



А.І. Севальнев¹, М.І. Костенецький², А.В. Куцак¹

РАДОН У ПЕЧЕРАХ – НОВА ПРОБЛЕМА В СПЕЛЕОЛОГІЇ

¹Запорізький державний медичний університет,

²Запорізька обласна санітарно-епідеміологічна станція

Ключові слова: радон, мікроклімат, печерні системи.

Ключевые слова: радон, микроклимат, пещерные системы.

Key words: radon, microclimate, cave system.

Узагальнено дані щодо вмісту радону і його дочірніх продуктів у печерах України. Вони включають результати вимірів, виконаних Британською експедицією в 1990 р. в Західній Україні, і результати досліджень, проведених Київським карстолого-спелеологічним центром у 1991–1992 рр. в Криму й Західній Україні. Надано рекомендації зі зниження доз опромінення населення в печерах.

Обобщены данные по содержанию радона и его дочерних продуктов в пещерах Украины. Они включают результаты измерений, выполненных Британской экспедицией в 1990 г. в Западной Украине, и результаты исследований, проведенных Киевским карстолого-спелеологическим центром в 1991–1992 гг. в Крыму и Западной Украине. Предложены рекомендации по снижению доз облучения населения в пещерах.

In the article information is generalized on the content of radon and its associated products in the caves of Ukraine. They include the results of measurements, executed by British expedition in 1990 in Western Ukraine, and results of researches, conducted by Kiev karst-speleologic center in 1991–1992 in Crimea and Western Ukraine. Recommendations on decrease of radiation dose of population in caves are given.

Радон – природний радіоактивний інертний газ, безбарвний, не має запаху, в 7,5 разів важчий за повітря. Він має три ізотопи, найбільш важливий серед яких Rn-222, період напіврозпаду – 3,82 діб. Радон є одним із продуктів розпаду урану-238, поширеного в тих чи інших концентраціях (зазвичай малих) у ґрунтах і породах земної кори. Дифундуючи у відкриту атмосферу, радон швидко розсіюється, але в замкнутих просторах підземних порожнин і наземних приміщень може накопичуватись до істотних і навіть великих концентрацій. Радон є альфа-активним ізотопом і при розпаді утворює дочірні продукти: короткоживучі ізотопи полонію, свинцю, вісмуту. На відміну від радону, який є газом, його дочірні продукти розпаду (ДПР) утворюють тверді частки, що приєднуються до аерозолів повітря.

Радон визнано одним із провідних канцерогенних чинників середовища [1]. В аспекті ризику для здоров'я людини головну небезпеку представляє не стільки сам радон, скільки його ДПР, що при вдиханні людиною осідають у легенях. Встановлено, що збільшені концентрації ДПР радону підвищують ризик захворювання на рак легень, а також на рак крові [2–4].

МЕТА РОБОТИ

Висвітлити закономірності формування та поведінки радону і його дочірніх продуктів, а також дози опромінення, що отримує людина за рахунок радону в природних печерах.

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Бібліосемантичний, аналітичний методи.

У статті використані критерії та межові рівні, прийняті у Великобританії та США: WLM – робочий рівень за місяць (експозиція); WL – робочий рівень – величина прихованої енергії, дорівнює $1,3 \cdot 10^8$ Мэв·м⁻³; 1 WLM = 3,54 мДж·г·м⁻³; Wlh – робочий рівень за годину; 1 Wlh = 0,0735 Мэв.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Як відомо, основний вклад у сумарну дозу опромінення людини вносить радон-222, що складає в Україні 2,4 мЗв на рік [5]. Оскільки радон більшою мірою накопичується в замкнутому просторі, викликає інтерес проблема опромінення радоном у підземних порожнинах, тобто в природних печерах.

Систематичні дослідження радону й альфа-опромінення в природних печерах почато в 1970-х роках у США, потім продовжено в Англії, Угорщині, Італії, Чехословачії, Югославії, Японії. В Україні цією проблемою почали займатись на початку 1990-х років.

У 1990 році Британською експедицією виконано виміри радону і його ДПР у печерах різних регіонів колишнього СРСР, включаючи Західну Україну та Крим. У 1991–1992 рр. Київським карстолого-спелеологічним центром проведено роботи з вивчення радону в печерах у ряді регіонів України й інших держав СНД [6]. Отримані результати збігаються з результатами Британської експедиції і представляють великий науковий і практичний інтерес.

Дослідженнями, проведеними в США, Англії та інших країнах, виявлено деякі важливі закономірності формування й поведінки радону в печерах. Рівні альфа-радіації в печерах зазвичай перевищують атмосферні в 10–300 разів, але можуть перевищувати й на 4 порядки. Звичайні концентрації ДПР радону в атмосфері – 0,001 WL, в печерах – в межах 0,03–3,0 WL, тоді як максимальна виміряна в печерах концентрація складає майже 42 WL (або $155 \cdot 400$ Бк·м⁻³ еквівалентна рівноважна концентрація радону) в печері Джайантс Хоул, Англія [7,8].

Формування і розподіл концентрацій радону в печерах найбільшою мірою регулюється повітрообміном із зовнішньою атмосферою, що, в свою чергу, визначається



Вміст радону і його дочірніх продуктів у печерах західної України

Місця вимірювань	Концентрація радону за даними досліджень Київського карстолого-спелеологічного центру, Бк м ³	Концентрація ДПП радону, WL	
		за даними досліджень Київського карстолого-спелеологічного центру (грудень)	за даними Gunn, 1991 (серпень)
Поверхня			0,0029 (n=7)
Печера Озерна:			
Вхідна галерея	2620	0,35	
Зал Сонце			0,55 (n=3)
Західна Стіна			0,55 (n=3)
Оз. Неждане			0,42 (n=2)
Хатки	7560	1,02	0,59 (n=2)
Базовий табір			0,55 (n=1)
Зал Кам'яного Піку			0,56 (n=1)
Оз. Немо	5820	0,78	
Кристал	10800	1,46	
Печера Оптимістична:			
Вхідний лаз	858	0,12	
Ближній р-н			1,16 (n=1)
Табір 1,5 Сарая	20900	2,82	
Авербаха	18200	2,46	
«Сива Кобила»	23700	3,2	

топологією печерної системи й відмінностями в щільності печерного і зовнішнього повітря [9–12]. Проте в деяких крупних і ізольованих від зовнішньої атмосфери печерних системах внутрішній повітрообмін і розподіл радону мало залежать від зовнішньої атмосфери й визначаються конвективною повітряною циркуляцією, викликаною температурними відмінностями між зонами печерної системи [13].

На Кримському масиві, що складений верхньоярськими вапняками, відомо близько 140 печер. У найбільшій з них – печері Мармуровій – проведено режимні радонометричні дослідження протягом року. З 1989 року печера облаштована й експлуатується як екскурсійний об'єкт, приймаючи щороку понад 200 тисяч відвідувачів.

Радонометричні дослідження проводили шляхом вимірів концентрацій радону за фіксованою мережею з 22 пунктів, що повторювались у різні сезони року. Серію вимірів виконували в межах 1–2 днів при однорідній мікрокліматичній ситуації. Всього виконано 5 серій: у грудні 1991 р., в лютому, квітні, липні, листопаді 1992 р. Виміряні концентрації радону варіюють від 156 до 39 300 Бк·м⁻³ (концентрації ДПП від 0,02 до 5,31 WL при прийнятому рівні рівноваги 0,5), демонструючи високу просторову й сезонну мінливість. Середня концентрація радону в печері склала 8673 Бк·м⁻³ (еквівалентна концентрація дочірніх продуктів (ЕКДП) дорівнює 1,2 WL).

Просторова мінливість вмісту радону визначалась,

головним чином, умовами повітрообміну різних ділянок печери із зовнішньою атмосферою. Найнижчі концентрації спостерігали в залі Казок – найбільш провітрюваній ділянці печери. Високий вміст радону тут визначався взаємозв'язком з нижнім ярусом печери. Середній вміст радону в залі Казок склав 2103 Бк·м⁻³, а ЕКДП – 0,28 WL.

Значно вищі концентрації радону спостерігали в головній галереї: залах Перебудови, Гребельному, Палацовому, Глиняному. Тут повітрообмін із зовнішньою атмосферою набагато слабший. У дальньому кінці Глиняного залу встановлено найвищу концентрацію радону в печері – 39 300 Бк·м⁻³ (ЕКДП 5,3 WL). Середнє значення з 5 різносезонних вимірів також найвище: 17 505 Бк·м⁻³ (ЕКДП 2,36 WL). Ця аномалія може бути пояснена вірогідним повітрообміном з існуючими невідомими закритими порожнинами, розташованими протягом головної галереї. Отже, ці дані можна виокремити за головною галереєю, зважаючи на вплив особливих умов. Середня концентрація радону в залах Перебудови-Глиняного складає 6259 Бк·м⁻³ (ЕКДП – 0,85 WL).

У межах Тигрового Ходу є 4 пункти спостережень, один з яких розташований у відособленій камері на глибині 7 м під основною порожниною. Тут відзначено найвищі для Тигрового Ходу концентрації радону, які слід групувати з даними нижньому ярусу, що проходить безпосередньо під вказаною камерою, з яким є зв'язок повітрообміну. Середній вміст радону в інших пунктах Тигрового Ходу складає 4586 Бк·м⁻³



Радіаційний стан у печерах

Район, печера, ділянка	Середня концентрація ДПР радону, WL	Отримувані дози, мЗв	
		за 6-годинний візит у печеру	за 5-добову зміну в підземному таборі
Крим, печера Мармурова:			
(зал Казок + Тигровий хід)	0,45	0,2	4
зали Перестр.–Дворцовий	0,85	0,37	7,4
Глиняний зал	2,36	1,0	20
Нижній ярус	1,71	0,75	15
Крим, печера Холодна	0,11	0,05	1
Західна Україна:			
Печера Озерна: (Ближній район)	0,61	0,30	6
Печера Оптимістична:	2,41	1,1	21,2
«Сива Кобила»	3,20	1,4	28,2

(ЕКДП 0,62 WL), що більш ніж удвічі перевищує середнє значення в суміжному залу Казок і відображає утруднений повітрообмін із зовнішньою атмосферою.

Високим вмістом радону характеризується нижній ярус печери, особливо його 2 «ближні» пункти. Середня концентрація тут склала $12\ 637\ \text{Бк}\cdot\text{м}^{-3}$ (ЕКДП – 1,7 WL). У далекому кінці нижнього ярусу середня концентрація радону помітно нижча, що узгоджується з мікрокліматичною своєрідністю цієї ділянки і висновком про наявність повітрообміну із зовнішньою атмосферою. Отже, просторові варіації вмісту радону в печері Мармуровій тісно пов'язані з особливостями повітрообміну.

Однократний вимір концентрації радону виконано в далекій частині печери Холодна – невеликій похилій низхідній порожнині. Відносно низький вміст ($856\ \text{Бк}\cdot\text{м}^{-3}$) відповідає значному провітрюванню, зумовленому відкритістю печери.

У західних областях України поширені найбільші в світі гіпсові лабіринтові печери (неогенові гіпси). Печери Західної України – Озерна і Оптимістична, характеризуються горизонтально-поверховою будовою, високою щільністю каналів в плані і мають, як правило, один вхід [14,15]. В цілому, печери Озерна і Оптимістична демонструють високий вміст радону і його ДПР, причому середній вміст ДПР радону в Оптимістичній (2,41 WL) майже в 4 рази перевищує середній вміст в Озерній (0,61 WL).

Перші виміри концентрацій радону і його ДПР в печерах регіону (у Озерній та Оптимістичній) зроблено британськими спелеологами в ході експедиції 1990-х років. Виміри дослідників Київського карстолого-спелеологічного центру в тих же печерах виконано в грудні 1992 р. Слід підкреслити, що виміри в Озерній виконані в межах добре вентильованого Ближнього району, тоді як в Оптимістичній 3 з 4 вимірів зроблено у віддалених центральних районах лабіринту. Всі наявні дані наведено у таблиці 1.

Отже, наявні дані дозволяють скласти лише загальне уяв-

лення про рівні радону в цих великих печерних системах. Необхідні подальші виміри, мережа яких має охоплювати всі основні райони лабіринтів.

Підвищений вміст радону і його ДПР є атрибутивною властивістю печер. Можливість здобуття підвищеної дози альфа-радіації розглядається як один із чинників ризику, властивих печерному середовищу [16]. Пов'язані з цим обставини й питання радіаційної безпеки мають бути відомі та враховані як у професійній, так і в аматорській діяльності, що здійснюється в печерах. Оцінені дані наведено у таблиці 2.

У таблиці 2 подано середні концентрації дочірніх продуктів радону для окремих печер або для окремих ділянок печер, залежно від складу й внутрішньої однорідності доступних вибірок. У більшості випадків вміст перевищує межовий рівень «контрольованої зони» за чинними на той час британськими стандартами (0,1 WL) і ГДК для робочих приміщень, що рекомендувалось Міжнародною Комісією з Радіаційного Захисту (0,3 WL). За правилами США, при перевищенні рівня 0,3 WL в печері необхідно проводити щотижневий моніторинг концентрацій та облік накопичених доз для всіх працівників, задіяних для роботи під землею.

У наступних 2 колонках таблиці 2 наведено дози, що отримуються в обстежених печерах, для 2 типових ситуацій: 6-годинного візиту в печеру (відповідає стандартному робочому виходу) і 5-добового перебування в базовому таборі (відповідає поширеній практиці дослідження печер із застосуванням підземних таборів, тобто з цілодобовим перебуванням у печері). Враховуючи великі сезонні варіації концентрацій радону і його дочірніх продуктів, реальні дози можуть бути вище оцінених влітку і нижче – взимку.

Наведені дані свідчать про те, що поодинокі відвідування печер не представляють радіаційну небезпеку екскурсантам оскільки в цьому випадку радон не створює великого радіаційного навантаження.



Водночас, у більшості випадків при перебуванні протягом 5 діб у підземному таборі можна отримати дозу опромінення, що перевищує річну дозу населення України за рахунок радону в приміщеннях, що дорівнює 2,4 мЗв.

У деяких печерах доза опромінення навіть перевищує річну допустиму дозу для професійних робітників за українськими стандартами – печера Мармурова, печера Оптимістична.

Це ще раз підтверджує необхідність радонометричного обстеження основних печер, що активно відвідують, аби спелеологічна громадськість мала змогу планувати активність усвідомлено й вживати заходи зі зменшення радіаційної небезпеки. До таких заходів, рекомендованих для печер з високим вмістом радону і його ДПР, слід включити:

1. Обмеження часу роботи в печерах. Більшість раціональних завдань, що ставлять перед собою спелеологи, можуть бути вирішені з набагато меншими, ніж зазвичай, витратами «печерного» часу, за умови ретельного планування й самодисципліни. У разі крайньої необхідності створення підземних таборів слід передбачати своєчасну ротацію складу.

2. Планування робіт на зимовий період, коли концентрації радону і його ДПР мінімальні для даної печери.

3. Використання респіраторів, що дуже ефективно, оскільки основну потенційну небезпеку представляє експозиція опромінювання легенів при вдиханні дочірніх продуктів радону.

4. Відмова від куріння в печерах, оскільки ризик захворювання на рак легенів при одночасному впливі обох чинників (куріння і ДПР радону) не підсумовується, а множитья.

ВИСНОВКИ

1. Всі екскурсійні печери України, що діють і плануються до освоєння, повинні бути обстежені на вміст радону і його ДПР; це є обов'язковою вимогою, наприклад, в Англії, США та інших країнах.

2. Високі дози опромінення за рахунок радону в деяких печерах вимагають постійного радіаційного моніторингу, обліку часу роботи персоналу й контролю індивідуальних доз опромінення працівників.

3. При експлуатації печер, де реєструються високі дози опромінення, необхідне обмеження часу підземної роботи персоналу, що може досягатись його ротацією між підземними й поверхневими роботами.

4. Поодинокі відвідування печер екскурсантами не створюють для них жодної небезпеки. Навіть при найвищих літніх рівнях (близько 0,8 WL), протягом 1,5-годинної екскурсії відвідувач може отримати дозу близько 0,09 мЗв, що більш ніж у 26 разів нижча за річну дозу опромінення населення України (2,4 мЗв) за рахунок радону.

5. Необхідно розробити нормативи вмісту радону в повітрі печер і ліміти річної дози опромінення населення радоном.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Hanson D.J.* Radon tagged as cancer hazard by most studies, researchers / *Hanson D.J.* // *Chemical & Engineering News*. – 1989. – Feb. 6. – P. 7–13.
2. *Beckman R.T.* Radiation hazards in caves / *Beckman R.T.* // *Proceedings of the Nat. Cave Management Simposia*. – Mammouth Cave, Kentucky, 1980. – 204 p.
3. *Gunn J.* Radon concentrations in three Russian cave areas / *Gunn J.* // *Cave Science*. – 1991. – Vol. 18, №2. – P. 85–87.
4. *Lundin F.E.* Radon-daughter exposure and respiratory cancer quantitative and temporal aspects / *Lundin F.E., Wagoner J.K., Archer V.E.* // *Joint Monograph No1*, U.S. Dept. of Health, Education and Welfare, Public Health Service. NIOSH-NIEHS. – 176 p.
5. *Павленко Т.О.* Радіаційно-гігієнічна оцінка доз опромінення населення України від техногенно-підсиленних джерел природного походження: автореф. дис... д. біол. н. / *Павленко Т.О.* – К., 2010. – 39 с.
6. *Наседкин В.М.* Воздушная альфа-радиация в пещерах: состояние проблемы / *В.М. Наседкин, А.Б. Климчук* // «Свет»: Вестник Киевского карстолого-спелеологического центра. – 1991. – №1. – С. 9–13.
7. *Gunn J.* Research on radon in British limestone caves and mines, 1970–1990 / *Gunn J., Fletcher S., Prime D.* // *Cave Science*. – 1991. – Vol. 18, №2. – P. 63–65.
8. *Yarborough K.A.* The National Park Service cave radiation research and monitoring program / *Yarborough K.A.* // *Proceedings of the Nat. Cave Management Simposia*. Carlsbad, New Mexico, 1980. – P. 27–40.
9. *Ahlstrand G.M.* Alpha radiation project at Carlsbad Caverns: two years and still counting / *Ahlstrand G.M., Fry P.L.* // *Proceedings of the Nat. Cave Management Symposium*. Big Sky, Montana, 1977. – P. 133–137.
10. *Atkinson T.C.* Climate and natural radon levels in Castleguard Cave, Columbia Icefields, Alberta, Canada / *Atkinson T.C., Smart P.L., Wigley T.M.L.* // *Arctic and Alpine Research*. – 1983. – Vol. 15, №4. – P. 487–502.
11. *Yarborough K.A.* Airborne alpha-radiation in natural caves administered by the National Park Service // *Proceedings of the Nat. Cave Management Symposium*. Big Sky, Montana, 1977. – P. 125–132.
12. *Middleton T.* Radon daughter concentrations in Giant's Hole, Derbyshire / *Middleton T., Gunn J., Fletcher S., Prime D.* // *Cave Science*. – 1991. – Vol. 18, №2. – P. 67–74.
13. *Prime D.* Radon daughter concentrations in Pooles Cavern, Derbyshire / *Prime D., O'Hara M.* // *Cave Science*. – 1991. – Vol. 18, №2. – P. 71–74.
14. *Cunningham K.I.* Recognition of microclimate zones through radon mapping, Lechuguilla Cave, Carlsbad Caverns National Park, New Mexico / *Cunningham K.I., LaRock E.J.* // *Health Physics*. – 1991. – Vol. 61, №4. – P. 493–500.
15. *Климчук А.Б.* Геолого-гидрогеологические условия развития крупных гипсовых пещер Западной Украины и их генезис / *Климчук А.Б., Андрейчук В.Н.* // *Пещеры. Межвузовский сборник научн. трудов*. – Пермь, 1986. – С. 12–25.
16. *Klimchouk A.B.* Large gypsum caves in the Western Ukraine and their genesis / *Klimchouk A.B.* // *Cave Science*. – 1992. – Vol. 19, №1. – P. 3–11.

Відомості про авторів:

Севальнев А.І., к. мед. н., доцент, зав. каф. загальної гігієни та екології ЗДМУ.

Костенецький М.І., к. мед. н., зав. радіологічного відділу Запорізької обласної санітарно-епідеміологічної станції.

Кущак А.В., асистент каф. загальної гігієни та екології ЗДМУ.

Адреса для листування:

Севальнев А.І. 69035, м. Запоріжжя, пр-т Маяковського, 26, ЗДМУ, каф. загальної гігієни та екології. Тел.: (061) 233 70 97.