

## MONITORING OF RADON CONCENTRATIONS IN BULGARIAN SHOW CAVES (WITH ASSESSMENT OF RADIATION RISK)

**Abstract:** The results of long-term monitoring of Rn concentration in Bulgarian tourist caves are presented. Methodology of measurement using passive (track etch) detectors was developed, allowing simultaneous measurement at several dozen measuring stations. From long-term periodic trends in the course of concentrations, seasonal variations were determined for different types of caves, both in terms of morphology, internal spatial and microclimatic conditions and geological characteristics of individual localities. The measured concentrations are usually around 3-5 thousand Bq.m<sup>-3</sup>, in some cases they exceed 8 thousand Bq.m<sup>-3</sup>. Such high concentrations already require a qualified estimate of the effective radiation doses to which professional staff of caves, especially guides, may be exposed. Based on the work schedules provided, effective doses for guides were calculated in 4 of the most typical and famous tourist caves - Venetsa, Saeva dupka, Bacho Kiro and Uhlovitsa. Both approaches - conservative and real - have shown that effective doses are of the same order of magnitude as the 6 mSv limit value and in some cases several times higher. With a view to ensuring the health of the guides, it is therefore necessary to create legislative conditions for this new (!) working category, to ensure continuous monitoring of the Rn concentration in radiation endangered sites and to allow flexible changes to work schedules with regard to accumulated effective dose.

---

### Author information:

#### Karel Turek

DSc.

Department of Radiation Dosimetry of the Nuclear Physics  
Institute AS CR, Prague  
✉ [turek@ujf.cas.cz](mailto:turek@ujf.cas.cz)  
🌐 Czech Republic

#### Petar Stefanov

Experimental Laboratory of karstology,  
National Institute of Geophysics, Geodesy and Geography –  
Bulgarian Academy of Sciences  
✉ [psgeo@abv.bg](mailto:psgeo@abv.bg)  
🌐 Bulgaria

#### Hana Orčíková

Department of Radiation Dosimetry of the Nuclear Physics  
Institute AS CR, Prague  
✉ [orcikova@ujf.cas.cz](mailto:orcikova@ujf.cas.cz)  
🌐 Czech Republic

### Keywords:

Bulgarian karst, show caves, radon, concentration monitoring, BGSpeleo-RadNet, track etch detectors, long term measurements, seasonal variation, radiation risk, effective dose calculations, new preventive regulations

## 1. Увод

### 1.1. Радон и неговите особености

**Р**адонът (Rn<sup>222</sup>) е радиоактивен благороден газ, алфа източник (T<sub>1/2</sub> = 3,8 дни, E<sub>α</sub> = 5,6 MeV), продукт от разпадането на урана (U<sup>238</sup> - Ra<sup>226</sup> - Rn<sup>222</sup>). Радонът е често срещан в околната среда (UNSCEAR 2000 [32]), отличава се с висока подвижност и миграционна способност и причинява 49% от естественото радиационно облъчване.

Радонът е потенциално опасен за човешкото здраве, защото е един от основните причинители на

рак на белите дробове. Най-важни от гл.т. на радиационната защита са дъщерните краткоживеещи продукти от разпадането на радона:  $\text{Po}^{218}$  ( $E_{\alpha}=6 \text{ MeV}$ ) и  $\text{Po}^{214}$  ( $E_{\alpha}=7,7 \text{ MeV}$ ), които се прилепват към аерозолните частици.

Типичната средна концентрация на радон<sup>222</sup> в приземния атмосферен въздух на открито е  $10 \text{ Bq/m}^3$ . Негов основен източник е почвеният газ [3]. Най-високите концентрации на радон се наблюдават в подземните пространства, каквито са урановите рудници [10, 21]. Подобна ситуация със значително високи концентрации на радон има и в останалите рудници и в естествените подземни кухини като пещерите. В карстовите територии съществуват сложни системи от пукнатини и каверни с различни размери, вкл. пещерни кухини, които служат за природни резервоари на голяма част от радона в почвения газ. В случая трябва да се има предвид, че радонът, подобно на  $\text{CO}_2$ , е газ, по-тежък от въздуха. Това предполага, че в карстовите резервоари, особено ако те са лошо вентилирани, може да се натрупат значителни количества радон.

През последните десетилетия в света са проведени голям брой изследвания, фокусирани върху концентрацията на радон в пещерите, които са насочени към две значими области:

- а) радиационна защита на лицата, работещи /посещаващи пещери (напр.: [13,16,27,33]);
- б) проучване на радона с цел проследяване движението на въздуха в пещерите [11, 14].

## 1.2. Изследвания на радона в българските пещери

В България карстовите територии обхващат  $\frac{1}{4}$  от територията на страната и в тях са проучени над 6000 карстови пещери [1, 5, 6, 34]. От тях 16 са туристически, които всяка година имат над 400 хил. посетители. В 12 туристически пещери има назначен персонал, който развежда посетителите в пещерите. Пещерните екскурзоводи многократно и целогодишно са изложени на облъчване от радон, натрупан в пещерните резервоари.

Първото проучване на естествената радиокативност в българските пещери е проведено от екип на Института по радиобиология и радиационна хигиена, София [2]. То включва 9 пещери, от които 5 благоустроени туристически: Бачо Киро, Орлова чука, Снежанка, Магура, Леденика. Концентрацията на радон<sup>222</sup> е измервана по йонизационния метод с еманометър СГ-11, а нивото на скритата енергия от разпадните му продукти е определяна посредством аерозолен радиометър РВ-4. Според авторите на проучването, „Получените резултати в 97% от изследваните пунктове са по-високи от приетата норма за полиметалните рудници –  $1 \cdot 10^{-10} \text{ к/л}$ . В някои случаи измерените стойности многократно надвишават ПДК за урановите рудници –  $0,3 \cdot 10^{-10} \text{ к/л}$ ”<sup>1</sup> (с. 493). За съжаление, при публикуването на резултатите не са посочени пунктовете на измерване в пещерите, както и времето, когато то е проведено. Въпреки обнародваните тревожни констатации, през следващите години не са предприети нови изследвания в туристическите пещери и не е въведен контрол на облъчването от радон в пещерите като работни места.

Едва през 2008 г. Географският институт при БАН, дн. Деп. География на НИГГГ-БАН, започна пилотни проучвания на радона в пещери от моделните карстови геосистеми, включени в експерименталната програма за изследване на съвременния карстогенезис в България [22, 23, 30, 31]. Изследванията се реализират в партньорство с Института по ядрена физика на АН на Чешката република в Прага (Nuclear Physics Institute AS CR) по програмата за междуакадемично сътрудничество. През първите 2 години са разработени и тествани подходящи методики за мониторинг на радона, включително проектиране на измервателна камера с пасивни трекови детектори и оптимизиране на времето на експозиция съобразно морфоложките и микроклиматичните особености и сезонна динамика в пещерите [22, 23, 30]. Активизирането и

<sup>1</sup>  $1 \cdot 10^{-10} \text{ к/л} = 3,7 \text{ kBq/m}^3$

разширяването на проучванията на радона стана възможно чрез проекта ProKARSTerra на ФНИ, имащ за цел да разработи в международно сътрудничество експериментален модел на комплексен мониторинг за устойчиво развитие и управление на карстови територии [8, 35].

### **1.3. Научна мрежа за мониторинг на радона в българските пещери (BGSpeleo-RadNet)**

През 2010 г. Експерименталната лаборатория по карстология на НИПТГ-БАН, реализираща проекта ProKARSTerra, разработи модел за интегриран мониторинг на карстовите геосистеми (MIKS), който включва и мониторинг на пещерните системи (Speleo-MIKS) [8, 35]. Един от основните елементи на мониторинга е радиологичният, в т.ч. на радон<sup>222</sup>. Пещерите, в които се експериментира мониторинга на радона, са база за изграждането на специализирана научна мрежа BGSpeleo-RadNet [36, 37]. Тя се поддържа от Експерименталната лаборатория по карстология в партньорство с Департамента по радиодозиметрия на Института по ядрена физика на Чешката АН. В края на 2019 г. мрежата включва 46 пещери (в т.ч. 13 благоустроени туристически) с общо 77 пункта за мониторинг.

### **1.4. Практически аспекти на мониторинга на радона в българските пещери**

Научната мрежа BGSpeleo-RadNet чрез дългосрочният мониторинг на радон<sup>222</sup> осигурява обективна информация в три научно-приложни области:

- роля на естествените радиационни процеси в съвременния карстогенезис [35];
- връзка между радона и земетръсната активност [24];
- радиационна защита на работещите в карстовите пещери [31, 38].

Подробните познания за концентрацията на радона и неговите локални и сезонни изменения могат и трябва да бъдат използвани за по-добра оценка на риска за здравето на пещерните водачи в туристическите пещери. Те са изложени продължително време на радиационно облъчване от радон и трябва да им бъдат гарантирани безопасни условия на труд.

## **2. Обекти на изследване**

Настоящата публикация акцентира върху рисковете от радиационно облъчване с радон за работещи в карстови пещери. Поради това като обекти на изследването са избрани 12 туристически пещери с назначен обслужващ персонал (пещерни водачи/екскурзоводи) и регламентирано работно време (фиг. 1 и табл. 1). От тези пещери 11 са благоустроени и електрифицирани и в тях е съсредоточен основният туристопоток. Изключение е пещерата Лепеница, която е обезопасена, но не е електрифицирана. Повечето от туристическите пещери са с целогодишно работно време, а 3 (Орлова чука, Лепеница и Бисерна) са с ограничен режим на достъп - през зимата са затворени за посетители, а пещерата Бисерна - и през месеците май-юли във връзка с размножителния период на прилепните колонии.

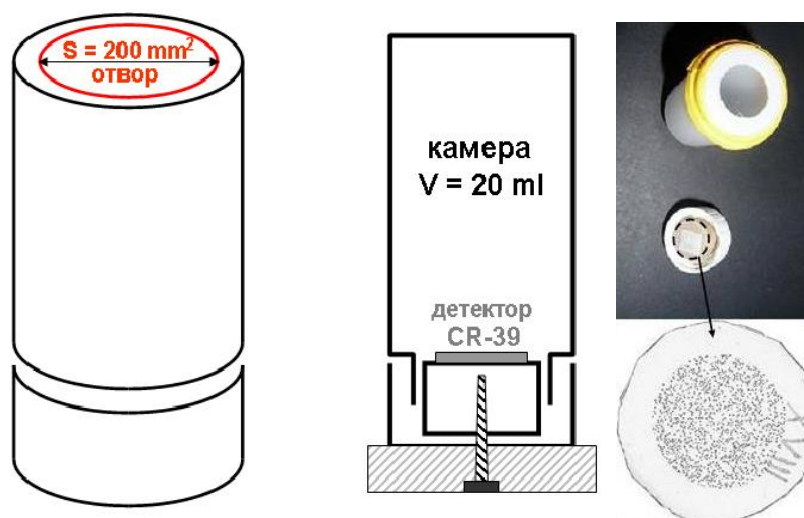
Пещерите в България са държавна собственост, а управлението и стопанисването на туристическите пещери е предоставено с нормативни актове от държавните органи на юридически лица с нестопанска цел, на общински администрации или дирекции на природни паркове [25, 26]. Но в българското законодателство все още не е въведено работно място „туристическа пещера“, а в регистъра на професиите в България отсъства професия „пещерен водач/екскурзовод в туристическа пещера“.



Фиг. 1. Туристическите пещери в България, обекти на изследването

### 3. Методика на изследванията и експериментална работа

При мониторинга на концентрацията на  $Rn^{222}$  в туристическите пещери се прилага методът на кумулативни (пасивни) измервания с *алфа*-трекови детектори (детектори на следи) [3, 7, 12]. Те са твърдотели и се прилепват в пластмасови камери, изработени по оригинална конструкция (фиг. 2), позволяваща дифузното проникване на радона, но задържаща неговите дъщерни продукти (прикрепени върху прахови и аерозолни частици в пещерния въздух). За детектори се използват чувствителни към радиационно облъчване CR-39 пластмасови дискове (Page Moldings Ltd и Track Analysis Systems Ltd, произведени във Великобритания) с диаметър 16 mm и дебелина 0,5-0,7 mm [23, 31].



Фиг. 2. Общ вид на използваните за мониторинга на радона камери с пасивни детектори  
Вдясно – сканиран експониран детектор след ецване [23, 31]

*Алфа*-частиците формират върху повърхностния слой на детектора латентни (пробиви) следи, които след специална процедура на химична (пре-ещване) и електрохимична обработка (ещване) стават видими с оптичен микроскоп или с компютърен скенер с висока разделителна способност [3, 7, 28, 30, 31].

Камерите, използвани за мониторинга на радона, са калибрирани в Rn-Chamber на National Institute for Nuclear, Chemical and Biological Protection, Kamenná near Přeborn, Чешка република (<http://www.sujchbo.cz>) при различни стойности на времевия интеграл на активност на Rn (200-800 kBq.m<sup>-3</sup>.ден. Резултатът (**R**) е 55 ± 7 следи.см<sup>-2</sup> на 1 kBq.m<sup>-3</sup>.ден [31].

За да бъде ефективен, мониторингът в пещерите трябва да има продължителност най-малко 1 година. Интервалите на експозиция на детекторите варират между 1 седмица и 4 - 5 месеца (средно ок. 46 дни) според морфологията и вентилацията на пещерата и нейното значение за провежданите изследвания. Честата смяна на детекторите позволява да се отчетат и сезоните климатични ефекти. Дългогодишният мониторинг е база за изучаване и на въздействията на глобалните промени. В туристическите пещери, обект на изследването, са определени от 2 до 7 пункта на мониторинг. Изборът на пунктовете за мониторинг на радона е съобразен с морфоложките особености на пещерата и нейната микроклиматична зоналност, като за целта се провеждат предварителни и съпътстващи режимни профилни микроклиматични измервания, вкл. на концентрацията на CO<sub>2</sub> [23, 24].

Експонираните детектори от българските пещери се обработват в DRD NPhI-CAS в Прага и се сканират със скенер с висока разделителна способност (4800 dpi) Epson Perfection Photo 4990. Плътноста на *алфа*-следите (□ □ tracks.cm<sup>-2</sup>) се оценява с помощта на софтуера ImageJ (достъпен на <http://rsbweb.nih.gov/ij/download.html>). В случаите когато плътността на следите е повече от 5000 cm<sup>-2</sup>, част от тях се припокриват, поради което се използва експериментално определена корекционна функция:

$$\rho = \rho_{sw} \cdot (1 + (0,9554E - 05) \cdot \rho_{sw} + (1E - 09) \cdot \rho_{sw}^2) \quad (1)$$

където □<sub>sw</sub> е плътността на *алфа*-следите, получена от Image J.

След това средната стойност на концентрацията на радона (Bq.m<sup>-3</sup>) за периода на експозиция **t**<sub>exp</sub> (дни) се изчислява по формулата:

$$\overline{A_{V,exp}} = \frac{\rho}{R \cdot t_{exp}} \quad (2)$$

Въз основа на резултатите от мониторинга на концентрациите на радона се изчисляват годишните ефективни дози и безопасното спрямо радиационния риск годишно работното време (вж. раздел 4.2.).

Пасивните детектори са най-удобни за мониторинг в пещери [15, 17, 19, 33], защото са с дългосрочна устойчивост на високата (до 100%) влажност на пещерния въздух, имат опростен дизайн и ниска цена на детектора. Тези предимства позволяват едновременни измервания във всички пещери и пунктове, включени в мрежата BGSpeleo-RadNet.

С оглед прецизиране на резултатите от мониторинга на радона с пасивни трекови детектори, в част от пещерите е приложено и инструментално измерване на активността на радона с Alpha-E (в периода 2017-2019 г.). От есента на 2018 г. в пещерите Бачо Киро и Съева дупка се експериментира и непрекъснат инструментален мониторинг с Alpha-E. За съжаление, много високата влажност на пещерния въздух и протичащите кондензационни процеси създават периодични проблеми в работата на приборите. Сравняването на данните с паралелния

мониторинг на радона с пасивни детектори показва отклонение между 5-6 и 11%, което е в рамките на допустимата грешка.

## 4. Резултати и дискусия

### 4.1. Сезонни вариации в активността на радона

Дългосрочните времеви концентрации на радона и техните сезонни изменения са представени на фиг. 3. За целта са избрани 4 представителни за туристическите пещери с продължителен мониторинг. При пещерите Съева дупка и Ухловица има ясно изразен лятно-есенен максимум в концентрациите на радона, който е преобладаващ и в повечето от туристическите пещери в България. Той съвпада с максимума на туристическите посещения и най-продължителния престой в пещерите на пещерните водачи.

На фиг. 3. са представени и средногодишните нива на концентрациите на радона (максимални и средни) в представителни за съответната пещера пунктове. Пиковите стойности са през месеците август-октомври, а минимумът – през декември-март. Пещерата Бачо Киро се откроява с целогодишно високи средни стойности - над 2-3 kBq.m<sup>-3</sup> по Дългия маршрут, въпреки че има добра вентилация, която се потвърждава и от ниските концентрации на CO<sub>2</sub> [24].

Концентрацията на радона в туристическите пещери зависи от тяхната морфология, разположението и надморската височина на входа/входовете и режима на вентилация, който се определя от микроклиматичните особености и сезонната метеорологична динамика. Най-проветриви и с ниски концентрации на радон са пещерите Магура, Ягодинска, Дяволско гърло (вж. и табл. 2). В други пещери морфологията предопределя микроклиматични зони с добра и слаба вентилация и съответно – с ниски и високи нива на радоново облъчване (Бисерна, Бачо Киро, Леденика). Морфологията е определяща и за сезонната динамика на вентилационните процеси и нахлуването в пещерите на външен въздух през студеното полугодие. Типичен пример е Съева дупка, в която през зимата концентрацията на радон по целия профил на пещерата е едва между 100 и 200 Bq.m<sup>-3</sup> (при 4-8 kBq.m<sup>-3</sup> през топлия сезон със «спряла вентилация»). При пещерата Бачо Киро ситуацията е по-сложна във връзка с преки въздействия на тектонска и сеизмична активност, предизвикващи резки колебания в концентрациите на радона – от порядъка на 2-3 kBq.m<sup>-3</sup> [24].

От публикуваните обобщени данни на А.А.Сигна [9] се вижда, че 90% от цитираните 303 туристически пещери по света са с концентрации на радон<sup>222</sup> между 3-10 kBq.m<sup>-3</sup>. Концентрации от този порядък имат и българските туристически пещери в Северна България (табл. 3). С пониски стойности са пещерите в Родопите.

### 4.2. Изчисляване на ефективни дози за пещерните екскурзоводи

Особено притеснително е, че високи концентрации на радон<sup>222</sup> са отчетени в едни от най-посещаваните туристически пещери: Венеца (до 6887 Bq.m<sup>3</sup>), Леденика (до 5765 Bq.m<sup>3</sup>), Бачо Киро (до 6136 Bq.m<sup>3</sup>), Съева дупка (до 8182 Bq.m<sup>3</sup>), Бисерна (до 5218 Bq.m<sup>3</sup>) (табл. 3). Провежданият мониторинг доказва потенциален радиационен риск за постоянно работещия в туристическите пещери персонал (пещерни екскурзоводи).

Според Раздел XIII (Контрол на облъчването от радон на работни места) в новоприетата Наредба за радиационна защита (14 февруари 2018 г.) [4], „за ограничаване на облъчването от радон се въвежда **референтно ниво 300 Bq.m<sup>-3</sup>** за средногодишната обемна активност на радон във въздуха на обособени работни места в закрити помещения, където е възможно повишено облъчване от радон” (чл. 94). Пещерите не са указани специално, но могат да се отнесат към тази категория. При надвишаване на тази норма, както е в повечето от изследваните туристически пещери, следващият член от Наредбата налага извършване на „оценка на индивидуалната ефективна доза на работниците в тези работни места” (чл. 95, ал. 1.).

Резултатите от продължителния мониторинг в туристическите пещери ни дават основание да изчислим ефективните дози на пещерните екскурзоводи, работещи в тях. Поради липсата на разработени методики за радиационен контрол в българските пещери, прилагаме опита от чешките туристически пещери. Реалната годишна ефективна доза  $E_a$  [mSv] за професионалния персонал (пещерни водачи) може да се изчисли, като се използва общото уравнение (3) съгласно ICRP Publication 115 [29] и препоръката на Чешката държавна служба за ядрена безопасност (Czech State Office for Nuclear Safety, SUJB, 2018) [20]:

$$E_a = j \cdot \frac{\int_{1 \text{ Jan}}^{31 \text{ Dec}} A_v(t) \cdot dt}{2 \cdot 10^6 \cdot \text{Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{hour}} \cdot 6 \text{ mSv} \quad (3)$$

където  $A_v(t)$  е средногодишната концентрация на радон в  $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ ; 6 mSv е референтната доза, като се приема общо работно време 2000 часа годишно;  $j$  е индивидуалният „пещерен фактор“, като се взема предвид делът на свободната фракция от краткоживеещи дъщерни продукти от разпада на радона, фиксирани върху аерозолни частици (<5 nm). Общата стойност на  $j$  е ~ 1,5, а при консервативен подход  $j = 2$  [18, 20, 27].

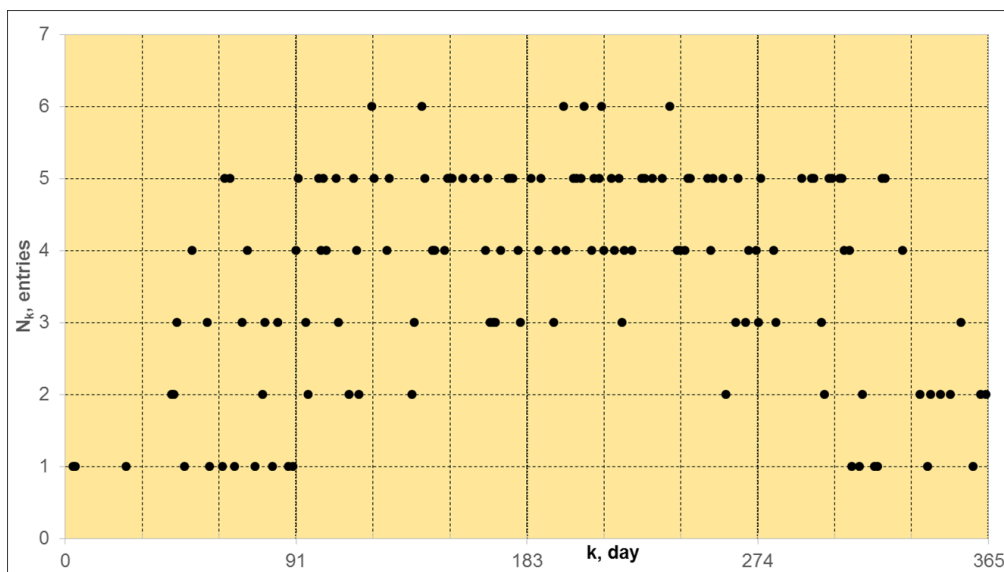
Формулата е приложена за определяне на потенциалните ефективни дози в изследваните туристически пещери и на тази база – за изчисляване на средногодишен безопасен престой в тях (табл. 2). Тези изчисления са добра основа за сравнение между пещерите от гл.т. на потенциалния риск от облъчване. Напр., в 6 от пещерите (Венеца, Леденика, Съева дупка, Бачо Киро, Орлова чука, Бисерна) са определени потенциални годишни ефективни дози, значително надвишаващи референтната от 6 mSv и изискващи намалено работно време за пещерните екскурзоводи. Но реалното време, което назначеният персонал прекарва в пещерите, придружавайки туристическите групи, е само част от средното работно време 8 часа/дневно. Освен това, през годината и в различните части на туристическите пещери концентрацията на радона е различна. Това налага прецизиране на изчисленията за персоналните ефективни дози на пещерните екскурзоводи, ако е достъпна конкретна и обективна информация за престоя им в пещерите според годишния работен график. Тогава реалната годишна ефективна доза  $E_a$  [mSv] може да се изчисли по модифицирани от (3) формули:

$$E_a = j \cdot \frac{\sum_{m=1}^{12} \overline{A_m} \cdot t_m}{2 \cdot 10^6 \cdot \text{Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{hour}} \cdot 6 \text{ mSv} \quad (3a)$$

$$E_a = j \cdot \frac{t_1 \sum_{k=1}^{365} A_k \cdot N_k}{2 \cdot 10^6 \cdot \text{Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{hour}} \cdot 6 \text{ mSv} \quad (3b)$$

В (3a) –  $A_m$  [ $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ ] е средна концентрация на Rn, а  $t_m$  [часове] общото време, прекарано от екскурзовода в пещерата за 1 месец.

В (3b) -  $A_k$  [ $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ ] е дневната концентрация на Rn,  $N_k$  е броят влизания за ден  $k$ . В този случай като пример е използвана пещерата Съева дупка, за която ни е предоставена необходимата конкретна информация за работния график на всеки екскурзовод и броя и продължителността на престоя му при всяко влизане (фиг. 3), в т.ч. в отделните зали с пунктове на мониторинг на радона.



**Фиг. 4.** Годишно разпределение (2017 г.) на влизанията с посетители на един екскурзовод в пещерата Саева дупка.

На базата на подадена информация, по формула (3а) е изчислена и реалната ефективна доза и на екскурзоводите в пещерите Венеца, Бачо Киро и Ухловица (табл. 3). За останалите туристически пещери не разполагаме с необходимия работен график.

**Таблица 3.** Изчислена реална годишна ефективна доза в някои от туристическите пещери според предоставената информация за годишното разпределение и продължителността на влизанията на пещерните водачи.

Пещера	Пункт на мониторинг	Консервативен подход: пещерен фактор $j = 2$ (mSv)	Оптимален подход: пещерен фактор $j = 1,5$ (mSv)
<b>Венеца</b>	Трета зала	11,6	4,8
	Пета зала	2,7	1,4
	по маршрута	3,2	1,4
	<b>Сумарно в пещерата</b>	<b>17,5</b>	<b>7,6</b>
	Офис	16,4	6,6
	<b>Общо: пещера + офис</b>	<b>33,9</b>	<b>14,2</b>
<b>Съева дупка</b>	Зала Космос	1,1	0,6
	Концертна зала	4,7	2,0
	Зала Купена	0,8	0,4
	<b>Сумарно в пещерата</b>	<b>6,5</b>	<b>3,0</b>
<b>Бачо Киро</b>	Приемна зала	2,1	1,2
	Зала Поп Харитон	0,7	0,4
	<b>Общо за Дълъг маршрут</b>	<b>2,8</b>	<b>1,6</b>
	Ритуална зала	0,3	0,2
	Концертна зала	0,2	0,1
	<b>Общо за Къс маршрут</b>	<b>0,5</b>	<b>0,3</b>
	<b>Сумарно в пещерата</b>	<b>3,3</b>	<b>1,9</b>



<b>Ухловица</b>	Синтров водопад с езера	2,5	1,7
	Долен етаж под Залата на пропастите	0,7	0,5
	по маршрута	0,4	0,3
	<b>Сумарно в пещерата</b>	<b>3,6</b>	<b>2,5</b>

Според прилагания работен график и продължителността на престой в 4-те туристически пещери, само във Венеца се установява много сериозен проблем с професионалното облъчване от радон на работещия в пещерата персонал. Реалните ефективни дози надвишават 3 до 5 пъти (съответно при оптимален и консервативен подход на изчисления) референтната стойност от 6 mSv. При това, облъчването е факт и в офиса на пещерата, който е построен на самия пещерен вход (фиг. 5). Друга причина е малкият брой екскурзоводи (2 до 3) въпреки големия посетителски интерес към пещерата. Това налага да се вземат спешни мерки от страна на кметството на община Димово, което е стопанин на Венеца, за да се приложат съответните изисквания за радиационна защита на професионално облъчвани лица. Според ал.2 на чл. 95 от Наредбата за радиационна защита (2018), *„когато индивидуалната ефективна доза на работници, дължаща се на облъчването от радон, надвишава 6 mSv за период от една година, се подхожда както при ситуация на планирано облъчване и работодателите предприемат подходящи мерки за радиационна защита, приложими за професионално облъчвани лица”* [4].

Независимо от много високите концентрации на радон и в пещерите Съева дупка и Бачо Киро, изчислените реални ефективни дози за техните екскурзоводи са под референтната стойност от 6 mSv. За пещерата Съева дупка, която се посещава целогодишно (50 000 туристи за 2019 г.) и има удължено лятно работно време (от 9:00 до 19:00 ч.), обяснението е в по-големия щатен брой екскурзоводи (5), чийто работен график (фиг. 4) им осигурява безопасен от гл.т. на облъчването от радон престой в пещерата. При пещерата Бачо Киро прилаганият работен график и режимът на посещенията (разходка без екскурзовод по Късия маршрут и почасово посещение по Дългия маршрут с групи само от над 15 посетители) също са причина за сравнително ниските реални ефективни дози на пещерните екскурзоводи.

Предвид високите потенциални ефективни дози, изчислени и за пещерите Орлова чука, Леденика, Бисерна, Лепеница (табл. 2), е препоръчително да бъде извършена *„оценка на индивидуалната ефективна доза на работещите в тези работни места”* на базата на реалното време, прекарвано от тях в пещерите.

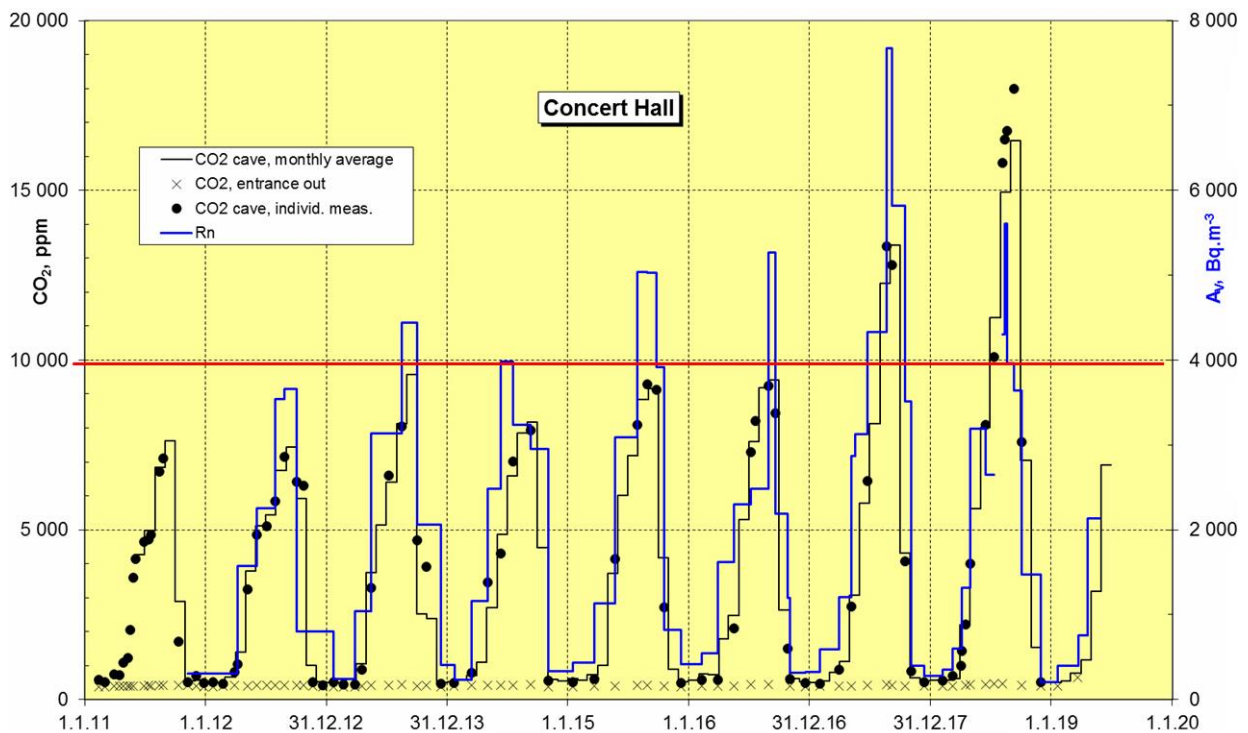


Фиг. 5. Офисът на пещерата Венеца

### 5. Изводи

Резултатите от мониторинга на радона, осъществяван чрез научната мрежа **BGSpeleo-RadNet** доказват, че в туристическите пещери в България съществува или сезонно се проявява облъчване на ниво, което застрашава здравето на пещерните екскурзоводи. Това облъчване се проявява по целия туристически маршрут в пещерите, или в части от него съобразно спецификата на пещерната морфология.

Проблемът с работната среда в туристическите пещери трябва да се разглежда в много по-широк аспект. Освен установените високи ефективни дози за радона, условията на работа в пещерите, особено през най-активния туристически период – летният, се утежняват и от високите концентрации на  $\text{CO}_2$  в пещерния въздух (фиг. 6), неговата много висока влажност (над 95-98%) и бързите и резки температурни промени при влизане и излизане от пещерите (в разгара на лятото температурните разлики достигат до 25-30°C). Тези промени са стресови за човешкото тяло и се отразяват като физиологичен дискомфорт, а при хора със здравословни проблеми се проявяват и по-сериозни оплаквания. Въпреки това, стопанисващите и управляващите туристическите пещери не извършват контрол/мониторинг върху параметрите на пещерната среда. Това, от една страна, е безотговорно отношение към здравето на персонала, обслужващ пещерите, но от друга страна е много удобно за „бизнеса“ с пещерен туризъм - нормативно нерегламентираната работна среда позволява поддържането на намален щат на пещерния персонал, несъобразен със спецификата на пещерната среда работен график и ниско заплащане труда на пещерните екскурзоводи [26].



**Фиг. 6.** Концентрации на  $\text{CO}_2$  и радон-222 в Съева дупка (Концертна зала) за периода 2011-2019 г.

*(червената линия маркира пределно допустимата в Чешката република норма за  $\text{CO}_2$  в пещерния въздух, над която посещенията се спират)*

Тъй като здравето на хората винаги е приоритет, са необходими спешни и адекватни мерки. Те трябва да гарантират безопасността на работещите в туристическите пещери екскурзоводи, които се отнасят към **категория А** от професионално облъчваните лица (чл. 63 от Наредба..., 2018) [4]. Това може да се постигне с **гъвкав посетителски режим** и **адекватен на условията на труд годишен работен график**. За целта, пещерната среда трябва да е подложена на строг контрол чрез непрекъснат мониторинг, вкл. инструментален. Предприемането и осъществяването на подобни мерки е свързано и с необходимостта от обосновани нормативни промени (вж. и раздел 2. от настоящата публикация). Съществуващите нормативни уредби не отчитат специфичните условия (вкл. вредните) на труд на пещерните екскурзоводи, както и завишения радиационен риск. До лятото на 2019 г. той не е обект на мониторинг и от страна на утормозените за целта институции. Така се създават предпоставки за риск от хронично увреждане здравето на персонала на туристическите пещери.

Установените високи концентрации на радона в някои от изследваните туристически пещери и потенциалният радиационен риск за обслужващия ги персонал са повод в периода 2015-2019 г. да бъдат подготвени и изпратени чрез НИГГГ-БАН официални експертни становища до институциите и местните власти (кметства на общини), стопанисващи и управляващи тези пещери: Кметство Димово (за пещера Венеца), БТС (за пещерите Съева дупка, Бачо Киро, Ягодинска, Снежанка, Ухловица), ОП „Спорт и туризъм” на община Враца (за пещера Леденика), Дирекция „Инспекция по труда”, Видин (за пещера Венеца), дирекция ПП „Шуменско плато” (за пещера Бисерна). В становищата, позоваващи се и на опита от чешките туристически пещери, са направени конкретни препоръки, както и предложение за работни срещи, на които да се обсъдят посетителските режими в пещерите и статута на обслужващия ги персонал, вкл. нормативното въвеждане на работно място „туристическа пещера”. На този етап

ответна реакция няма, а уторизираните институции все още се дистанцират от решаването на повдигнатите проблеми с туристическите пещери. Това беше един от поводите за организирането на международен научно-практически форум (ProKARSTerra`2019), в който темата за рисковете и условията на труд в туристическите пещери беше сред водещите (<http://prokarstterra.bas.bg/forum2019>).

\* \* \*

В резултат на проведените проучвания могат да се обобщят следните конкретни изводи:

- При оценката на индивидуалната ефективна радонова доза на работещите в пещерите трябва да се отчита сезонния ход на обемната активност на радона, неговата концентрация в различните части от туристическото трасе и конкретното време на престой на екскурзОВОДА съобразно годишния работен график;

- За прецизиране на реалните ефективни радонови дози е необходим точно определен индивидуален "пещерен фактор" ( $j$ ) за конкретната туристическа пещера. Това налага да се организират допълнителни специализирани инструментални измервания в туристическите пещери. При необходимост те могат да бъдат осъществени в партньорство с чешки колеги, разработили нормативите за подземните работни места в Чешката република [27];

- В българската нормативна уредба е необходимо да се въведе работно място „Туристическа пещера”, съобразено с всички фактори на специфичната пещерна среда, които се отразяват върху здравето на работещите в пещерите. При определянето на референтни норми за това работно място трябва нов подход, който да отчита ефекта от комбинираното въздействие на комплекса от рискови здравословни фактори на пещерната среда (радиационно облъчване, високи концентрации на CO<sub>2</sub>, резки температурни разлики между външната и пещерната среда, постоянно висока влажност с кондензационни процеси);

- Препоръчителен е постоянен, за предпочитане инструментален интегриран мониторинг на елементите на пещерната среда, които са рискови за здравето на работещите в нея. Той ще осигури данни и за обратното въздействие – на посетителите върху пещерната среда. Експерименталната лаборатория по карстология е разработила такъв модел за пещерата Бисерна (Speleo-MIKS Bisserna), който е представен на ПП «Шуменско плато» за внедряване [8, 37]. Подобен модел с изградена мрежа за инструментален мониторинг вече се реализира в пещерата Съева дупка;

- За туристическите пещери с особено висок радиационен риск за обслужващия ги персонал е възможно да се въведе и контролирано ползване на персонални дозиметри, които да отчитат реалната ефективна доза за всеки екскурзОВОД според осъществения от него престой в пещерата;

- Радиационен риск от високите концентрации на радон<sup>222</sup> има и за лицата, осъществяващи продължителен престой в други пещери, особено през топлия период на годината с най-висока активност на радона:

- археолози, извършващи продължителни разкопки в пещери, особено в техните вътрешни части с лоша вентилация;

- пещерняци, осъществяващи чести или продължителни пещерни експедиции (с пещерни лагери) в сложни пещерни системи;

- водачи за екстремн пещерен туризъм в „диви пещери” (обикновено сложни системи с лоша вентилация), които осъществяват многократни влизания;

- строителни работници и техници при продължителна работа в пещерна среда (за ремонти или благоустройство);

• С оглед общите професионални интереси към радиационната обстановка в българските пещери, на международния научно-практически форум ProKARSTerra`2019 [38]. Експерименталната лаборатория по карстология предложи активно сътрудничество със съответните институции – научни, държавни и местни, и най-вече с Националния център по радиобиология и радиационна защита на Министерството на здравеопазването. Координацията на усилията и изследователските резултати на различни специалисти са най-добрата основа за решаване на проблемите с радиационната защита в туристическите пещери.

### Благодарности

Мониторингът на радона в българските пещери се осъществява по два международни научно-изследователски проекта, финансирани от българския Фонд „Научни изследвания“: „Разработване на експериментален модел на комплексен мониторинг за устойчиво развитие и управление на защитени карстови територии“ (ProKARSTerra, № ДО 02.260/18.12.2008) и „Съвременни въздействия на глобалните промени върху еволюцията на карста (на базата на интегрирания мониторинг в моделни карстови геосистеми в България)“ (ProKARSTerra-GlobalChange, № ДН 14/10 от 20.12.2017). Проучванията са подпомогнати и чрез проектите „Radionuclide methods in experimental design of an integrated monitoring of karst geosystems“ (2011-2013) и „Application of radiocarbon dating in the research of karst systems“ (2014-2016) по двустранното академично сътрудничество между БАН и АН на Чешката република.

За оказваното съдействие при провеждания мониторинг на радона изказваме благодарност на екскурзоводите на туристическите пещери Съева дупка, Бачо Киро, Венеца, Ухловица, Леденика, Ягодинска пещера, както и на господата Христо Кичиков (Габрово), Иван Иванов (Две могили), Марин Николов (Шумен), Свилен Топчиев (Ракитово) и Стоян Кюркчиев (докторант на НИГГГ-БАН) за участието им в периодичната подмяна на детекторите в пещерите Бачо Киро, Орлова чука, Бисерна, Лепеница и Снежанка.

С тази статия отдаваме почит на нашия доброволен сътрудник Боре Борисов († 2019), екскурзовод в пещерата Венеца - вечна му памет!

### References:

1. Берон, П., Т. Даалиев, А. Жалов: *Пещери и спелеология в България*. София, БФСп., НПНМ-БАН, Фондация Ком`2009, 536 с.
2. Върбанов, П., В. Великов, Г. Василев: *Изследване на радиоактивността в пещерите в България*. Хигиена и здравеопазване, XVIII, 1975, 5, 491-495.
3. Димитрова, И.: *Измерване на  $^{222}\text{Rn}$  във въздушна и водна среда чрез абсорбция в поликарбонати*. Дисертация, СУ – Физ. фак., С., 2011.
4. *Наредба за радиационна защита* (приета с Постановление № 20 от 14 февруари 2018 г.): <https://zbut.eu/bulgarianlaw/naredba-za-radiatsionna-zashtita>
5. Попов, В.: *Пътешествие под земята*, София, „Наука и изкуство“, 1982, 152 с.
6. Попов, В.: *Благоустроените пещери в България*. София, „Медицина и физкултура“, 1987, 79 с.
7. Пресиянов, Д.: *Радиологични проблеми, свързани с радона и нови методи за тяхното изследване*. Автореферат на дисертация, СУ – Физ. фак., С., 2012, 56 с.
8. Стефанов, П.: *Моделът „Спелео-МИКС Бисерна“*. В: Сб. научни трудове от Втората международна научна конференция „Географски науки и образование“ (1-2 ноември 2013, Шумен). Унив. изд. „Еп. К. Преславски, Шумен, 34-48.
9. Signa A.A.: *Radon in Caves*. International Journal of Speleology, 34(1-2), pp.1-18.
10. Cohen, B. L.: *Radon daughter exposure to uranium miners*. Health Phys., 42 (1982) pp. 449-457

11. Cunningham, K. I. and Larock, E., J.: *Recognition of microclimate zones through radon mapping, Lechuguilla Cave, Carlsbad caverns national park, New Mexico*. Health Phys., 61 (1991) pp. 493-500
12. Durrani, S.A., Bull R.K.: *Solid State Nuclear Track Detectors*. Pergamon Press, Oxford, 1987.
13. Fernandez, P. L., Quindos, L. S., Soto, J. and Villar, E.: *Radiation exposure levels in Altamira Cave*. Health Phys., 46 (1984) pp. 445-447.
14. Kávási, N., Somlai, J., Szeiler, G., Szabó, B., Schafer, I. and Kovács, T.: *Estimation of effective doses to cavers based on radon measurements carried out in seven caves of the Bakony Mountains in Hungary*. Radiat. Meas., 45 (2010) pp. 1068-1071.
15. Lario, J. et al: *Radon continuous monitoring in Altamira Cave (northern Spain to assess user's annual effective dose)*. Journal of Environmental Radioactivity 80, 2005, 161–174.
16. Özen, S.A., Çevik, U. and Taşkin, H.: *Comparison of active and passive radon survey in cave atmosphere, and estimation of the radon exposed dose equivalents and gamma absorbed dose rates*. Isotopes in Environmental and Health Studies, published online 24 Dec 2018, <https://doi.org/10.1080/10256016.2018.1557163>
17. Paar, D. et al: *Physical Research in Croatia's Deepest Cave System: Lukina Jama-Trojama, Mt. Velebit*, Proc. of the 116th Int. Congr. of Speleology, Brno, Czech Republic, July 21–28, 2013, Vol. 2, pp. 442-446, Eds. M.Filippi & P.Bosak.
18. *Recommendation "Stanovování osobních dávek pracovníků na pracovištích s možným zvýšeným ozářením z radonu*. DR-RO-5.2(Rev. 0.0). In Czech, SUJB, Prague, Feb 2018.
19. Sainz, C. et al : *Analysis of the main factors affecting the evaluation of the radon dose in workplaces: The case of tourist caves*. Journal of Hazardous Materials 145, 2007, 368–371.
20. State Office for Nuclear Safety (SUJB): *Methodology for measurement on workplaces with high level of natural irradiation and effective dose assessment*. Internal methodology. 2007.
21. Ševc, J., Kunz, E. and Plaček, V.: *Lung-cancer in uranium miners and long-term exposure to radon daughter products*. Health Phys., 30, 1976, pp. 433-437.
22. Stefanov, P., K. Turek, I. Svetlik. *First results of experimental Radiological monitoring in the cave Biserna (Natural park "Shumen Plateau", Bulgaria)*. In: Collection research papers of the Second International Conference "Geography and Education", 1-2 November 2014, Shumen, University Ed. House "Ep. K.Presslavski", Shumen, 2013, pp. 26-33.
23. Stefanov P., K. Turek, I. Svetlik, M. Guelev: *Experimental radiological monitoring in the Saeva dupka cave (Bulgaria)*. In: Proceedings "30 years Department of Geography in "St. Cyril and St. Methodius" University of Veliko Tarnovo". IVIS Publishing House, 2014, pp. 73-81.
24. Stefanov, P., K. Turek, I. Svetlik, M. Briestensky: *Radon and fault displacements in Bacho Kiro cave (Bulgaria) related to closely situated earthquakes*. In: Proceeding papers of the 5<sup>th</sup> International Scientific conference "Geographical Sciences and Education" (November 4-5, 2016, Shumen University). University Press, Shumen, 2017, pp. 49-56.
25. Stefanova D., P. Stefanov: *Current state and problems of cave tourism in Bulgaria*. In: Traditions and Inovations in Contemporary Tourism, Cambridge Scholars Publishing, 2018, pp.170-189.
26. Stefanova D., P. Stefanov: *Administration and management of tourist caves in Bulgaria*. SocioBrains, 54, 2019, pp. 411-429.
27. Thinova, L. and Rovenska, K.: *Radon dose calculation methodology for underground workers in the Czech Republic*. Radiat. Prot. Dosim. 145(2-3), 2011, 233-237.
28. Tommasino, L.: *Electrochemical etching of damaged track detectors by HV-pulse and sinusoidal wave form*. Report Lab. Dosimetrica e Standardizzazione CNEN, Casaccia, Rome, 1970.

29. Tirmarche M., J.D. Harrison, D. Laurier, F. Paquet, E. Blanchardon, J.W. Marsh : *Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon*. ICRP Publication 115, Ann. ICRP 40(1), 2010.
30. Turek, K., Stefanov, P., Světlík, I.: *Radon in caves: trial measurements in Bulgaria*. In: International scientific-practical conference, Protected Karst Territories - Monitoring and Management“, 16-20 Sept 2012, Shumen, Bulgaria, Book of Abstracts, pp. 77-78.
31. Turek, K., P. Stefanov, I. Svetlik, H. Orcikova, P. Simek, T. Kořínková: *Radon and CO<sub>2</sub> concentration screening in Bulgarian caves*. International Journal of Geoheritage, Darswin Publishing House, 2015, 3(2), pp. 14-23. <http://www.darswin.com/dw/Journals/ijg/Volume-4.htm>
32. UNSCEAR: *Sources and Effects of Ionizing Radiation*. 2000 Report to the General Assembly. UN Publications, 2000, New York.
33. Vaupotič, J., Csige, I., Radolić, V., Hunyadi, I., Planinić, J. and Kobal, I.: *Methodology of radon monitoring and dose estimates in Postojna Cave, Slovenia*. Health Phys., 80 (2001) pp. 142-147.

URL:

34. <http://www.prokarstterra.bas.bg/lab/bg-karst.html>
35. <http://www.prokarstterra.bas.bg/lab/methodology.html>
36. <http://www.prokarstterra.bas.bg/lab/sci-networks.html>
37. <http://www.prokarstterra.bas.bg/lab/base.html>
38. <http://prokarstterra.bas.bg/forum2019>

Таблица 1. Туристически пещери в България (с назначен обслужващ персонал и регламентирани входна такса и работно време)

Пещера (сумарна дължина / денивелацията от входа, м)	Местоположение (н.в. на входа/овете, м)	Година на отваряне (дължина на тур. маршрут, м)	Категория на субекта на управление	Субект на стопанисване	Категория на защита <sup>3</sup>	Режим на достъп
<b>Съева дупка</b> <sup>1</sup> (210 / +3, -17)	с. Брестница, общ. Ябланица (500)	1967-1995; 2003 (190)	<b>Юридическо лице с нестопанска цел:</b> 1. Сдружение БТС	БТС	ПЗ - 10.10.1962	Целогодишен
<b>Бачо Киро</b> <sup>1</sup> (3600 / +65)	гр. Дряново (355)	1937 (700 или 350)		ТД „Бачо Киро”, Дряново	ПЗ - 10.10.1962	Целогодишен
<b>Снежанка</b> <sup>1</sup> (230 м / -18)	гр. Пещера (880)	1966 (145)		ТД „Купена” - Пещера	ПЗ - 14.03.1961	Целогодишен
<b>Ягодинска пещера</b> <sup>1</sup> (8501 / +36)	с. Ягодина, общ. Борино (940, 947, 980)	1982 (1100)		ТД „Родопея”, с. Ягодина	Попада в ПЗ „Буйновско ждрело“	Целогодишен
<b>Дяволско гърло</b> <sup>1</sup> (548 / -89)	с. Триград, общ. Девин (1150)	1977 (270)		ТД „Орфей 1970”, Девин и БТС	Попада в ЗМ „Триградско ждрело“	Целогодишен
<b>Ухловица</b> <sup>1</sup> (460 / -25)	с. Могилица, общ. Смолян (1040)	1983 (330)		ТД "Карлък", Смолян	ПЗ - 04.05.1979	Целогодишен
<b>Лепеница</b> <sup>2</sup> (ок. 2000 / +10)	гр. Ракитово (975)	2010 (200, 420 или 600)	2. Сдружение Сюткя, Ракитово	Сдружение с обществено полезна дейност Сюткя	ПЗ – 10.10.1962 г.	От 01.04. до 30.11.
<b>Магура</b> <sup>1</sup> (2608 / -56)	гр. Белоградчик (371)	1961 (800)	<b>Органи на изпълнителната власт</b> 1. Общинска администрация	Община Белоградчик (2012)	ПЗ - 03.05.1960	Целогодишен
<b>Леденика</b> <sup>1</sup> (320 / +16, -21)	гр. Враца (830)	1961 (300)		Община Враца (от 06.03.2010 г.)	ПЗ - 28.11.1960	Целогодишен
<b>Орлова чука</b> <sup>1</sup> (13437 / +33, -12)	с. Пепелина, общ. Две Могили (170)	1942, 1965, 2008 (дн. ок. 300)		Община Две Могили (от 2008 г.)	ПЗ - 10.10.1962	От 01.04. до 31.10.
<b>Венеца</b> <sup>1</sup> (220 / -28)	с. Орешец, общ. Димово (390)	2015 (200)		Община Димово (от 2015 г.)	ПЗ - 21.04.1971	Целогодишен
<b>Бисерна</b> <sup>1</sup> (2716 / +19,5)	гр. Шумен (404 и 411)	2019 (780)	2. Администрация на защитена територия	ДПП „Шуменско плато” (от 2014 г.)	Попада в ПП „Шуменско плато”	От 08.04. до 20.05. и от 02.09. до 31.10.

<sup>1</sup> Благоустроена електрифицирана пещера.

<sup>2</sup> Обезопасена, но неелектрифицирана пещера.

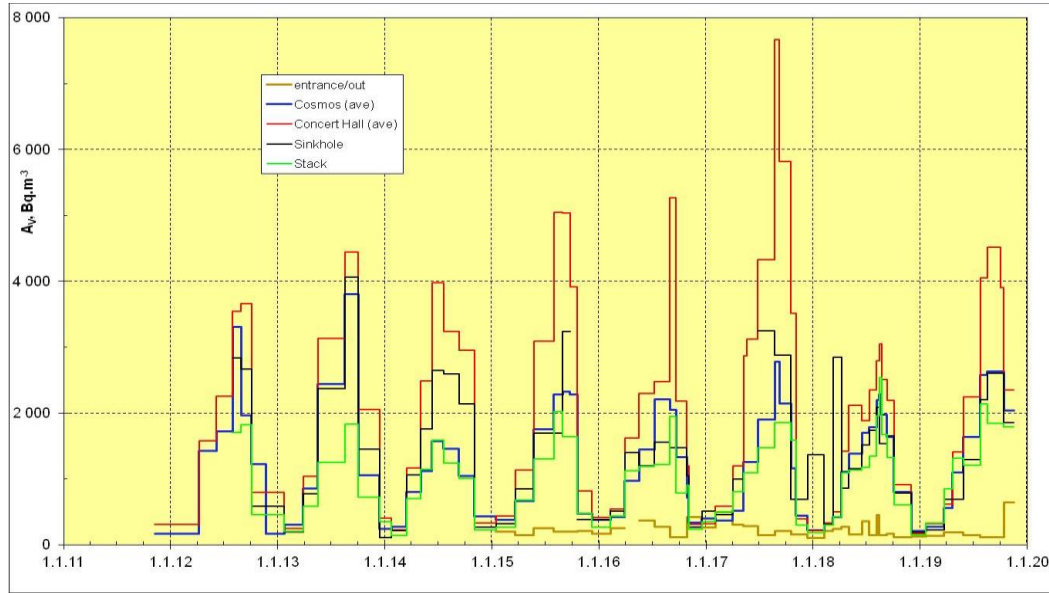
<sup>3</sup> Категории защитени територии: ПЗ - Природна забележителност, ЗМ - Защитена местност, ПП - Природен парк.



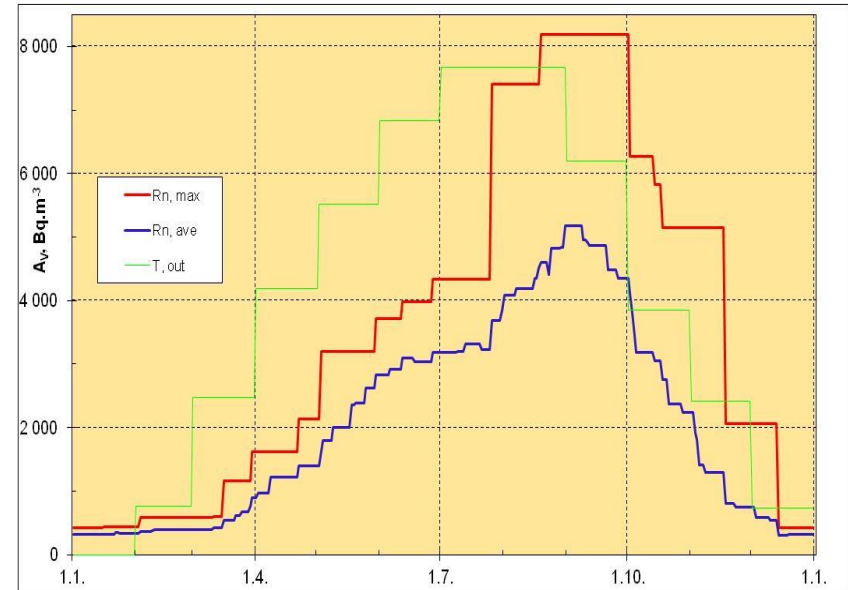
Таблица 2. Изчислена потенциална ефективна доза и средногодишна продължителност на безопасен престой в туристическите пещери

Туристическа пещера	Мониторинг Пункт	Време година	Концентрация		МАХ			СРЕДНО		
			най-ниска	най-висока	Ср. годишно	Ефективна доза	Работно време	Ср. годишно	Ефективна доза	Работно време
			Bq.m <sup>-3</sup>	Bq.m <sup>-3</sup>	Bq.m <sup>-3</sup>	mSv	часове	Bq.m <sup>-3</sup>	mSv	часове
<b>Орлова чука</b>	Точка 27	4,5	507	1 939	1 682	10,1	1 189	1 247	7,5	1 604
	Точка 51	2,3	927	3 224	2 534	15,2	789	1 805	10,8	1 108
	Големите сипеи	2,1	738	3 012	2 258	13,5	886	1 716	10,3	1 165
<b>Бисерна</b>	Кактус	5,9	130	1 971	1 067	6,4	1 874	680	4,1	2 943
	Голяма зала - горе	6,1	932	5 218	2 867	17,2	698	1 916	11,5	1 044
	Голяма зала - долу	3,9	748	3 839	2 193	13,2	912	1 518	9,1	1 318
<b>Магура</b>	Гал. на рисунките	3,4	397	982	916	5,5	2 183	767	4,6	2 607
	Спелео-санаториум	2,7	423	687	666	4,0	3 002	569	3,4	3 515
<b>Венеца</b>	Трета зала	3,4	145	6 887	4 360	26,2	459	2 343	14,1	854
	Пета зала	3,4	202	4 161	2 362	14,2	847	1 608	9,6	1 244
	Офис	2,9	124	3 472	2 235	13,4	895	1 199	7,2	1 668
<b>Леденика</b>	Концертна зала	4,8	167	2 559	1 383	8,3	1 446	772	4,6	2 591
	7-мо небе	5,6	264	5 783	3 822	22,9	523	2 432	14,6	822
	Синтрово езеро	3,9	163	2 591	999	6,0	2 001	648	3,9	3 088
<b>Съева дупка</b>	Космос	7,9	167	3 807	1 849	11,1	1 082	1 119	6,7	1 788
	Концертна зала	8,0	206	8 182	3 541	21,2	565	2 067	12,4	968
	Срутището	7,1	112	4 061	2 280	13,7	877	1 287	7,7	1 554
	Зала Кулена	7,3	144	2 544	1 261	7,6	1 586	886	5,3	2 258
	Отвън	4,7	110	641	371	2,2	5 387	220	1,3	9 096
<b>Бачо Киро</b>	Приемна зала	7,3	709	6 136	4 079	24,5	490	2 840	17,0	704
	Зала Поп Харитон	3,0	1 049	3 949	2 409	14,5	830	2 032	12,2	984
	Концертна зала	3,2	325	3 118	806	4,8	2 481	555	3,3	3 601
	Ритуална зала	2,9	168	1 677	975	5,9	2 050	782	4,7	2 557
<b>Лепеница</b>	Камина	5,1	626	2 943	2 439	14,6	820	1 510	9,1	1 324
	Коридор 600 м	5,1	579	4 280	2 628	15,8	761	1 555	9,3	1 286
<b>Снежанка</b>	Голяма зала	7,0	437	1 484	1 018	6,1	1 965	767	4,6	2 608
	Вълшебна зала	7,2	262	1 944	1 445	8,7	1 384	981	5,9	2 038
<b>Ягодинска пещера</b>	Речна галерия	6,1	437	1 853	1 405	8,4	1 423	827	5,0	2 417
	Срутището	6,1	560	1 961	1 561	9,4	1 282	940	5,6	2 127
<b>Ухловица</b>	Синтров водопад	5,3	306	2 112	1 149	6,9	1 741	799	4,8	2 505
	Под пропастите	5,1	102	1 909	1 062	6,4	1 884	733	4,4	2 727
<b>Дяволско гърло</b>	Точка 1	0,74	132	132	97	0,6	20 517			
	Точка 2	0,74	248	248	183	1,1	10 951			

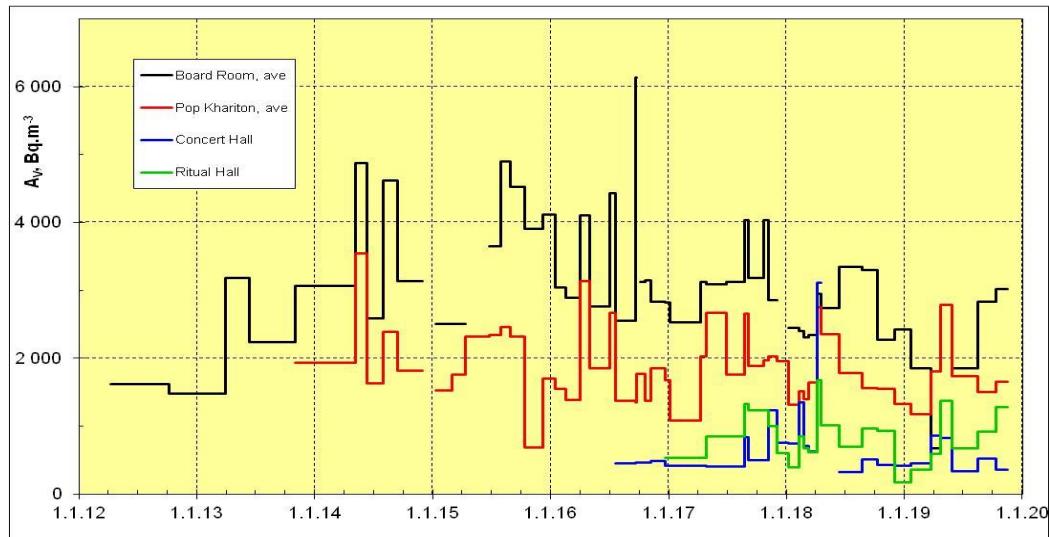
### Съева дупка



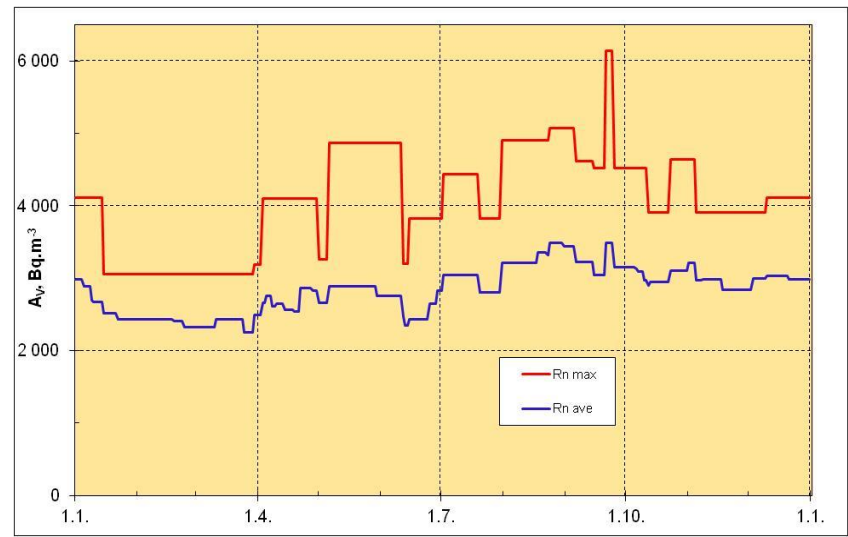
### Концертна зала



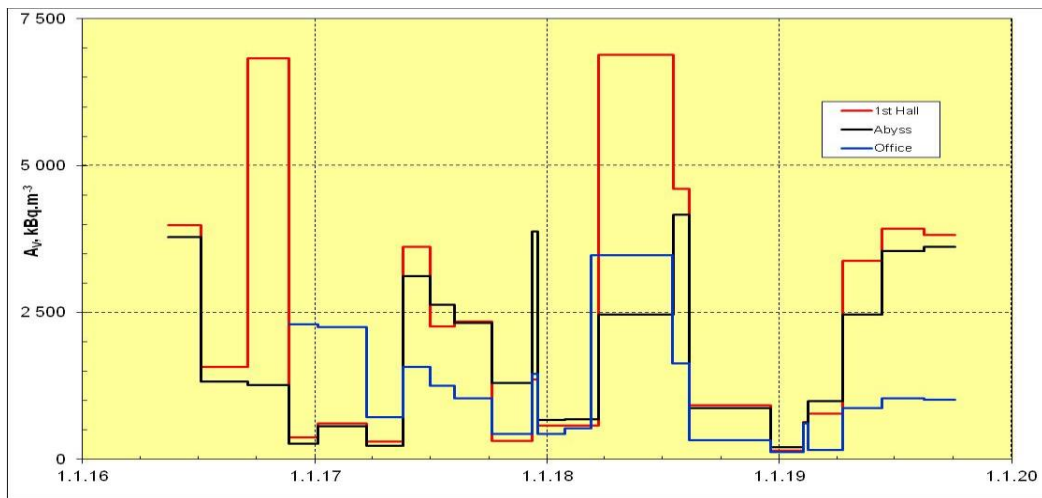
### Бачо Киро



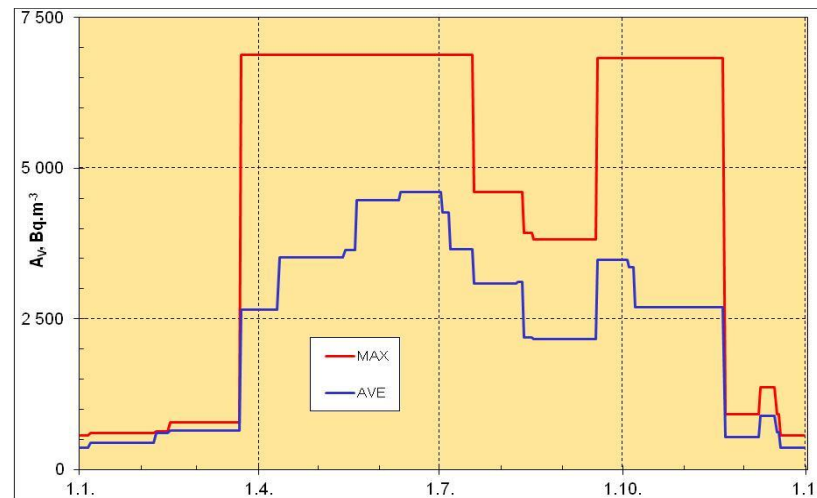
### Приемна зала



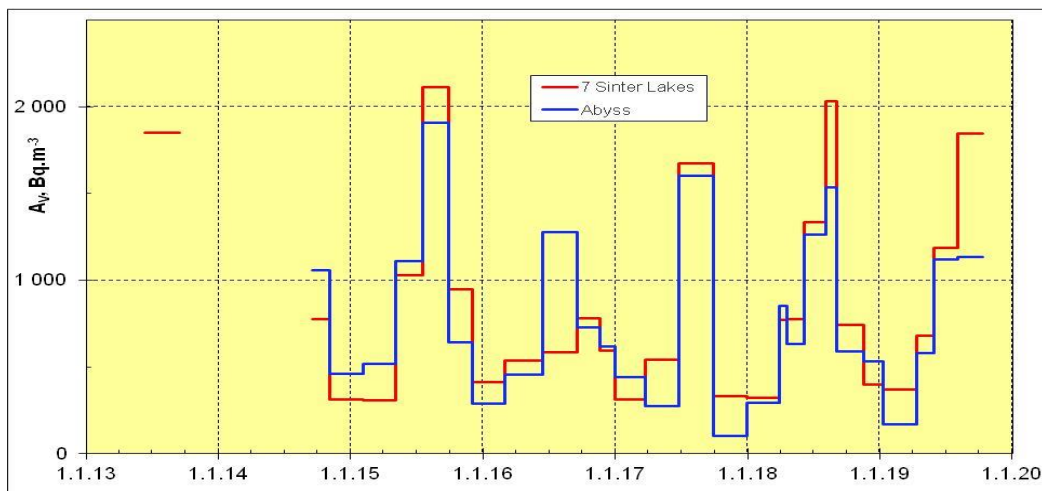
Венеца



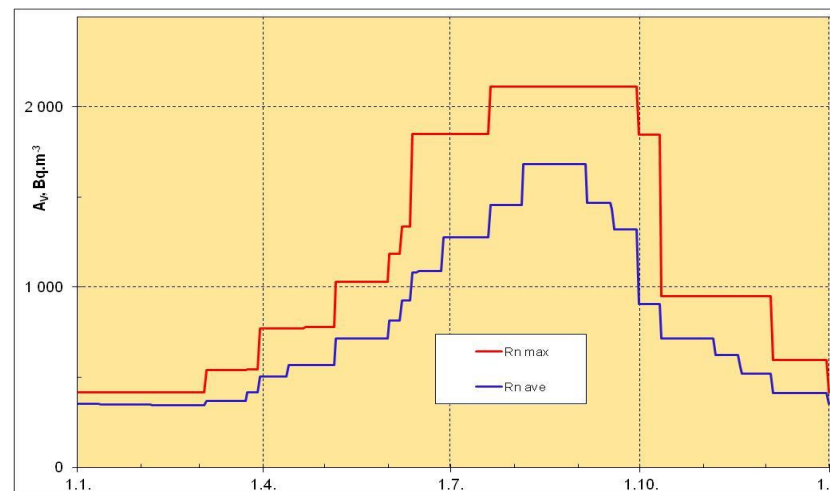
Трета зала



Ухловица



Синтров водопад с езера



**Фиг. 3.** Концентрация на радона в избрани туристически пещери за периода 2011-2019 г. (вляво) и средно годишни нива (максимални и средни) в представителни пунктове за същия период (вдясно).