



Софийски университет “Св. Климент Охридски”
Физически факултет

АВТОРЕФЕРАТ

на

дисертация за придобиване на образователната и научна
степен доктор

Научна специалност: 01.03.04 Ядрена физика

Димитър Петков Димитров

Облъчване от радон на професионални групи ангажирани в
добивната промишленост

Научен ръководител: проф.дфз Добромир Пресиянов

София

2020

СЪДЪРЖАНИЕ

1. Увод. Радонов проблем. Връзката облъчване от радон – риск.....	1
2. Структура на дисертацията.....	5
3. Принцип на CD/DVD метода за измерване на радон и торон.....	7
4. Пилотни кумулативни изследвания в подземни обекти на радон ^{222}Rn и торон ^{220}Rn	11
4.1. Пилотни измервания на радон и торон в пещери.....	11
4.2. Пилотни кумулативни изследвания на радон ^{222}Rn и торон ^{220}Rn в мини.....	12
4.3. Сравнителни измервания с дифузионна камера.....	15
4.4. Влияние на тънък воден слой върху повърхността на CD/DVD детектори	18
4.5. Изводи от проведените изследвания в подземни обекти.....	21
5. Използване на CD/DVD метода за изследване на пространствени или времеви изменения на нивото на радон.....	22
5.1 Влияние на реконструкцията на жилища върху нивата на радон в тях.....	22
5.2. Диагностика на вентилацията на подземна мина и идентифициране на източници на замърсяване с радон / торон	27
6. Пасивен детектор за радон с чувствителност в ограничен времеви прозорец.....	30

6.1. Концепция и моделиране.....	31
6.2. Експериментални резултати и обсъждане.....	38
7. Заключение и приноси на дисертацията.....	43
Публикации с участието на автора, включени в дисертацията.....	46
Библиография.....	48

1. Увод. Радонов проблем.

Връзката облъчване от радон – риск

През 2009 г. Световната здравна организация посочи радона (^{222}Rn) като втори по значимост причинител на белодробен рак след тютюнопушенето, а за непушачите той е на първо място. Преобладава мнението, че няма безопасен праг на радоново ниво под който той не представлява риск за здравето [1,2]. Установена е корелация между нивата на радон в сгради и честотата на белодробен рак на база на преки епидемиологични проучвания за населението [1]. Облъчването на дихателната система се формира главно не от ^{222}Rn , а от дъщерните му продукти (ДПР). Това са ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi и ^{214}Po , който поради късия си период на полуразпад винаги е в равновесие с ^{214}Bi .

Всяка година от рак на белите дробове в световен мащаб се разболяват около 1,8 милиона човека, като това е измежду онкологичните заболявания с най-лоша прогноза – повечето от заболелите умират в рамките на няколко години [1]. По данни на Световната здравна организация (СЗО) за 2014г. от 3% до 14% (около 230 000 човека) от заболяванията се дължат на радон [1]. Облъчването от радон формира около половината от ефективната доза, дължаща се на естествения радиационен фон. Тази ефективна доза човек получава предимно в закрити помещения.

Основните източници на радон в затворени помещения са [1]:

- Почвения газ, проникващ през основите на сградата;
- Десманацията на радон от вода;

- Екскхалация от строителни материали с повишено съдържание на ^{226}Ra ;
- Постъпление чрез атмосферен въздух от околната среда. Този източник е второстепенен, но може да стане съществен, ако в близост има обекти и съоръжения (минни обекти, тунели за магистрални тръби, сондажи и др.).

Епидемиологичните оценки за влиянието на радона се основават на проучването на две групи:

- 1) Подземни миньори;
- 2) Населението.

Изводите, получени от изследванията при миньорите, не могат да се екстраполират директно върху населението. Двете групи се различават по възраст, пол, работна среда.

Оценки на риска до сега можеха да се правят само за професионални групи, за които има събрана информация за работната среда. При гражданското население такава информация липсва. Извършване на епидемиологични изследвания сред населението чрез различните подходи са разгледани в [1,2,3,4]. При такива изследвания за да бъде определено облъчването от радон за всеки човек, основно приложение намират твърдотелните детектори на следи (SSNTD - от англ. Solid State Nuclear Track Detector) или както се наричат още „трекови детектори“.

Латентният период за развитие на белодробен рак е от пет, до десетки години. Следователно връзката между риска от неговото развитие трябва да се търси с облъчването, което е получил даден индивид през целия този период. Методите за извършване на такива

измервания на радоновото облъчване назад във времето се наричат ретроспективни. Такива методи са: методът на имплантираното в стъклото олово ^{210}Pb , методът на обемните уловки, методът на натрупаното в костите ^{210}Pb , методът на лещите от очилата [5-11]. Такъв метод за ретроспективно измерване е и CD/DVD метод, предложен през 2001г. [12].

Макар че миньорите са първата професионална група на която се правят регулярни наблюдения за облъчване от радон, до момента в мините остава неизяснена ролята на радиоактивния изотоп на радона, наречен торон (^{220}Rn) при формиране на ефективната доза и съответно за риска от развитие на рак на белите дробове. Този радиоактивен газ е от семейството на ^{232}Th (торий) и се получава при радиоактивното разпадане на ^{224}Ra . Неговият период на полуразпадане е 55,6 s. Този кратък период на полуразпадане не позволява на атомите да мигрират на големи разстояния от мястото им на есхалиране. Подобно на ^{222}Rn и тук облъчването се дължи на дъщерните продукти на разпада (ДПТ) (^{216}Po , ^{212}Pb , ^{212}Bi и $^{212}\text{Po}/^{208}\text{Tl}$). Ролята му при формиране на ефективната доза за населението и за професионални групи изложени на риск от торон подлежи на уточняване. В частност, до момента приносът на торона в облъчването на подземни миньори е слабо изучен и това е своеобразно „бяло поле“, заслужаващо целени изследвания.

Предизвикателствата, пред които се изправят методите и детекторите на радон и торон в средата на подземни рудници са:

- влажност (близка до 100%) водеща до образуване на конденз върху детекторите;

- висока запрашеност;
- взривни газове (обикновено азотни оксиди), които заедно с влагата образуват киселинна субстанция;
- взривни вълни, включително с разрушителна сила;
- любопитен или недобронамерен персонал, причиняващ загуба (повреда) на детектори;
- За да бъде съставена подробна карта на радоновите нива във въздуха на минните галерии и диагностика на ефективността на вентилацията точките, в които трябва да се проведат едновременни измервания са многобройни и разпределени по целия рудник.

Основна цел на дисертацията е да се изследват нови методи за кумулативни измервания на радон и торон, които да са надеждни за използване в условията на работна среда в подземни и надземни обекти от добивната промишленост. Съпътстваща цел е да се изследват възможностите които такива методи дават за диагностика на източници на замърсяване с радон в мини, както и за установяване на измененията на радон в миналото в сгради.

За постигането на тези цели в дисертацията са представени следните изследвания:

1. Изследване на приложимостта на CD/DVD метода за измерване на радон/торон в подземни изработки (минни галерии, пещери и др.). Това включва уточняване на влиянието на подземните условия върху показанията на тези детектори и сравнение с други методи;
2. Изследване на корелацията между нивата на радон и торон в подземни рудници;

3. Изследване на възможността чрез използване на два или повече CD/DVD диска, да се установят изменения в нивата на радон от пространствен и времеви характер. Оценка на възможността това да се използва за идентифициране на източници на замърсяване с радон на рудничния въздух в подземни изработки, а така също и за установяване на влиянието на реконструкция в сгради върху нивата на радон;
4. Изследване на възможността да се разработи радонов детектор с чувствителност само в определен времеви прозорец (работно време на персонала).

2. Структура на дисертацията

Дисертацията се състои от 7 глави, списък на публикациите по дисертацията, оформени с текст от 120 страници, включващи 40 фигури, 7 таблици и 4 приложения. Цитирани са 112 литературни източници, 7 на кирилица и 105 на латиница.

Глава 1 е уводна и представя проблема и целта на дисертацията.

Глава 2 предоставя обзор на радоновия проблем. Запознава с характерните източници на радон в затворени помещения и начинът по който той влияе върху здравето на хората. Запознава с трудностите при събиране на информация за формираното облъчване през годините при гражданското население. Запознава с различните методи за извършване на кумулативни измервания на

радон и посочва мястото на поликарбонатния (CD/DVD) метод за измерване на радон.

Глава 3 запознава с компакт дисковия метод за кумулативни измервания на радон и торон. Разгледан е неговия принцип и методиката за обработка. Представени са всички етапи от експерименталната обработка на дисковете и корекциите които трябва да се направят. Показано е как се отразява температурното влияние върху измерването чрез **a posteriori** температурна корекция.

Глава 4 запознава с провеждането на измервания на радон и торон в реални подземни условия. Показано е експериментално, че липсва влияние на конденз или намокряне върху натрупвания радонов сигнал в CD/DVD диск. Представени са първите резултати от комбинирани измервания на радон и торон. Показана е липсата на корелация между измерените средни нива на радон и торон в минните галерии.

Глава 5 запознава с използването на CD/DVD метода за изследване на пространствени или времеви изменения на нивото на радон. Запознава с възможността да бъде измерено влиянието на реконструкцията на жилища, извършени в миналото, върху нивото на радон в тях.

Друго приложение е извършване на диагностика на вентилацията на подземна мина и идентифициране на източници на замърсяване с радон и торон.

Глава 6 се спира на проблемите при измерване на средно годишната концентрация на ^{222}Rn на работните места. Представен е

детектор с чувствителност само в ограничен времеви прозорец, позволяващ оценка на облъчването само за реалното работно време.

Глава 7 обобщава изложеното в дисертацията и посочва приносите на дисертационния труд.

3. Принцип на CD/DVD метода за измерване на радон и торон

Значителна част от изследванията в дисертацията са свързани с т. нар. „компакт-дисков“ (CD/DVD) метод [12]. Методът използва високата абсорбираща способност за радон на поликарбонатния материал, от който са направени всички CD/DVD и неговите трекови свойства. Основното в метода е, че по плътността на следите от α – частици на една строго определена дълбочина под повърхността може да бъде определена интегрираната по време обемна активност на радон.

При CD/DVD метода поликарбонатният материал, от който са изработени дисковете е достатъчно здрав да издържи на взривните вълни, а дори и да претърпи механични счупвания, информацията в него може да бъде прочетена и анализирана успешно. Лабораторните експерименти са показали, че радоновият сигнал под 76 μm не се влияе от влага, прах и дим [13]. Освен това:

- Стойността на един детектор е ниска. Това е стойността на един CD/DVD диск;
- Единственият фактор, който оказва влияние върху показанията на CD/DVD метода е температурата. Тази

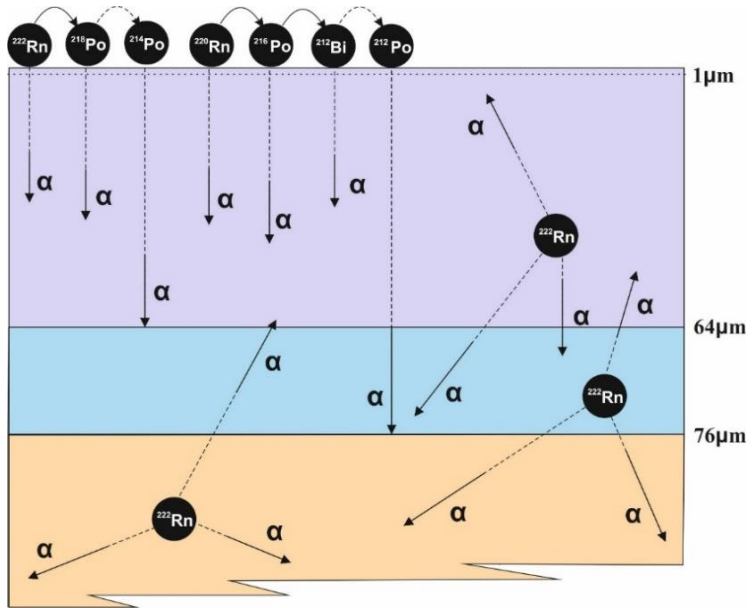
зависимост при подземните обекти може лесно да бъде отчетена. Факт е, че дори да се променя от едно работно място на друго, температурата на дадено работно място е относително постоянна.

Това показва, че CD/DVD дисковете имат потенциал да бъдат използвани за кумулативни измервания на радон и торон в подземни условия (мини и пещери).

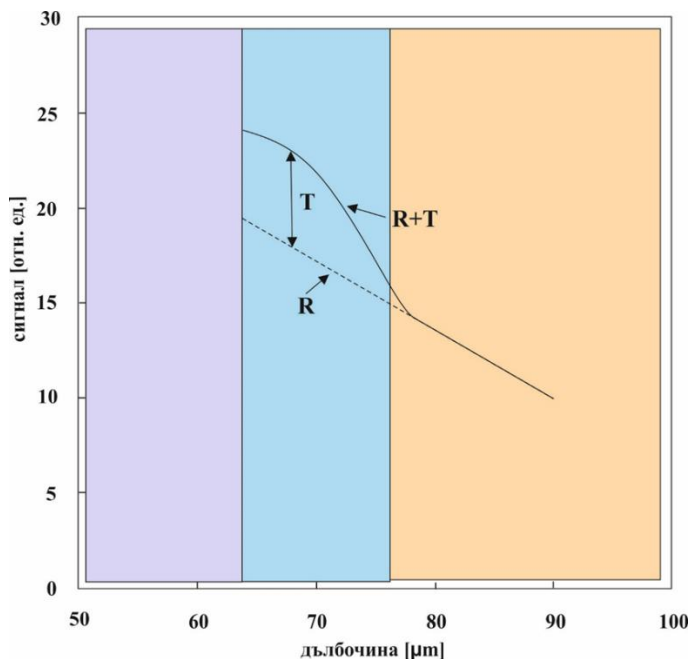
През 2011г. бе предложена версия на CD/DVD метода, позволяваща комбинирани кумулативни измервания на радон и торон [14]. По – нататък под сигнал разбираме чистата плътност на следите от α – частици след ецване на детектора: Това е броят следи на единица площ след изваждане на фона.

Основната идея на този вариант на метода е (фигура 1), че в CD/DVD на дълбочина $>76\mu\text{m}$, сигналът е създаден само от абсорбирания радон ^{222}Rn и неговите ДПР (R сигнал), Освен това имаме и интервал в дълбочината $64-76\mu\text{m}$, където сигналът е създаден от източник свързан с ^{220}Rn торон (T сигнал), а именно ^{212}Po (разпаден продукт на ^{220}Rn) и от абсорбирания ^{222}Rn , т.е. имаме R+T сигнал.

На фигура 2 е показана концепцията за R сигнала и за R+T сигнала, разположени в дълбочина на диска. Сигналът на дълбочина $>76\mu\text{m}$ се дължи само на радон ^{222}Rn (R сигнал). Втората дълбочина на обработка трябва да е в интервала $64 - 76\mu\text{m}$ (R + T сигнал). След като бъде определен R сигнала, с помощта на теоретичен модел [14-



Фигура 1. Максималните дълбочини в които могат да бъдат формирани α - частици на ^{222}Rn , ^{220}Rn и ДПП, намиращи се във въздуха близо до повърхността на диска или върху самата нея [16]. Следите между 64 μm и 76 μm се дължат на ^{212}Po намиращ се на повърхността на диска и на абсорбираните атоми на ^{222}Rn в обема на диска и на продуктите на неговото разпадане. Сигналят в дълбочина до 64 μm не е информативен, тъй като се влияе от повърхностни отлагания и дефекти. Сигналят под 76 μm е строго пропорционален на кумулативната обемна активност на ^{222}Rn [12] а чрез този в дълбочина 64-76 μm може да бъде определена кумулативната обемна активност на ^{220}Rn [14,15,16].



Фигура 2. Разпределение в дълбочина на сигнала в CD/DVD диск. R сигналът е свързан с абсорбирания ^{222}Rn , а T сигналът е свързан с ^{220}Rn . Дълбочината до 64 μm не се използва за измерване. В интервала 64-76μm сигналът е комбиниран (R+T), а сигналът при дълбочина >76μm е R и се дължи само на абсорбирания ^{222}Rn и неговите ДПР в диска [17].

[6] може да се определи радоновата компонента в участъка, където сигналът е комбиниран. Това се постига чрез ецване и изброяване на α - треквете на две различни дълбочини под повърхността на CD/DVD диска и анализиране на получения сигнал [14]. В дисертацията са описани процедурите за лабораторна обработка, калибриране, както и алгоритъма, по който по сигнала на две

дълбочини се определят средните обемни активности на радон и торон.

4. Пилотни кумулативни измервания на радон ^{222}Rn и торон ^{220}Rn в подземни обекти

4.1. Пилотни измервания на радон и торон в пещери

Пещерният свят е изключително разнообразен и интересен. Той се е превърнал в желана туристическа дестинация и кръгът от хора, желаещи да се запознаят с неговата красота от близо, все повече се увеличава. Не малко хора са превърнали подземните експедиции в своя професия. Но какъв въздух дишат всички те под земята? Отговор на този въпрос могат да дадат непосредствените измервания на нивата на радон и торон там.

През зимния период на 2013-2014 година бяха заложени 4 броя дискове Verbatim CD в пещера „Змеевица“, Софийска област. Те престояха там 7 месеца. Дисковете баха закрепени във въздуха с помощта на дървени пръчки, далече от стените. Разстоянията спрямо входа бяха съответно около 70 m, 100 m и 200 m. Един диск от тях беше запазен за да бъде измерен фона. През целия този период той беше съхраняван на открито и сухо място.

Резултатите от измерването са показани на таблица 1.

Докато в минните галерии има задължителна вентилация, в пещерите по правило съществува само естествена вентилация, която

зависи от много условия и в общия случай е недостатъчна за снижаване на радоновото ниво. От таблицата в която са представени

Таблица 1. Резултати от измервания на ^{222}Rn и ^{220}Rn в пещера „Змевица“, Софийска област.

Разстояние от входа [m]	$C_A [Bq m^{-3}]$ ^{222}Rn	$C_A [Bq m^{-3}]$ ^{220}Rn
70m	973±204	118±25
100m	1556±318	140±30
200m	1757±357	92±38

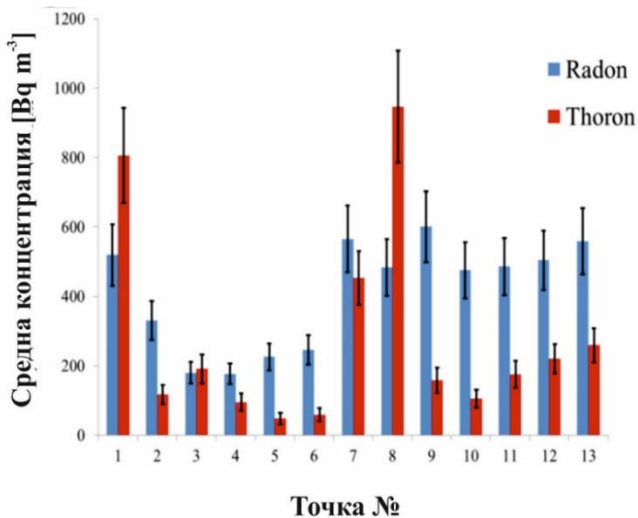
резултатите от измерването, ясно се вижда увеличението на концентрацията на радон във въздуха в зависимост от разстоянието до входа на пещерата. Радоновото ниво бързо нараства и надхвърля референтното (300 Bq m^{-3} , съгласно [27]). Тороновият сигнал в този случай е сравнително нисък.

4.2 Пилотни кумулативни изследвания на радон ^{222}Rn и торон ^{220}Rn в мини

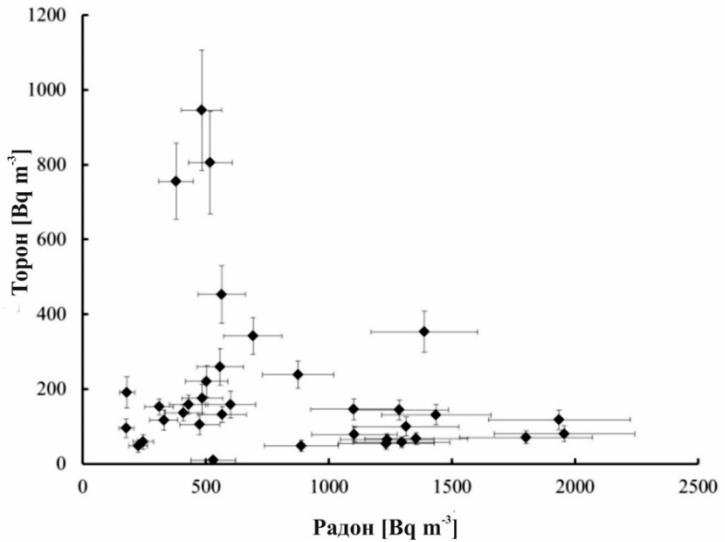
В рамките на първото такова изследване 13 CD-та бяха поставени на различни работни места в полиметална мина в България, където престояха 4 месеца. Дискете бяха закачени в горния край на галериите на разстояние, по-голямо от 10 cm от

стените ѝ. Калибровъчният коефициент, използван за пресмятане на средната торонова активност, беше същият установен в [19]. Резултатите от измерването на средната радонова и торонова концентрация са показани на фигура 3.

При друго изследване бяха проведени по-голям брой измервания, за да се изясни дали има корелация между нивата на радон и торон. В рамките на това изследване бяха проведени паралелни измервания на ^{222}Rn и ^{220}Rn в 35 точки на действаща полиметална мина. Единственото условие беше детекторите да са без конденз, за да е валидно тороновото измерване. Резултатите са показани на фигура 4.



Фигура 3. Средна концентрация на ^{222}Rn и ^{220}Rn концентрация (в Bq m^{-3}), измерена чрез CD-та, престояли 4 месеца на работни места в полиметална мина [19].



Фигура 4. Липса на корелация между измерените средни нива на ^{222}Rn и ^{220}Rn [20].

Липсата на изразена корелация е очевидна. Поради това може да се направи извода, че за нивото на торон не може, дори грубо, да се съди по нивото на радон и обратно. Трябва да се оценяват нивата и на двата изотопа. Аналогичен извод, отнасящ се за липсата на корелация между ^{222}Rn и ^{220}Rn в сгради е направен от други автори [21].

4.3. Сравнителни измервания с дифузионна камера

В рамките на такова сравнение бяха направени паралелни измервания с дифузионни камери, които са широко използвани в радиационния мониторинг на сгради и работни места.

Ние подготвихме дифузионни камери с метален корпус, който се отличава с по-голяма здравина. Това е съществено предимство, като се имат в предвид взривните вълни в минната галерия. Дифузионната камера представлява метална цилиндрична кутия с диаметър 75 mm и височина 80 mm, на чийто капак (от вътрешната страна) е закрепен детектор Kodak Pathe LR-115/II, обърнат с регистриращата си повърхност към вътрешността на камерата фигура 5.



Фигура 5.

Метална дифузионна камера:

1 Вътрешен обем на камерата.

2. Метален капак.

3 Kodak Pathe LR-115/II

Двата детектора, CD и дифузионната камера бяха поставени близо един до друг и бяха позиционирани в различни точки на минните галерии в продължение на 4 месеца (фигура 6).

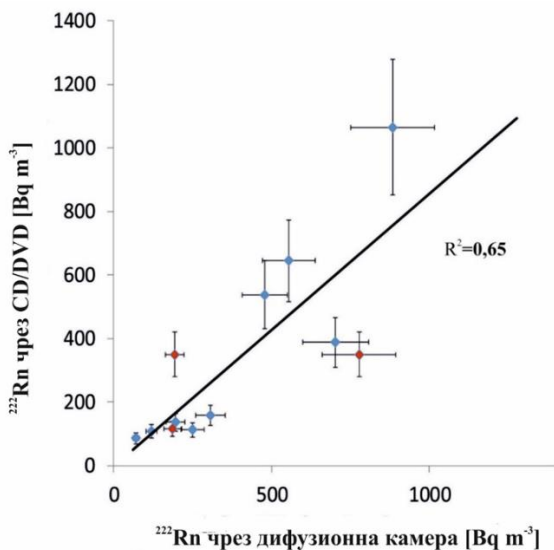


Фигура 6. Позициониране на дифузионна камера и CD/DVD диск в минна галерия.

Част от тези точки са така наречените „контролни точки“, в които постоянно се измерват скоростта, влажността и температурата на

въздушния поток в минната галерия. Напречното сечението на галерията в тази точка също е известно така че може да се определи скоростта на пренос на въздушния поток. През този период няколко дифузни камери бяха повредени, като бе нарушена целостта на камерата. Обикновено това е ставало от взривните вълни в минните галерии. Други камери се оказваха пълни с вода, която трудно може да се определи дали е от конденз или е от течаща руднична вода. Това проваляше измерването с дифузионна камера в тези точки и показва съществени проблеми при използването на този вид детектори в подземна среда. Камерите с вода и кондез в тях бяха изключени от сравнението. Нямаше безвъзвратни загуби на дискове. Имаше такива с нарушена цялост, но те имаха достатъчно запазена повърхност, от която след обработка се извличаше информацията за облъчването им. При CD/DVD декторите няхахме загуба на информация и тя беше анализирана.

Както се вижда от фигура 7, налице е добра корелация между дифузионните камери и DVD.



Фигура 7. Корелация между средното ниво на ^{222}Rn измерено чрез дифузионна камера и DVD.

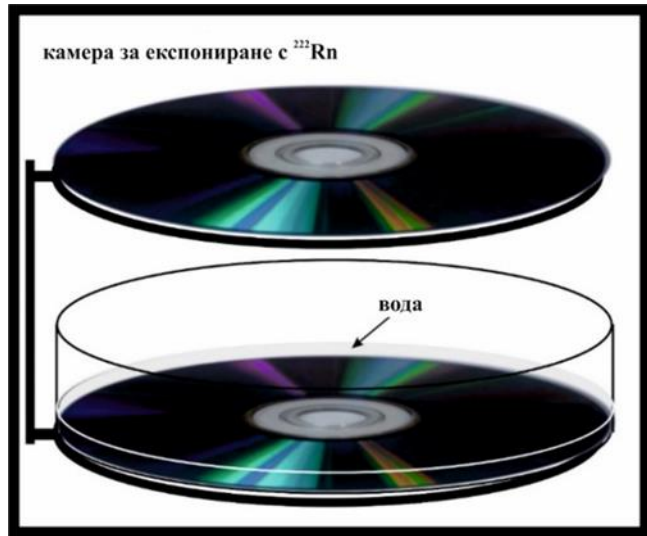
4.4 Влияние на тънък воден слой върху повърхността на CD/DVD детектори

Високата влажност (включително до 100%) е обичайно явление за минните галерии и пещерите. Поради това образуването на конденз върху детекторите е често срещано в някои точки на измерване. Освен това, особено в минни изработки е възможно намокряне на детекторите поради течащи или пръскащи води. В някои случаи е възможно цялата повърхност да е мокра - тънък воден филм или капки върху нея.

За пръв път в рамките на настоящата дисертация бе изследвано влиянието на тънък воден слой върху повърхността на диска върху сигнала за радон.

Изследването бе експериментално, като бяха подготвени два диска от един и същи тип, от една партида. Единият от тях беше поставен свободен, а другият беше поставен в съд на Петри с дестилирана вода така, че абсорбиращата повърхност да е нагоре и да се намира на около 2 mm под повърхността на водата. Слойт 2 mm е много по – малък от дължината на дифузия на ^{222}Rn във вода (22 mm [22]) и същевременно значително по – голям от дебелината на водния филм върху намокрени дискове в подземни условия.

Двата диска бяха поставени в радонов бокс при определена радонова концентрация (фигура 8). След облъчването им с ^{222}Rn , двата диска бяха ецвани за радон и бяха отчетени статистически неразличими сигнала. Сухият имаше плътност на трековете $403 \pm 8 [ct^{-2}]$, а потопеният във вода имаше $392 \pm 8 [ct^{-2}]$, като разликата не е значима и е в рамките на неопределеността. Този резултат може лесно да бъде обяснен. Дифузната дължина на радон във вода е около 22mm [22], което е много в сравнение с дебелината на водния слой над абсорбиращата повърхност на диска. Поради това разпределението на радон над тази повърхност може да се приеме за хомогенно. Радоновата концентрация във вода при стайна температура и нормално налягане е около 25% от тази във въздуха при същите външни условия. Разтворимостта на радон в поликарбоната от водна среда е 4 пъти по-голяма, отколкото от



Фигура 8. Проверка на абсорбиращите свойства на CD/DVD под тънък слой от вода.

въздушна среда [18]. В резултат на това, концентрацията на радон в поликарбоната ще е същата каквато е и при експозиция във въздух. Този факт е забелязан и от други автори [23]. Всичко това добавя едно ново предимство при измерване на радон със CD/DVD детектори. Тяхното показание не зависи от наличието на тънък филм влага/вода върху повърхността на диска.

При измерването на торон обаче наличието на конденз променя повърхностните условия за формиране на торонов сигнал и прави измерването невалидно. Следователно чрез CD/DVD метода може да се измерва торон само на места, където влажността не е достатъчна да се образува конденз.

4.5 Изводи от проведените изследвания в подземни обекти

Измерването на концентрацията на радон и торон в условията на подземни рудници и пещери с използването на CD/DVD е възможно и предлага удобен метод за контрол на радон и торон в минната атмосфера.

Резултатите от сравняването на измервания (на ^{222}Rn) с дифузионни камери показва добро съвпадение. Дискове CD/DVD могат да бъдат използвани успешно като пасивни детектори на радон и торон в условията на подземни минни галерии и пещери.

Във всички точки на измерване ^{222}Rn и ^{220}Rn присъстват в измерими количества, като на места концентрацията на ^{220}Rn значително надхвърля концентрацията на ^{222}Rn . Това показва, че при рутинния радонов мониторинг на мините е необходимо да се измерва и ^{220}Rn . Поради липсата на изразена корелация между нивата на ^{222}Rn и ^{220}Rn двата изотопа трябва да се измерват поотделно.

За първи път в рамките на дисертацията бе установено, че тънък воден филм върху повърхността на диска (мокра повърхност) не влияе върху измерването на радон.

5. Използване на CD/DVD метода за изследване на пространствени или времеви изменения на нивото на радон.

Идеята на метода за пръв път предложен в 2010г. [24] и разглеждан в тази глава, е да се използват два или повече диска, експонирани в различни времеви интервали или на различни места за да се диагностицират изменения в нивата на радон във времето или пространството. Този подход бе развит и изследван в две направления:

1. Изследване на влиянието на енергоспестяващи реконструкции, извършени в миналото върху нивото на радон;
2. Идентифициране на източници на замърсяване с ^{222}Rn в подземни условия.

5.1 Влияние на реконструкцията на жилища върху нивата на радон в тях.

Първото предприето от нас изследване бе с цел да се установи дали „енергоспестяващите мерки“ в жилища се отразяват на нивата на радон.

В последните години в България се появи и продължава да се развива политиката за подобряване на енергийната ефективност на съществуващите сгради, така нареченото саниране, а при

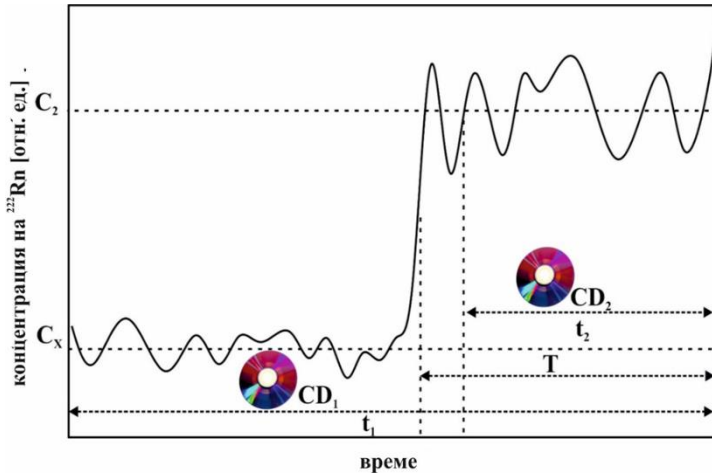
изграждането на нови, тя е една от основните цели. Ето защо е важно системното проучване на въздействието, което оказва санирането върху нивото на радон в сградите. Измерванията обаче трябва да съдържат информация за нивото на радон преди ремонта и след ремонта. При проспективните измервания такава задача би изисквала продължително време за измерване, подходящи обекти и наличие на подходяща апаратура, която да бъде ангажирана с измерванията за дълъг период от време. Посредством CD/DVD метода обаче, такива изследвания могат да бъдат направени сравнително бързо. За целта дисковете се използват като ретроспективни детектори на радон. Концепцията на метода е илюстрирана на фигура 9.

Почти във всеки дом има CD/DVD дискове, съхранявани там с години. Тези дискове могат да служат за детектори на радон, които са събирали информация за нивото на радон в жилището през цялото време на съхраняването им там. Сигналят от диска се дължи на интегралната обемна активност на радона през периода на тяхното формиране. След анализа на диска, се определя средното ниво на радон за този период. Нека имаме два диска от едно и също жилище, от преди 10 години и от преди 5 години. На диска от преди 5 години плътността на трековете ще се дължи на средното ниво на радон от този 5 годишен период. На диска от преди 10 години ще имаме плътност на трекове от същия период, плюс този дължащ се на периода от 10та година до 5та година.

След като знаем тази плътност от първия диск, можем да я извадим от общата плътност на трековете от втория диск и ще получим плътността на трекове получени в периода от 10тата

година до 5тата година. Това ще бъде изпълнено независимо какво ниво на радон е имало през двата периода. Нещо повече. След като знаем плътността на трековете, получени през двата периода и времето на съхраняване на дисковете в жилището, може да се определи радоновото ниво през тези периоди. Ако например радоновото ниво се е променило преди 5 години, ние ще отчетем тази промяна при анализа на първия диск и при сравняването му с резултата от периода от 10тата година до 5тата година при анализа на втория диск.

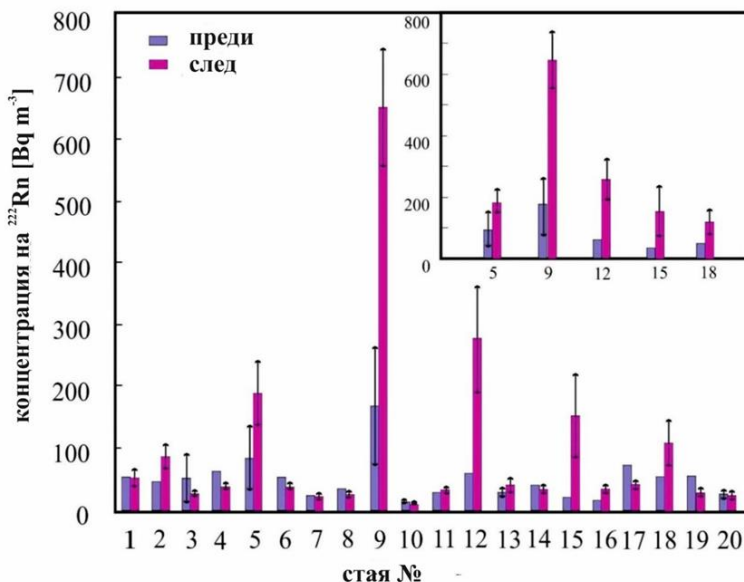
За да измерим промяната на концентрацията на радон в жилища, след реконструкция на жилището, включваща и смяна на дограмата, която е настъпила преди време $T[y]$ се събирани по два диска, престояли само в това жилище. След обработка на двата диска се определя плътността на трековете върху тях съответно n_1 за първия диск и n_2 за втория диск. Първият трябва да е от момент $t_1[y]$ където $t_1 > T$ (дискът да е от преди ремонта на жилището). Вторият диск трябва да е престоял в жилището $t_2[y]$ където $t_2 \leq T$ Най добре е $t_2 = T$ (появата на вторият диск в жилището да съвпада с момента на ремонта му). Тази концепция е представена на фигура 9.



Фигура 9. Концепция на метода. Сградата е била реконструирана в минал момент T . По старият от двата диска се намира в сградата от момента $t_1 > T$, а по-новият се намира там от момента $t_2 \leq T$.

За реализация на това проучване бяха изследвани 20 стаи в 16 сгради на територията на България. Всички те са били подложени на реконструкция в миналото в границите от преди 0.8 – 10у години преди проучването. При всички тях като минимум е извършена подмяна на дограмата с пластмасова или алуминиева такава. Шестнадесет от стаите са на приземния етаж, 4 са на първия етаж. Една от сградите е с 2 стаи на приземен етаж и 2 стаи на първи етаж. В друга сграда 2 от стаите бяха на партера. По-старите дискове от двата бяха закупени между 1 – 12у (средно 4.3 години) преди реконструкцията. От двайсетте постреконструкция дискове 12 са поставени в реконструираното жилище същата година в която е проведена реконструкцията, 2 на следващата година, 4 бяха

поставени след 2 години, а 2 диска след 4 години. На фигура 10 са илюстрирани получените резултати.



Фигура 10. Резултати за концентрацията на ²²²Rn в 20 жилища преди и след тяхната реконструкция (саниране). Когато грешката не е показана, концентрацията на радон е под минималното ниво на детектиране, като тяхното горно ниво е дадено като 95% доверително ниво. На допълнителната графика са представени резултати, в които нивото след реконструкция е над 100 Bq m⁻³.

Проведеното изследване показва следното:

- Методът е способен да открие систематична промяна в средните концентрации на радон след направено преустройство на жилище в миналото;
- Пилотните резултати от нашия набор от сгради, които са претърпели замяна на стара дограма с енерго - спестяваща

PVC дограма показва значимо (при 95% ниво на статистическа значимост) нарастване на средните концентрации на радон след преустройството в 35% от случаите, без да се наблюдава случай на значимо намаляване. Получените резултати предизвикват известна загриженост за евентуален проблем с радон, свързан с влиянието върху здравето на продължаващата в широк мащаб политика за енергийно - ефективното преустройство на жилища. Най - малко въпросът за радона трябва да бъде разгледан от тази гледна точка и ако това е необходимо, следва да бъдат проведени защитни мерки по отношение на радона в рамките на енергоспестяващото преустройство на жилищата.

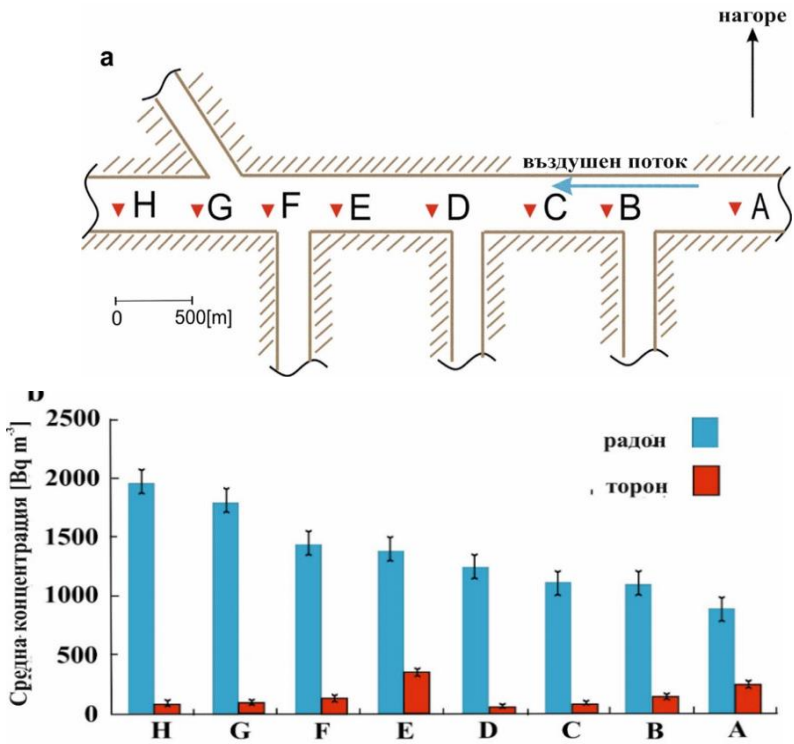
Настоящият метод позволява в кратък срок системно проучване на факторите, отговорни за повишаването на радона след енергоспестяващо преустройство на жилището.

5.2 Диагностика на вентилацията на подземна мина и идентифициране на източници на замърсяване с радон / торон.

Друга възможност за използване на CD/DVD метода е за диагностика и идентифициране на източници на замърсяването с радон на атмосферата в минните галерии с радон и торон. За целта дискове бяха поставени в различни точки по протежение на минните галерии, следвайки посоката на въздушната струя. Реалната схема на изследваната галерия е показана на фигура 11. След експозиция от 3 месеца, дисковете бяха събрани и обработени.

От фигурата се вижда, че има постоянно увеличение на радоновата концентрация по протежение на галерията, докато, тороновата не показва систематичен ход и зависи от конкретното място. За да идентифицираме потенциалните източници на радон, ние анализирахме нарастването на радоновия и разликите между детектори в съседни точки при 95% ниво на статистическа значимост. Статистически значима се оказва разликата в нивата на радон между точките F и G. Тези нива могат да се обяснят с постъпване на замърсен въздух, съдържащ радон по комина между тези 2 точки.

В резултат на изследването стана известен участък от мината от който е налице постъпление в минната атмосфера на



Фигура 11. Измерване на замърсяването на атмосферата в минните галерии с радон и торон.

- Схема на изследвана галерия. Разстоянието от точка А до точка Н е около 3 km.
- Резултати за радон и торон в различните точки.

въздух замърсен с ^{222}Rn . Подобни участъци подлежат на геолошко проучване, тъй като една от причините за високото ниво на радон в тях може да бъде наличието на по-висок клас руда в, или в близост до този участък от мината. Установяване на източниците на радон

позволява да се предприемат редица мерки за радиационен контрол и ограничаване на облъчването на миньорите.

6. Пасивен детектор за радон с чувствителност в ограничен времеви прозорец

Издадената през 2013г. европейска директива [26] изисква държавите - членки на Европейския съюз да определят референтни нива за средно годишна концентрация на работните места на ^{222}Rn , която не трябва да бъде над 300 Bq m^{-3} . На национално ниво това е залегнало в приетата и публикувана на 14 февруари 2018, Наредба за радиационна защита [27].

Строго погледнато, това усредняване би трябвало да се отнася само за времето, което работещият прекарва на работното място. В такива случаи „средно годишната доза облъчване на работещите“ трябва да се отнася до времето на заетост в годината.

До сега пасивните радонови детектори осигуряват сигнал, който се интегрира денонощно за цялото време на експониране. Това може да доведе до грешки в оценките на облъчването на работниците, тъй като нивата на радон могат да варират значително поради естествените дневни вариации и специфичните условия на вентилация (напр. вентилация се включва само през работно време). За да се отговори на това предизвикателство, би било полезно по работните места да има пасивни радонови детектори, които са чувствителни към ^{222}Rn само в рамките на определен времеви

прозорец (например работното време). В идеалния случай, такъв детектор ще регистрира сигнал само в рамките на работното време и ще има нулева чувствителност през останалото време.

През 2009г. беше предложен нов дизайн на пасивни ^{222}Rn детектор [28], който беше изследван теоретично [29] и експериментално [30,31,32]. Той използва фолио от материал, който има висока способност за абсорбиране на радон (напр. поликарбонат на база бисфенол-А), комбиниран със SSNTD. Накратко SSNTD е поставено пред фолиото, което служи като ^{222}Rn радиатор на α - частици.

Въз основа на тази концепция с наше участие бе предложен нов тип пасивен радон детектор, който кумулира сигнал само през определен период от време. Детекторът може да бъде предварително конфигуриран (например да бъде чувствителен само през работното време).

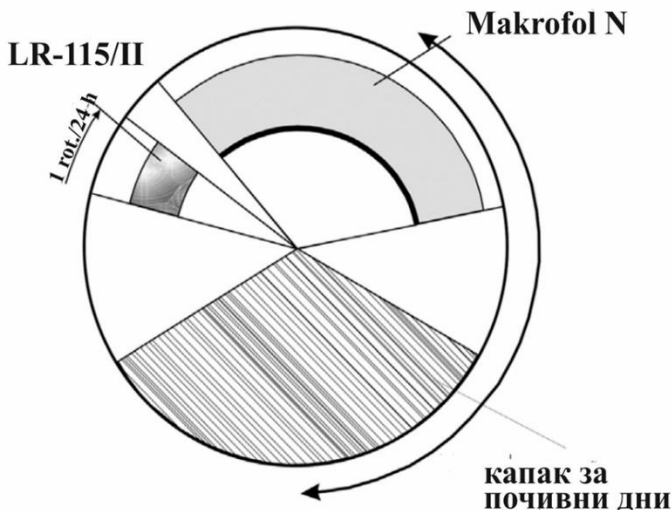
Новият радонов детектор е конструиран за работа в условия на нормална работна среда.

6.1 Концепция и моделиране

Основната концепция новия радонов детектор е да се постави SSNTD пред източника - " абсорбер на радон" само през определени интервали от време. Има различни технически начини да се постигне това. На фигура 12 е показан дизайн, в който трековият детектор Kodak Pathe LR-115 е сегмент с определени размери, който се върти с честота 1 оборот за 24 часа. В рамките на това завъртане, детекторът застава срещу абсорбер на радон, който

служи и като радиатор на α - частици само в рамките на интересувания ни период (например работното време). Извън този прозорец детекторът е обърнат към повърхността на металния държач. По време на облъчването тази повърхност е покрита с отложени върху нея дъщерни атоми на ^{222}Rn и евентуално дъщерни атоми на ^{220}Rn . При попадане върху детектора, енергиите на техните α - частици са по-високи от горния праг на регистрацията на следи на този детектор и те няма да произведат ецвани следи в него. Допълнителното покритие може да "затвори" фолиото по време на празници (фигура 12). Поради това сигналът на детектора се получава само по време, когато той е обърнат към абсорбера / радиатора на радон.

Материалът Makrofol N е избран като абсорбер / радиатор заради неговите отлични характеристики на абсорбция на радон. При стайна температура този материал има коефициент на разпределение (безразмерна мярка за разтворимост) за радон от 112 ± 12 и дифузионна дължина за ^{222}Rn от $39 \pm 1 \mu\text{m}$ [32]. Избраните детектори са от Kodak Pathe LR-115 тип II (енергиен прозорец: $E_{\text{min}} = 1,5 \text{ MeV}$; $E_{\text{max}} = 4,0 \text{ MeV}$ и критичен ъгъл към нормалата на повърхността на детектора 55°). Енергийният прозорец на регистрацията на използваните детектори е доста под енергиите на α - частиците от дъщерните продукти на ^{222}Rn и ^{220}Rn .



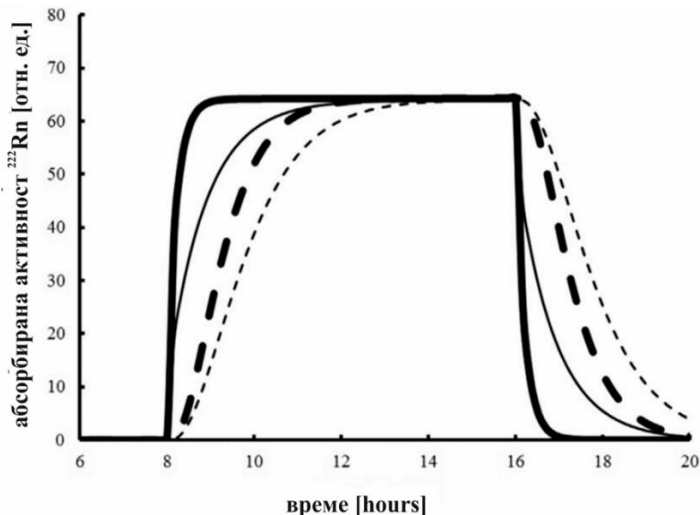
Фигура 12. Концептуален дизайн на предложеното пасивно наблюдение с почасово работно време чувствителност към радон, състоящ се от SSNTD детектор (LR-115 / II), който се върти над абсорбер на радон (Makrofol N). Покритието служи за изключване на по-дълги периоди от време като празници. Той не е задължителен.

Чрез провеждането на теоретично моделиране и експериментални изследвания се изясни осъществимостта на този подход и се оптимизира по отношение на чувствителност и получаване на сигнал, който интегрира точно обемната активност на радон за времевия прозорец на чувствителност. Повечето от пасивните детектори, когато се поставят внезапно от "ниски" на "високи" нива на радон (или обратното) демонстрират инерция в отклика. Това е времето необходимо на ^{222}Rn и неговите дъщерни продукти да възстановят равновесието си в обема на абсорбера/детектора. Ако α - частиците на ^{214}Po ($^{214}\text{Bi} + ^{214}\text{Po}$) допринасят за сигнала, това преходно време може да бъде 2–3 часа

поради по дългият процес на тяхното получаване. Тъй като абсорбиращото фолио служи като "източник" на α - частици, които бомбардират детектора, ние първо моделирахме времевата зависимостта на концентрацията в него дължаща се на абсорбирания ^{222}Rn и неговите дъщерни продукти след началото, по време и след края на експозицията с ^{222}Rn . Както е показано и в други публикации [28,29], в абсорбера вместо едно фолио може да се използва „композилен“ абсорбер. В този случай няколко тънки фолиа се слепват заедно нехерметично, така че радонът може да проникне свободно между тях. По този начин при запазен обем, ние увеличаваме контактуващата с радон повърхност, в резултат на което абсорбиращият обем и абсорбираната активност се запазват, докато кинетиката на абсорбцията / десорбцията е толкова бърза, колкото тази на тънките фолиа, от които е съставен композитния абсорбер. Когато фолиото е достатъчно тънко по отношение на дифузионната дължина на радона вътре в тях, разпределението на абсорбираната активност е практически хомогенно [29].

В нашите изследвания използвахме фолиото на Makrofol N. Процесът на сорбция / десорбция на радон е моделиран с помощта на аналитичните изрази, дадени в [33] и съответната промяна в активността на продукти на разпад (на ^{222}Rn), чрез комбиниране на тези изрази с уравненията за вериги от радиоактивни разпади [34]. Фигура 13 илюстрира времевата зависимост на активността на радона от фолио с дебелина 5 μm , от 2 фолиа по 5 μm всяка) и 10 μm изложени на радон. За времето на моделиране концентрацията на активността в околната среда на ^{222}Rn се счита за константа (не-нулева) в рамките на 8: 00-16: 00 h времеви прозорец и нула през

останалата част от деня. Както се вижда от фигура 13, профилът на абсорбираната активност може да бъде много близък до този на концентрация на ^{222}Rn в околната среда, когато дебелината на единичното фолио в композитния абсорбер е $5\mu\text{m}$ (или по-малък).



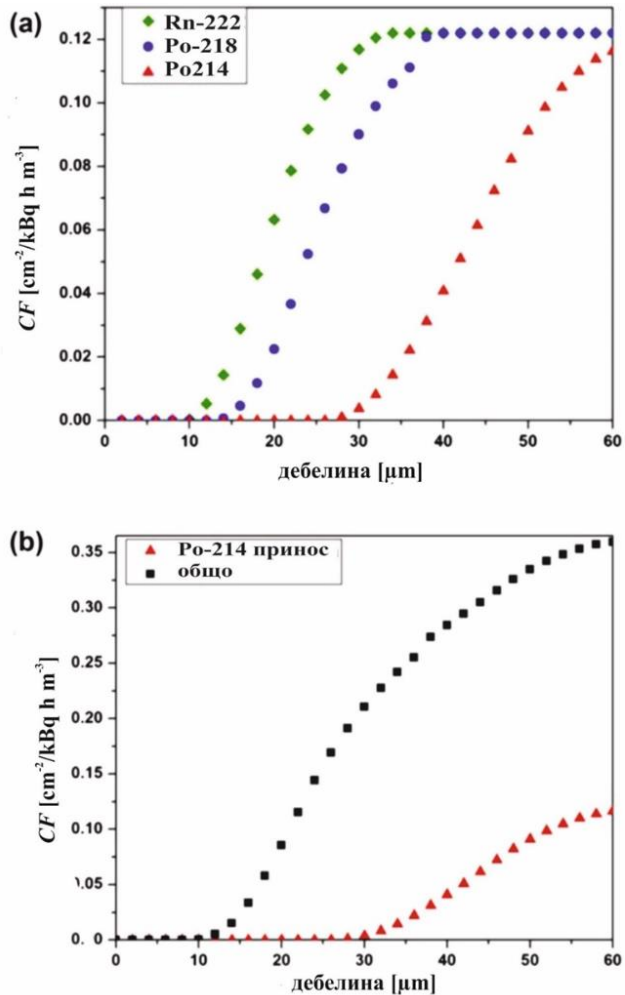
Фигура 13. Профилът на активността на радона от фолио ^{222}Rn ; $2 \times 5\mu\text{m}$ (пълтна линия) и $^{214}\text{Bi} + ^{214}\text{Po}$ (пълтна пунктирна линия) и $10\mu\text{m}$ (тънки линии). В този мащаб профилът на ^{218}Po активността е много близка до тази на ^{222}Rn .

Профилът на активността дължаща се на ^{218}Po е много близка до тази на ^{222}Rn , докато активността дължаща се на ^{214}Po ($^{214}\text{Bi} + ^{214}\text{Po}$) се нуждае от повече време, за да достигне равновесие. Ако сигналът който се дължи на ^{214}Po не е дискриминиран, винаги ще има инерция в реакцията на детектора от порядъка на минимум 2–3h. Въпреки това, в рамките на настоящия подход приносят на α – частиците дължащи се на разпада на ^{214}Po към сигнала на детектора могат да

бъдат дискриминирани чрез използване на енергетичния прозорец за регистрация и намиране на подходяща дебелина на композитния абсорбер. Поради взаимодействието със средата вътре в абсорбера на α – частиците, получени от абсорбирания радон и дъщерните му продукти, дебелината на абсорбера влияе върху тяхната енергия с която те напускат абсорбера.

Ефективността на регистрацията е моделирана за композитни абсорбери с различна дебелина, приемайки равномерно разпределение на активността в обема на абсорбера. Счита се, че α - частиците се движат в прави линии и се регистрират, ако напуснат абсорбера с енергия която е в рамките на енергийния прозорец на SSNTD и пада под ъгъл по-малък от критичния. Загубата на енергия в малката въздушна междина между абсорбера и детектора е пренебрегната (по-малко от 0,17 MeV за ширина под 2 mm на въздушната междина). За да се изчисли калибровъчният фактор (CF = плътност на следи след като е изваден фона/ интегрирана по времето концентрация на радон), са взети под внимание ефективността на регистрацията и коефициентът на разпределение на радон в абсорбционния материал, (който характеризира отношението на вътрешната и външна концентрация). Резултатите за CF за всички 3 групи от α - частици са показани на фигура 14 а и б.

Както се вижда, когато общата дебелина на абсорбера е по-малка от 30 μ m, сигнал се формира само от ^{222}Rn и ^{218}Po . При по-



Фигура 14. Моделни резултати (получени от доц. Ивелина Димитрова) за калибровъчния коефициент на детектора при различна обща дебелина на абсорбера: а) за отделните нуклиди; б) за общия сигнал и нежелания принос на ^{214}Po [35].

голяма дебелина на абсорбера приносят на ^{214}Po започва да се увеличава (съответно, инерцията в отговорът му също започва да се

увеличава). От това следва, че обща дебелина на композитният абсорбер включен в детектор трябва да е по-малка от 30 μm . Той трябва да е изработен от единични фолиа с дебелина не по-голяма от 10 μm , желателно е по-малка. По този начин, сигналът на детектора ще съответства на профила на концентрацията на ^{222}Rn във времето.

6.2 Експериментални резултати и обсъждане

Бяха проведени експерименти за проверка на валидността на подхода. В експериментите са използвани с фолиа с дебелина 7 μm и 21 μm . Те са получени чрез химическо ецване на търговско 43 μm фолио Makrofol N с разтворител от 52% KOH (m / v) и 40% метанол (m / v) при 30 ° C. Когато двете страни на фолиото се обработват с разтвора, дебелината се намалява при скорост от около 2 $\mu\text{m}/\text{min}$.

В първите експерименти композитни абсорбери от 3 \times 7 μm (обща дебелина 21 μm) и 2 \times 21 μm (обща дебелина 42 μm) бяха изложени в малък обем (200 cm^3) за облъчване от ^{222}Rn при висока концентрация (около 15 MBq/m^3) за 5 дни. След края на експозиция над фолиото бяха поставени парчета от Kodak-Pathe LR-115 / II за 5 min. пет минутните експозиции следват непрекъснато една след друга. По този начин се следваше инерцията на системата на абсорбер-детектор. Високото ниво на ^{222}Rn при експозицията доведе до добра статистика на сигнала в детектори, облъчени с α - частици, идващи от фолиото само за интервал от 5 минути. Детекторите бяха ецвани в продължение на 70 минути с 10% NaOH при 60 $^{\circ}\text{C}$ и след

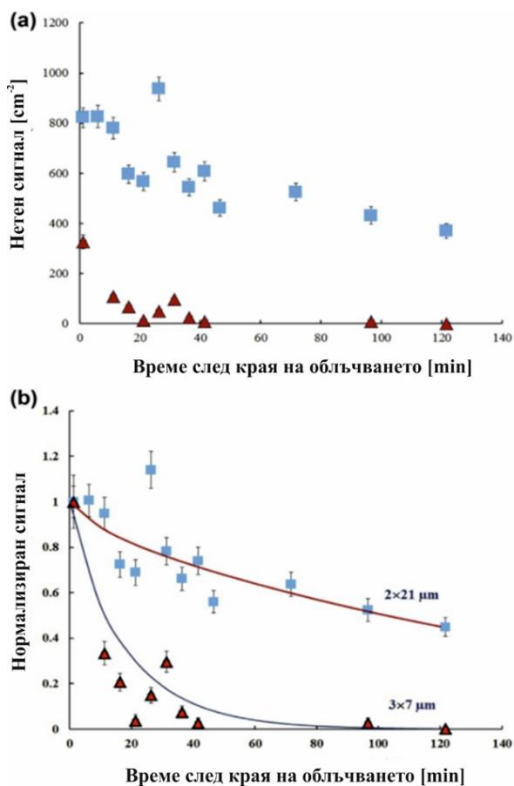
това се промива в продължение на 30 минути във вода и следите бяха броещи визуално с микроскоп. Резултатите са илюстрирани на фигура 15 а и б. Разликата около два пъти между сигнал за първото измерване на абсорберите с дебелина $3 \times 7\mu\text{m}$ и $2 \times 21\mu\text{m}$ може да се обясни с подобна разлика в общата ефективност на регистрацията за абсорбери с обща дебелина. $21\mu\text{m}$ и $42\mu\text{m}$ (фигура 14). На фигура 15 б, сигналът е нормиран към сигнала на първият детектор.

Както се вижда, сигналът от абсорбера $3 \times 7\mu\text{m}$ намалява сравнително бързо. За разлика от това, абсорбера $2 \times 21\mu\text{m}$ показва много по-бавно намаляване, поради частичната му чувствителност към α -частици на ^{214}Po и по-бавната радонова десорбция при тази дебелина. Теоретичните очаквания (представени от линиите на фигура 15) се съгласуват добре с експерименталните резултати.

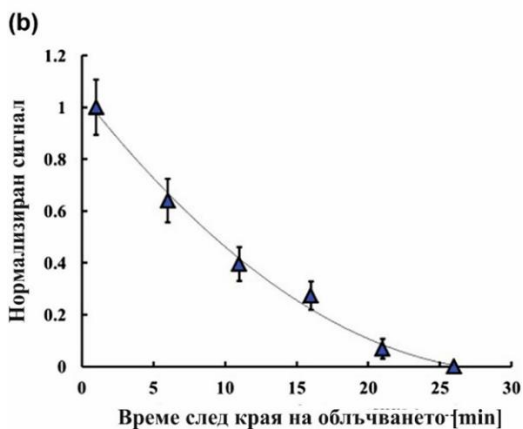
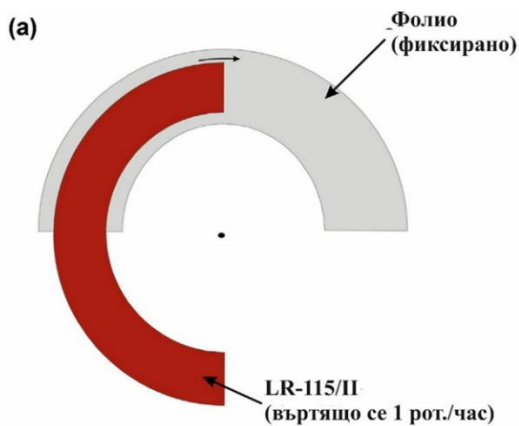
Докато горният експеримент ясно показва "инерцията на реакцията" при различните фолиа, тя не отразява точно реалните условия на облъчване в предложения прототип (фигура 12). В него детекторът не се изправя пред радиатора само за кратко време, а преминава пред него за по-дълги интервали. За да се изследва "инерцията в отговора" в този случай, беше извършен друг експеримент, използвайки схемата, показана на фигура 16. В това положение скоростта на въртене е 1 rot/h , за да има по-добра разделителната способност по време в "преходната зона", след като детекторът влезе в зоната над абсорбера/радиатора.

Абсорберът ($3 \times 7\mu\text{m}$), който е поставен върху метален държач, е бил изложен на ^{222}Rn при същите условия като тези в предишния експеримент. След края на експозицията, той бързо се отстранява и поставя под детекторния сегмент, който се върти (с

часовников механизъм) с 1 rot/h. Позицията му беше избрана по такъв начин че детекторът да започне да навлиза в областта на абсорбера 1min след края на облъчването му с ^{222}Rn . "Времето за влизане" на всяка точка от детектора зависи от ъгловото му положение спрямо предната линия на детектора. След като детекторът направи едно пълно завъртане се отстранява и ецва. Резултатите са показани на фигура 15 б. Както се вижда времето, за което сигналът намалява до 50% от първоначалната си стойност е около 10 min. Следователно влиянието на абсорбирания радон от преди повече от 20 минути преди „стартовото време“ когато детекторът навлиза над него може да бъде пренебрегнато. Това може допълнително да се подобри чрез използване на фолио за абсорбера по тънки от $7\mu\text{m}$ в радиаторния пакет. Чувствителността на метода се оценява, като се използва подходът на Currie [36], а типичната фонова плътност на следите, които наблюдаваме с нов Kodak Pathe LR-115 тип II (с детектори, използвани в нашия експерименти бе $26 \pm 2\text{cm}^{-2}$). Ако се броят всички следи от 2cm^2 площ на детектора, минималната концентрация на активност на ^{222}Rn с абсорбер с обща дебелина $30\mu\text{m}$, според [36] е около 15Bq m^{-3} за една „работна година“ (2000 часа) или около 60Bq m^{-3} за 3 „работни месеца“. Тези стойности са доста под референтната стойност от максимум 300Bq m^{-3} за работни места [27]. Затова представеният тук концептуален подход заслужава по-нататъшни



Фигура 15. а) Плътности на следите, образувани в Kodak Pathe LR-115 тип П детектори, изложени на Markrofol N радонопоглъщащи фолия като функция на времето след края на облъчване на фолиото с ^{222}Rn . Данните са за абсорбер, състоящи се от 2 фолио с дебелина $21\ \mu\text{m}$ са маркирани с квадрати и за абсорбатор от 3 фолио с дебелина $7\ \mu\text{m}$ маркиран с триъгълници; б) данните от а) когато са нормализирани към сигнала на първият детектор от системата за регистрация. Линиите представят теоретичните времеви зависимости получени от използвания модел.



Фигура 16. а) Екпериментална концепция. Първоначално детекторът започва да преминава пред фолио (композитен абсорбер $3 \times 7 \mu\text{m}$). б) Нормализирана плътност на следите в различни сектори на детектора, които достигат до фолиото в различни моменти след края на излагането на фолиото на радон.

усилия за изграждане на радонов детектор подходящ за работни места.

Този метод демонстрира, че чрез използване на фолия от материали с високи абсорбционни свойства за радон (например Makrofol N) и въртящ се SSNTD, може да бъде конструиран пасивен радонов детектор с чувствителност в зададен времеви прозорец с практически безинерциална чувствителност към радон. Използва се абсорбер, направен като пакет от тънки фолия и SSNTD с подходящ енергиен прозорец (в настоящия случай Kodak-Pathe LR-115 / II). Представените резултати показват, че е оптимално да се използва композитен абсорбер с обща дебелина около 30 μm , съставен от фолия с дебелина 7 μm или по-тънки. На този етап тези детектори са планирани най-вече за работни места със среда близка до нормалната за живеене. За да се разширят възможностите за използване в места с по-тежка околна среда (мини, минерални извори, пещери и др.) ще бъдат необходими допълнителни разработки и изследвания.

7. Заключение и приноси на дисертацията

Изследванията в тази дисертация бяха мотивирани от необходимостта да се намери прост и надежден метод за кумулативни измервания на радон и торон в подземни обекти- главно подземни мини и пещери, но също така и други обекти (тунели, подземни складове и хранилища и пр.) Общото в тези обекти е, че се характеризират с особени условия на въздушната среда: висока влажност, високи нива на загаденост, отпадни и взривни газове (за мините), взривни вълни, които могат да увредят детекторите, водни капки и пръски, които могат да ги намократ и

пр. Всичко това прави традиционно използваните за мониторинг на радон и торон в сгради детектори трудно използвани в подземна среда. Вниманието ни беше насочено към използване на CD/DVD метода за кумулативни измервания на радон и торон. Проведените в продължение на няколко години целеви изследвания в лабораторни и реални условия показаха, че методът е приложим дори в най-сурови условия и може да се използва за масови измервания, включително за диагностика и идентифициране на източници на замърсяване с радон на рудничния въздух. В хода на проучванията бяха използвани и оригинални методи, които могат да намерят приложения и за изследвания в жилища, надземни работни места и др. Основните приноси на дисертационния труд имат научно-приложен характер и са следните:

1. За пръв път са проведени измервания на радон и торон в подземни условия посредством експониране на CD/DVD в подземните галерии. Установена е приложимостта на метода и е наблюдавано добро съвпадение с резултати, получени с традиционни методи, където такова сравнение бе възможно да се направи. Експериментално установено е, че намокряне на повърхността на CD/DVD, при което е налице тънък воден филм върху повърхността на едиската не оказва влияние върху резултатите за радон;
2. На базата на паралелни измервания на радон и торон в подземна среда е установена липсата на корелация между кумулативните концентрации на двата изотопа в подземни условия;

3. Предложен е метод за идентифициране на източници на замърсяване с радон и торон в подземни изработки, посредством анализ на два или повече CD/DVD, поставени в различни точки. Посредством този метод е идентифициран източник на замърсяване на въздуха с радон в подземна галерия;
4. За пръв път посредством анализ на два CD/DVD експонирани ретроспективно в различни времеви интервали е изследвано влиянието на енергоспестяващите ремонти върху нивата на радон в сгради. В 35% от случаите е установено статистически значимо повишаване на нивата на радон след проведеното саниране, без да е намерен случай на тяхното значимо намаляване;
5. Предложен е метод за кумулативни измервания на радон на работни места, при който детекторът регистрира сигнал само в определен времеви прозорец (например в работно време). Направени са пилотни изследвания, показващи потенциал за приложимост на метода.

**Публикации с участието на автора,
включени в дисертацията:**

**В международни издания, индексирани с
IF/SJR:**

1. Pressyanov D., **Dimitrov D.**, Dimitrova I., Georgiev S., Mitev K.
Novel approaches in radon and thoron dosimetry. *AIP Conf. Proc.*
1607 (2014) 24-33.

Забелязано цитиране:

- (1) Clero E. et al. *Rev. Epid. Sante Publ.* 64 (2016) 237-246.

2. Pressyanov D., **Dimitrov D.**, Dimitrova I. Energy-efficient reconstructions and indoor radon: the impact assessed by CDs/DVDs. *J. Envir. Radioact.* 143 (2015) 76-79.

Забелязани цитирания:

- (1) Cosma C. et al. Radonul in contextual efficientizarii energetice a gladirilor. IN: NORM/TENORM Nat. Conf. SRRP 2015, Romania (2015).
- (2) Sedighan S. et al. *Int. J. Env. Res.* 9 (2015) 1233-1236.
- (3) Cucos (Dinu) A. et al. *Rom. J. Phys.* 60 (2015) 1574-1580.
- (4) Костов P. (2016). Радонът-един от невидимите убийци. Инфофарма, <http://www.infopharma-bg.eu/radonut-edin-ot-nevidimite-ubiizi/>
- (5) Yarahmadi M. et al. *Electronic Physician* 8 (2016) 2497-2505.
- (6) Collignan B. et al. *J. Envir. Radioact.* 165 (2016) 124-130.
- (7) McGrath J. A., Byrne M. A. A Computational Evaluation of the Impacts of Radon Concentrations in Energy Retrofit Buildings in Ireland. Proc. ROOMS 2016, 6-7.10.2016, Concarneau, France.
- (8) Chengju Wang, Energy use and energy saving in buildings and asthma, allergy and sick building syndrome (SBS): a literature review. University of Gavle (2019).
- (9) Collins M., Dempsey S. Residential Energy Efficiency Retrofits: Potential Unintended Consequences. ESRI Working Paper 554 (2017).

- (10) Collignan B., WHO CC Newsletter No. 27, December 17 (2017), pp. 15-18, Baden-Wurttemberg State Health Office, doi: 10.17265/1548-6648/2016.03.005.
- (11) Pampuri L. et al. *Sust. Cit. Soc.* 42 (2018) 100-106.
- (12) Collignan B., Powaga E. *J. Envir. Radioact.* 196 (2019) 268-273.
3. **Dimitrov D.**, Pressyanov D. The CD/DVD method as a tool for the health physics service and ventilation diagnostics in underground mines. *Radiat. Prot. Dosim.* 181 (2018) 30-33.
4. Pressyanov D., **Dimitrov D.**, Dimitrova I., Passive radon monitors with part-time sensitivity to radon. *Radiat. Meas.* 118 (2018) 72–76.

Доклади на конференции

5. Pressyanov D., **Dimitrov D.**, Using CDs/DVDs for radon and thoron monitoring in underground mines. IN: *2nd East European Radon Conference*, 2014, Nis, Serbia.
6. Pressyanov D., Stojanovska Z., **Dimitrov D.**, Georgiev S., Pilot survey of indoor radon in Republic of Macedonia using retrospective method IN: *2nd East European Radon Conference*, 2014, Nis, Serbia.

Библиография

- [1]. World Health Organization. WHO handbook on indoor radon: a public health perspective. WHO press, Geneva, Switzerland. (2009).
- [2]. Committee on Health Risks of Exposure to Radon (BEIR VI). National Research Council. Health effects of exposure to radon. *National Academy Press, Washington, DC, USA.* (1999).
- [3]. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Report to the General Assembly,. United Nations, United Nations Office at Vienna, Austria. (2006).
- [4]. Bochicchio F. Radon epidemiology and nuclear track detectors: Methods, results and perspectives. *Radiat. Meas.*, 40. (2005) 177–190.
- [5]. Samuelsson C.. Radon retrospective measurements. *Int. Congr. Ser.*, 1276. (2005) 66–71.
- [6]. Oberstedt S. and Vanmarcke H.. Volume traps - a new retrospective radon monitor. *Health Phys.*, 70(2). (1996) 222–226.
- [7]. Paridaens J., Vanmarcke H., Jacobs K., and Zunic Z.. Retrospective radon assessment by means of ^{210}Po activity measurements. *Appl. Radiat. Isot.*, 53. (2000) 361–364.

- [8]. Paridaens J., Vanmarcke H., Zunic Z., and McLaughlin J.P.. Field experience with volume traps for assessing retrospective radon exposures. *Sci. Total Environ.*, 272. (2001) 295– 302.
- [9]. Fleischer R.L.. Serendipitous dosimetry - an opportunity and an opportunity lost. *Health Phys.*, 52. (1987) 219–221.
- [10]. Hadley S.A., Meyer N.R., Fleischer R.L., and Cavallo A.. Eyeglass lenses for personal radon dosimetry. *Health Phys.*, 79. (2000) 242–250.
- [11]. Fleischer R.L., Meyer N.R., Hadley S.A., MacDonald J., and Cavallo A.. Personal radon dosimetry from eyeglass lenses. *Radiat. Prot. Dosimetry*, 97(3). (2001) 251–258.
- [12]. Pressyanov D, Buysse J, Van Deynse A, Poffijn A, Meesen G. Indoor radon detected by compact discs. *Nucl Instrum Methods A* 457. (2001) 665-666
- [13]. Pressyanov D., Buysse J., Poffijn A., Meesen G., and Van Deynse A. The compact disk as radon detector - a laboratory study of the method. *Health Phys.*, 84 (2003) 642–651.
- [14]. Pressyanov D., “Retrospective measurements of thoron and radon by CDs/DVDs: a model approach,” *Radiat. Prot. Dosim.*, 149. (2012) 141-145.
- [15]. Georgiev S., Dimitrova I., Pressyanov D., Mitev K. Retrospective Rn-220 Measurements by Compact Disc. *Nuclear Science*

- Symposium, *Los Angeles, CA, USA, IEEE-NSS Conf. record*, art.no.6551102, (2012) 250-252,
- [16]. Pressyanov D. Dissertaion for acquiring the scientific degree of Doctor of the Physical Sciences. SU “St. Kliment Ohridski” (2012).
- [17]. Pressyanov D. Use of polycarbonate materials of high radon absorption ability for measuring radon. *Rom. J. Phys.* 58 (2013) 221-229.
- [18]. Pressyanov D., Mitev K., Dimitrova I, Georgiev S. Solubility of krypton, xenon and radon in polycarbonates. Application for measurement of their radioactive isotopes. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res Sect. A.* (2011) 323-328.
- [19]. Pressyanov D., Dimitrov D., Georgiev S., Dimitrova I. Tests of CDs/DVDs as Passive Radon and Thoron Detectors for Mines and Caves *IEEE (NSS/MIC) San Diego, CA, USA, (2015)*.
- [20]. Dimitrov D., Pressyanov D. The CD/DVD method as a tool for the health physics service and ventilation diagnostics in underground mines. *Radiation Protection Dosimetry* 181 (2018) 30-33.
- [21]. Tokonami S., “Why is ^{220}Rn (thoron) measurement important?” *Radiat. Prot. Dosim.*, 141 (2010) 335-339.
- [22]. Clever, H. L., Ed. Krypton, xenon and radon-gas solubility. In: *Solubility Data Series 2. Vol. 18, (Oxford, UK: Pergamon Press)* (1979).

- [23]. Tommasino, L. et al. An international cooperation by using an all-encompassing passive radon monitor. *Radiat. Prot. Dosimetry*. 177, 12–15 10. (2017) 109-162.
- [24]. Dimitrova I., Pressyanov D., Georgiev S., and Yankov P. Logistic of surveys of retrospective radon concentrations by home-stored CDs/DVDs. *Radiat. Prot. Dosim.*, 145(2-3). (2011) 300–304.
- [25]. Pressyanov, D., Foerster, E., Georgiev, S., Dimitrova, I., Mitev, K., Traceability of CDs/DVDs used as retrospective ^{222}Rn detectors to reference STAR laboratory. *Radiat. Meas.* 59. (2013) 165-171.
- [26]. Council Directive 2013/59/EURATOM of 5 December 2013. *Official Journal of the European Union* L 13/17.1. (2014).
- [27]. Наредба за радиационна защита. Държ. в-к. 20.02/(2018).
- [28]. Tommasino L. Radon film-badges versus existing passive monitors based on track etch detectors. *Nukleonika* 55. (2010) 549-553.
- [29]. Pressyanov, D. Modeling response of radon track detectors with solid absorbers as radiators. *Radiat. Meas.* 46. (2011) 357–361.
- [30]. Pressyanov, D., Georgiev, S., Dimitrova, I., Mitev, K. Experimental study of the response of radon track detectors with solid absorbers as radiators. *Radiat. Meas.* 50. (2013) 141–144.
- [31]. Pressyanov D., Dimitrov D., Dimitrova I. Passive radon monitors with part-time sensitivity to radon. *Radiation Measurements* 118. (2018) 72–76.

- [32]. Mitev, K., Cassette, P., Georgiev, S., et al., Determination of absorption ^{222}Rn properties of polycarbonate foils by liquid scintillation counting. *Application to measurements. Appl. Radiat. Isot.* 109. (2016) 270–275.
- [33]. Pressyanov, D. Modelling a ^{222}Rn measurement technique based on absorption in polycarbonates and track – etch counting. *Health Phys.*, 97. (2009) 604-612.
- [34]. Pressyanov, D. Short solution of the radioactive decay chain equations. *Am. J. Phys.* 40. (2002)
- [35]. Pressyanov D., Dimitrov D., Dimitrova I., Passive radon monitors with part-time sensitivity to radon . *Radiation Measurements* 118. (2018) 72–76.
- [36]. Currie L. A. Limits for qualitative detection and quantitative determination: application to radiochemistry. *Anal. Chem.*, 40. (1968) 586–593.