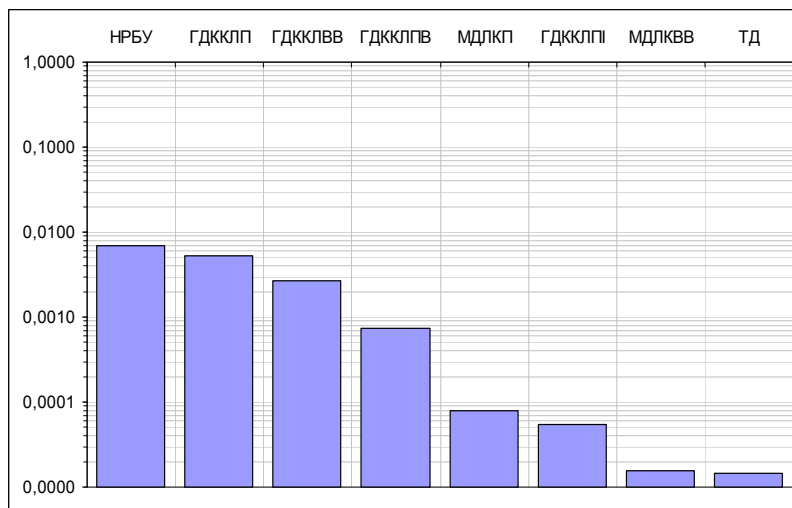
Для якісного порівняння розраховано річні еквіваленти дозових навантажень, які можна співставити з деякими референтними терапевтичними (у радонотерапії) та діючими радіаційними нормами (НРБУ-97/Д-2000) [7].

Підрахунок річних еквівалентних доз від опромінення радоном-222 у досліджених водах м. Хмільник показує, що сумарне опромінення не перевищує допустимих рівнів, встановлених НРБУ-97/Д-2000, але 100-годинна

експозиція спроможна формувати дещо підвищені дози опромінення (рис. 6а), які відповідатимуть терапевтичним і нормативним вимогам (рис. 6б). У той самий час, 1000-годинні експозиції дають однозначно вищі дозові навантаження від усіх досліджених водопунктів. Але ці викладки справедливі для умов повного вилучення радону з води, що не зовсім відповідає реальним умовам. Тому час експозиції може бути збільшений у 3-4 рази.



а



б

Рис. 6. Річні еквіваленти дозових навантажень від опромінення радоном-222 з підземних вод м. Хмільник (а) порівняно з референтними терапевтичними та нормативними значеннями (б):

а – номер свердловини, в кодах ліній – кількість годин опромінення на рік; б – НРБУ – гранично допустимий рівень радону у воді (НРБУ-97/Д-2000), ГДККЛП – гранично допустиме опромінення хворого при радонотерапії (за курс лікування), вживання води (≈ 10 л); ГДККЛВВ – гранично допустиме опромінення хворого при радонотерапії (за курс лікування), водні ванни; ГДККЛПВ – гранично допустиме опромінення хворого при радонотерапії (за курс лікування), повітряні ванни; МДЛКП – мінімально діюча лікувальна концентрація радону, вживання води (10 л); ГДККЛПІ – гранично допустиме опромінення хворого при радонотерапії (за курс лікування), повітряні інгаляції; МДЛКВВ – мінімально діюча лікувальна концентрація, водні ванни (10 год); ТД – терапевтична доза рядового сеансу (0,25 год)

Висновки. Акумуляція радону в підземних водах відбувається внаслідок різних механізмів: постійної генерації від розчиненого радію; еманційного-дифузійного походження від сорбованого радію на частинках порід-колекторів (переважно); транспортування водними потоками з глибинних горизонтів. Найбільш помітною тенденцією формування вмісту радону у водоносних комплексах тріщинного типу є зниження його концентрації в тих водних системах, які перебувають під впливом дифузійно-конвекційних потоків, мають помітні адсорбційні властивості, підвищений вміст акти-

вних катіонів та понижений рН. Не виявлено значущих кореляцій між вмістом радону й хімічним складом підземних вод.

Високий вміст радону у водних комплексах м. Хмільник ($15-44 \text{ МБк/м}^3$) загалом створює можливість широкого впровадження підземних радонових вод у радонотерапевтичну практику як безпосередньо, так і з такими процедурами підготовки: розбавлення, дегазація при прийнятті повітряних ванн, створення штучних еманаторіїв тощо. Подібна схема реалізується на відомих курортах Німеччини, Росії, Чехії, Австрії (табл. 6).

Таблиця 6

Порівняльна характеристика складу радонових вод і практичної радонотерапевтичної активності радону для ряду бальнеологічних курортів світу

Країна	Курорт	Тип вод	Концентрація радону, кБк/л
Сербія	Баня-Ковиляча	Залізистий радоновий	
Угорщина	Хевіз	Слабомінералізований радоновий	
Сербія	Нішка-Баня	Радоновий термальний	
Росія	Залізноводськ	Вуглекисло-сульфатно-гідрокарбонатно-кальцієво-натрієвий	
Сербія	Нішка-Баня	Гідрокарбонатно-кальцієвий	
Росія	Дарасун	Вуглекисло-гідрокарбонатно-кальцієво-магнієвий	
Україна	Хмільник	Гідрокарбонатно-кальцієво-магнієвий	
Україна	Біла Церква	Радоновий	
Росія	Білокуриха	Радіоактивний, лужний, кременистий	
Німеччина	Баден-Баден	Слабосольовий хлоридно-натрієвий	
Хорватія	Істарске-Топлице	Сульфідно-хлоридно-натрієво-кальцієво-радоновий	
Чехія	Яхимів	Термальний бікарбонат-натрієвий	

За вмістом і, відповідно, активністю радону, підземні води водоносних горизонтів тріщинного типу м. Хмільник можуть формувати значущі дозові навантаження як на пацієнтів, так і на медичний персонал при проведенні різноманітних фізіотерапевтичних процедур. Наприклад, при 100-годинній експозиції дози опромінення становитимуть від 0,005 до 0,025 мЗв/рік, що співмірно з тими, які отримують пацієнти при проходженні курсу радонотерапії. Для водопунктів з найбільшим вмістом радону (свр. 8 і свр. 12) опромінення радоном при експозиціях більше 1000 год на рік ще вище і лежить в межах 0,3-0,4 мЗв/рік, що, у свою чергу, відповідає вже рівням нормативного регулювання (НРБУ-97/Д-2000).

Таким чином, результати проведених досліджень свідчать, що для місць, де є родовища радонових вод і де ці води використовуються в господарчій діяльності та побуті людини – м. Хмільник, м. Миронівка, м. Біла Церква, смт. Маньківка, – належить виконувати оцінку вмісту радону у природних водах, вивчати механізми його переходу й накопичення у повітрі приміщень, розробляти моделі розрахунку ефективної дози, в яких би враховувалися рівні й динаміка внутрішнього й зовнішнього опромінення, оцінювати ступінь ризиків виникнення захворювань, пов'язаних з радоном, рівнів радононебезпеки тощо. Для подальших уточнених розрахунків дозових навантажень необхідні більш детальні дослідження механізмів вилучення радону із вод в умовах змінних тисків, температур і часу.

Список використаних джерел

- Бекман І.Н., (2006). Ядерная медицина: Курс лекций. – М.: МГУ. Bekman I.N., (2006). Nuclear medicine (Lecture course) [Yadernaya meditsina (Kurs lektsiy)]. – Moscow, MSU – MGU. (In Russian).
- Вдовенко В.М., Дубасов Ю.В., (1973). Аналитическая химия радия. Аналитическая химия элементов. – Наука, ЛО. – 97 с. Vdovenko V.M., Dubasov Yu.V., (1973). Analytic chemistry of radium. Analytic chemistry of chemical element [Analiticheskaya himiya radiya. Analiticheskaya himiya elementov]. – Nauka - Science, LB. 97 p. (In Russian).
- Гудзенко В.В., Голикова Т.О., Гудзенко Г.І., Шевченко О.Л., (2004). Радон в підземних водах м. Києва. // Вісник Київського університету. Геологія, 29-30. – К. – С. 101-104. Gudzenko V.V., Gollkova T.O., Gudzenko G.I., Shevchenko O.L., (2004). Radon in underground water of Kyiv [Radon v pidzemnih vodah m.Kieva]. Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv: // Visnyk Kyivskogo universitetu. Geologiya, 29-30. – K. – P. 101-104. (In Ukrainian).
- Жуковский М.В., (2001). Расчет радиационных рисков при облучении дочерними продуктами распада радона. – АНРИ, 1. – С. 4-12. Zhukovskiy M.V., (2001). Calculation of radiation risk on exposure be radon progenies [Raschet radiatsionnykh riskov pri oblucheniі dochernimi produktami raspada radona]. – ANRI, 1. – P. 4-12. (In Russian).
- Жуковский М.В., Ярмошенко И.В., (1997). Радон: измерения, дозы, оценки риска. – Екатеринбург: УрО РАН. – 231 с.

Zhukovskiy M.V., Yarmoshenko I.V., (1997). Radon: measuring. doses, risks [Radon: izmereniya, dozyi, otsenki riska]. – Ekaterinburg: UrO RAN. – 231 p. (In Russian).

6. Методика экспрессного измерения объемной активности 222-Rn в воде с помощью радиометра радона типа PPA: Рекомендация, (2004). Государственная система обеспечения единства измерений. М.

Express method of volume activity measuring of radon in water samples with radon radiometr RRA. Recommendations [Metodika ekspressnogo izmereniya ob'emnoy aktivnosti 222-Rn v vode s pomoschyu radiometra radona tipa RRA. Rekomendatsiya.], (2004). State system of measurement assurance - Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmereniy. Moscow. (In Russian).

7. Норми радіаційної безпеки України, (1997). НРБУ-97. – К.: МОЗ України. – 121 с..

Radiation standards of Ukraine, (1997). RS-97 [Normi radiatsiynoi bezpeki UkraYini (NRBU-97)]. Ministry of Health of Ukraine - MOZ Ukrainiyi, – Kyiv. – 121 p. (In Ukrainian).

8. Обращение с минеральным сырьем и материалами с повышенным содержанием природных радионуклидов, (2000). СП 2.6.1.798-99. М.

Treatment of ore material with increased content of natural radionuclides, (2000). SP 2.6.1.798-99 [Obraschenie s mineralnyim syrem i materialami s povyshennym soderzhaniam prirodnykh radionuklidov. SP 2.6.1.798-99]. Moscow. (In Russian).

9. Основные проблемы радоновой безопасности, (2005). Украинский научно-технологический центр. ИГОС НАН и МЧС Украины. – К. – 352 с.

The main problems of radon safety, (2005). [Osnovnyie problemy radonovoy bezopasnosti]. Ukrainian scientific center IGE NAN Ukraine - Ukrainiyi nauchno-tehnologicheskii tsentr, IGOS NAN i MChS Ukrainy. – Kyiv. – 352 p. (In Russian).

10. Максимов В.М., Бабушкин В.Д., Веригин Н.Н. и др., (1979). Справочное руководство гидрогеолога. 3-е изд., перераб. и доп. Т.1. Под ред. В.М. Максимова. – Л.: Недра. – 512 с.

Maksimov V.M., Babushkin V.D., Verigin N.N. et al., (1979). Hydrogeologist' directory textbook. 3-d edition. V. 1. Ed.: Maksimov V.M. [Spravochnoe rukovodstvo gidrogeologa. 3-e izd., pererab. i dop. T.1. Pod red. V.M. Maksimova]. – Leningrad, Nedra. – 512 p. (In Russian).

11. Сыромятников Н.Г., (2001). Экологическая значимость содержания естественных радионуклидов в подземной воде районов рудных месторождений и населенных пунктов Казахстана. – Геол. журнал Казахстана, 1. – С. 73-79.

Syromyatnikov N.G., (2001). Ecological significance of content natural radionuclides in underground water of ore areas and settlements of Kazakhstan [Ekologicheskaya znachimost soderzhaniiya estestvennykh radionuklidov v podzemnoy vode rayonov rudnykh mestorozhdeniy i naselennykh punktov Kazakhstana]. Kazakhstan geological journal – Geol. zhurnal Kazakhstana, 1. – P. 73-79. (In Russian).

12. Шевченко О.Л., Кондратюк Є.І., Гудзенко В.В., Заверталою Т.Ю., (2011). Методи досліджень мінеральних підземних вод: Навч. посібник. – К.: ВПЦ "Київський університет". – 163 с.

Shevchenko O., Kondratyuk Ye., Hudzenko V. et al., (2011). Investigation methods of undergroundwaters. Handbook [Metodi doslidzhen mlneralnih pldzemnih vod]. – Kiev: University Publ. VPC " Kyivskiy universitet ". – 163 p. (In Ukrainian).

13. Akerblom G. and Wilson C., (1981). Radon - Geological aspects of an environmental problem. Geological Survey of Sweden. Rapporter ochmeddelennr, 30, 1982. – Uppsala, Sweden. – 47 p. - ISBN 91-7158-271-1.

14. Zelensky A.V., Buzinny M.G., Los I.P., (1993). Radon-222 in water: concentrations, doses, standards. – Problems of Radiation Medicine, 5. – P. 71-83.

Надійшла до редколегії 03.06.15

S. Vyzhva, Dr. Sci. (Geol.), Prof.

E-mail: vsa@univ.kiev.ua;

O. Shabatura, Cand. Sci. (Geol.), Senior Researcher

E-mail: sand@univ.kiev.ua;

D. Onyshchuk, Cand. Sci. (Geol.), Engineer-Researcher

E-mail: boenerges@ukr.net;

I. Onyshchuk, Cand. Sci. (Geol.), Senior Researcher, Head of Laboratory

E-mail: oivan1@ukr.net

Institute of Geology, Taras Shevchenko National University of Kyiv

90 Vasylykivska Str., Kyiv, 03022 Ukraine

RADIATION CHARACTERISTICS OF KHMILNYK RADON GROUNDWATER

Ground waters of plutonic acid rock bodies tend to have a high radon content. Using radon-high domestic and medicinal waters could be a factor in contaminating the indoor air and increasing the background radiation levels. Effective radon therapy therefore requires an accurate assessment of radon content. Determining the correct doses of radon can only be based on a detailed study of the mechanisms of its accumulation in the groundwater, its chemical composition, pressure, temperature, hydrogeological regime, depth of water supply points, transportation time etc. Groundwater samples were taken from 5 deep wells. To make an accurate assessment of the radon content in the Khmilnyk groundwater, we conducted a series of comprehensive chemical and radiological laboratory tests, which included emanation measurements with the help of the PPA-01M-03 instrument (30% accuracy) and a series of gamma-spectrometric analyses. There were obtained data on mass content of radium-226, volume content of radon ranging from 15 to 44 MBq/m³, and the content of radon formed by dissolved and sorbed radium.

Analysis of radon components showed that its accumulation in groundwater is mainly "emanational-diffusive" in nature and is hardly dependent on the chemical composition of water. No obvious correlation has been found between radon concentration and the chemical composition of the groundwater except such components as carbon dioxide, manganese, SO₄²⁻ and Cl⁻. These are likely to have effect on the physics and chemistry of radium sorption. The projected dosage produced by the Khmilnyk groundwater radon was calculated from the annual equivalent doses for every water point. The results showed that a 100-hour exposure with maximum levels of radon dissolved in groundwater is likely to result in significant radiation doses (from 0.005 to 0.025 mSv per year) used in radon therapy. Groundwater from points having the highest radon levels (Well 8 and Well 12) used in radon therapy (over 100 hours per year) may result in radiation doses of 0.3-0.4 mSv per year, which is in compliance with the public health regulations. The suggested approach to identifying the physical and chemical mechanisms of groundwater radon accumulation provides an insight into its spatial and temporal variability. The research results can be used in radiological monitoring in order to ensure the safety of radon therapy and compliance with the public health regulations.

Keywords: radon, radium, absorbed dose, Khmilnyk groundwater.

С. Выжва, д-р геол. наук, проф.

E-mail: vsa@univ.kiev.ua;

А. Шабатура, канд. геол. наук, ст. науч. сотрудник,

E-mail: sand@univ.kiev.ua;

Д. Онищук, канд. геол. наук,

E-mail: boenerges@ukr.net;

И. Онищук, канд. геол. наук, ст. науч. сотрудник, зав. НИЛ,

E-mail: oivan1@ukr.net

Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,

УНИ "Институт геологии", ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина

РАДИАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДОНОВЫХ ВОД Г. ХМЕЛЬНИК

В подземных водах кристаллических пород кислого состава иногда могут формироваться высокие содержания радона. Использование обогащенных радоном вод для коммунальных и хозяйственных нужд приводит к попаданию радона в воздух помещений, что дополнительно повышает радиационный фон. Для точной оценки эффективных доз, обусловленных облучением радоном и дочерними продуктами распада, необходимо учитывать механизмы его накопления в подземных водах, их химический состав, гидрогеологический режим, глубину водозабора, время транспортировки и т.д. С этой целью изучались подземные воды из водоносных горизонтов кристаллического фундамента г. Хмельник. По пробам из серии водопунктов проведены комплексные химико-радиологические лабораторные исследования, которые включали эманационные измерения с помощью прибора PPA-01M-03 с точностью 30% и ряд гамма-спектрометрических определений содержания радия-226. Получены данные о массовом содержании радия-226, общем объемном содержании радона, в пределах от 15 до 44 МБк/м³, и содержании радона, образованного за счет растворенного и сорбированного радия. Анализ компонент радона разного происхождения выявил, что накопление радона в подземных водах имеет, главным образом, "эманационно-диффузионную природу" и мало зависит от химического состава вод. Не выявлено стойкой связи между концентрацией радона и химическими компонентами вод, кроме углекислоты, марганца, SO₄²⁻ и Cl⁻. Скорее всего, содержание этих компонент влияет на физико-химические процессы сорбции радия. Оценка потенциальных доз облучения радоном из подземных вод г. Хмельник осуществлялась путем подсчета годовых эквивалентных доз разных водопунктов. Результаты подсчета свидетельствуют, что 100-часовая экспозиция максимальной концентрацией растворенного радона способна формировать довольно значимые дозы облучения (от 0,005 до 0,025 мЗв/год), сопоставимые с дозами, получаемыми пациентами при курсе радонотерапии. Дозы от облучения радоном от наиболее радоноемких водопунктов (скв. 8 и скв. 12) при экспозициях более 1000 часов за год уже достигают величин в 0,3-0,4 мЗв/год, что отвечает уровням санитарно-нормативной регуляции (НРБУ-97/Д-2000). Предложенный способ выявления отдельных физико-химических механизмов формирования радоновых уровней в подземных водах позволит точнее описывать его временную и пространственную вариативность, а полученные результаты показывают свою важность в области радиологических расчетов в радонотерапии и санитарно-радиационной регуляции.

Ключевые слова: радон, радий, поглощенные дозы, Хмельник, подземные воды.