

APPLICATION OF NATURAL GAMMA BACKGROUND AND K, U, AND Th INDICATORS FOR INDIRECT ASSESSMENT OF RADON ACCUMULATION RISK IN GROUND-FLOOR AND BASEMENT ROOMS

Christian Tzankov¹, Bogomil Stefanov²

¹University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: ch.tzankov@mgu.bg

²Hexagon-Build Ltd, 1839 Sofia; E-mail: b.stefanov@hexagon-build.com

ABSTRACT. This study examines the applicability of portable gamma spectrometry for the indirect assessment of the risk of radon release and accumulation in ground-floor rooms and basement spaces used for domestic purposes. The approach is based on the combined analysis of the natural gamma background, the contents of K, eU, and eTh, and radon-sensitive spectral intervals associated with ²¹⁴Pb and ²¹⁴Bi. A monitoring scheme was applied that included outdoor and indoor reference measurements, prolonged observations in a basement environment, room-by-room measurements, and controlled tests under ventilation and pressure-change conditions. The preliminary results indicate generally stable levels of natural background radiation and no evidence of anomalous artificial sources, while at the same time revealing a weak but persistent diurnal cyclicity in dose rate and a characteristic behaviour of the ²¹⁴Bi photopeak at 1764 keV, consistent with radon-related processes. The moderate relationship of this indicator with equivalent uranium and dose rate, along with its weak negative dependence on atmospheric pressure, suggests the influence of soil-gas transport under conditions of air exchange in enclosed near-surface spaces. The results show that portable gamma spectrometry does not replace direct radon measurements in Bq/m³, but it can serve as a useful screening, comparative, and interpretative tool for identifying rooms and spaces with elevated potential for radon ingress and accumulation.

Key words: radiometry, radon, gamma spectrometry, natural radioactivity.

ПРИЛОЖЕНИЕ НА ЕСТЕСТВЕНИЯ ГАМА-ФОН И ПОКАЗАТЕЛИТЕ ЗА К, U И Th ЗА НЕПРЯКА ОЦЕНКА НА РИСКА ОТ НАТРУПВАНЕ НА РАДОН В ПРИЗЕМНИ И СУТЕРЕННИ ПОМЕЩЕНИЯ

Християн Цанков¹, Богомил Стефанов²

¹Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

²Хексагон-Билд ЕООД, 1839 София

РЕЗЮМЕ. В настоящото изследване се разглежда приложимостта на преносимата гама-спектрометрия за непряка оценка на риска от отделяне и натрупване на радон в приземни и сутеренни помещения за битови нужди. Подходът се основава на съвместен анализ на естествения гама-фон, съдържанията на К, eU и eTh и радон-чувствителни спектрални интервали, свързани с ²¹⁴Pb и ²¹⁴Bi. Приложена е схема на мониторинг, включваща външни и вътрешни референтни измервания, продължителни наблюдения в сутерен, измервания по помещения и контролирани тестове при вентилация и промяна на налягането. Предварителните резултати показват като цяло стабилни нива на естествения радиационен фон и липса на данни за аномални изкуствени източници, но същевременно разкриват слаба, но устойчива денонощна цикличност на дозовата мощност и поведение на фотопики на ²¹⁴Bi при 1764 keV, съответстващо на процеси, свързани с радона. Умерената връзка на този индикатор с еквивалентния уран и дозовата мощност, както и слабата отрицателна зависимост от атмосферното налягане, насочват към влияние на почвено-газов пренос в условията на въздухообмен в затворени приземни обеми. Резултатите показват, че преносимата гама-спектрометрия не замества директните измервания на радон в Bq/m³, но може да бъде полезен скринингов, сравнителен и интерпретационен инструмент за открояване на помещения с повишен потенциал за радоново проникване и натрупване.

Ключови думи: радиометрия, радон, гама-спектрометрия, естествена радиоактивност.

Въведение

Радонът (²²²Rn) е естествен радиоактивен благороден газ, образуван в разпадната серия на ²³⁸U. Поради газообразното си състояние и сравнително високата си подвижност той може да мигрира от почви, скали и строителни материали към приземни и сутеренни помещения, където при ограничен въздухообмен е възможно неговото натрупване. Този процес има важно значение за радиационната среда в сградите, тъй като продължителното излагане на повишени концентрации на радон се разглежда като съществен здравен риск, особено в затворени помещения с лоша вентилация (WHO, 2009; El-Taher, 2018). Поради това оценката на условията за радоново проникване и натрупване е важна задача както при радиационния контрол, така и при геоecологични и инженерни изследвания на сградната среда.

Директната оценка на радоновата активност във въздуха обикновено се извършва със специализирани пасивни или активни радонови детектори, които дават концентрация в Bq/m³. Такива измервания са основният

подход при нормативна или здравна оценка на радоновия риск. Същевременно радоновите концентрации могат да имат съществени кратковременни и сезонни вариации, свързани с атмосферно налягане, температура, влажност, вентилация, експлоатационен режим на сградата и възможни пътища за почвено-газов пренос. Това налага използването на допълнителни подходи, които да подпомагат интерпретацията на пространствените и времевите изменения на радиационната среда.

Гама-спектрометрията е утвърден радиометричен метод в геофизиката, използван за определяне на естествения гама-фон, съдържанията на К, U и Th, геолошко картиране, търсене на минерални ресурси и екологичен мониторинг (Пищалов и др., 1978; IAEA, 2003; Denti and Mudge, 2014). При полеви измервания с преносими гама-спектрометри обикновено се оценяват съдържанията на ⁴⁰K, еквивалентен уран (eU), еквивалентен торий (eTh) и дозовата мощност. Тези параметри дават информация за естествената радиоактивност на средата и за възможни локални различия, свързани с геоложки, строителни или антропогенни фактори. В последните години преносимата

гама-спектрометрия намира приложение и като неразрушителен метод за оценка на радиоелементния състав на строителни материали и каменни блокове в сгради и културно-исторически обекти (Hernández Santomé et al., 2025).

Важно ограничение е, че ^{222}Rn сам по себе си е алфа-излъчвател и не може да бъде измерен директно чрез гама-спектрометър. Неговите краткоживеещи дъщерни продукти обаче, особено ^{214}Pb и ^{214}Bi , излъчват характерни гама-кванти, които могат да бъдат регистрирани в енергийния спектър. Сред най-често използваните радон-свързани линии са тези на ^{214}Pb около 295 и 352 keV и на ^{214}Bi около 609, 1120 и 1764 keV (El-Taher, 2018). Поради това измененията в определени спектрални прозорци, свързани с ^{214}Pb и ^{214}Bi , могат да бъдат използвани като индиректни индикатори за процеси, свързани с радонова екshalация, натрупване и пренос. Този подход не замества директното измерване на радон в Bq/m^3 , но може да даде допълнителна информация за относителни пространствени и времеви промени в радиационната среда.

Настоящото изследване разглежда приложимостта на преносима гама-спектрометрия за непряка оценка на условията за радоново проникване и натрупване в приземни и сутеренни помещения на сграда в централната част на гр. София. Подходът се основава на съвместен анализ на естествения гама-фон, съдържанията на K, eU и eTh, дозовата мощност и избрани радон-чувствителни спектрални интервали, свързани с ^{214}Pb и ^{214}Bi . Измервателната схема включва външни и вътрешни референтни измервания, продължителен мониторинг в сутеренно помещение, измервания по отделни помещения и контролирани тестове при промяна на вентилационните и баричните условия. Целта е да се оцени доколко този тип радиометрични наблюдения могат да бъдат използвани като скринингов, сравнителен и интерпретационен инструмент за открояване на помещения с повишен потенциал за радоново проникване и натрупване.

Обект и методика на изследване

Обект на изследване

Изследването е проведено в жилищна сграда, разположена в централната част на гр. София. Обектът включва приземни, сутеренни и надземни помещения, използвани за битови нужди. Основният интерес е насочен към сутеренната част на сградата, тъй като подобни помещения обикновено са с по-висок потенциал за радоново проникване и натрупване поради непосредствената им връзка с почвата, наличие на технически отвори, комуникационни трасета, фуги и ограничен въздухообмен.

За продължителен мониторинг е избрано сутеренно сервизно помещение (фиг. 1), в което преминават водопроводни, отоплителни и комуникационни линии. Подобни конструктивни и инсталационни особености могат да създават предпочитани пътища за миграция на почвен газ към вътрешността на сградата. Допълнително са изследвани помещения на различни етажи, включително дневни, кухненски, спални, санитарни и помощни помещения, с цел сравнение на естествения гама-фон и радиометричните показатели в различни условия на обитаване, вентилация и конструктивна среда.



Фиг. 1. Използвана апаратура и измервателна обстановка в сутеренното помещение

Използвана апаратура

Гама-спектрометричните измервания са изпълнени с преносим гама-спектрометър Gamma Surveyor Vario (фиг. 1), оборудван със сцинтилационна сонда VB21 с кристал от бисмут-германатен оксид (BGO). Апаратът позволява регистриране на пълен гама-спектър, както и изчисляване на основни радиометрични параметри: съдържание на калий K (%), еквивалентен уран eU (ppm), еквивалентен торий eTh (ppm) и дозова мощност DR (nSv/h). Записът на пълния спектър позволява последващ анализ на избрани енергийни интервали, включително такива, свързани с гама-излъчващи дъщерни продукти на радона.

Като допълнителен ориентир за радоновата обстановка в сутерена е използван и малък електронен радонов монитор тип Airthings, отчитащ концентрация на радон във въздуха в Bq/m^3 . Данните от този уред не са използвани като основен количествен резултат в настоящото изследване, а служат само като независима потвърждаваща информация за наличието на измерими радонови концентрации в сутеренното помещение. Основният акцент в статията остава върху гама-спектрометричните показатели и тяхната интерпретация като индиректни радон-свързани индикатори.

Измервателна схема

Измерванията са организирани поетапно, така че да се оцени както общият естествен гама-фон в сградата, така и възможните пространствени и времеви изменения, свързани с радоново проникване и натрупване.

Първоначално са изпълнени референтни измервания извън сградата, в дворно пространство, с цел определяне на външен фонов радиометричен ориентир (фиг. 2a). След това е избрана вътрешна референтна точка в близост до

входната част на сградата, която представя условията на нормален вътрешен гама-фон при обичайна вентилация и без пряка връзка със сутеренната зона (фиг. 2б).

Основният етап на изследването включва продължителен мониторинг в сутеренното сервисно помещение (фиг. 1). Гама-спектрометърът е инсталиран неподвижно в помещението и е оставен да работи непрекъснато в периода от 28.11.2025 г. до 12.12.2025 г. Целта на този етап е да се проследят времевите изменения на дозовата мощност, K, eU, eTh и пълния гама-спектр при относително постоянна геометрия на измерване. По този начин се намалява влиянието на позиционни ефекти и се създава възможност за анализ на денонощни и кратковременни вариации.



Фиг. 2. Фотоколаж с основните типове точки: а) външна референтна, б) вътрешна референтна, в) стандартна стая, г) стандартно санитарно помещение

След приключване на продължителния мониторинг са проведени точкови измервания в отделни помещения на сградата. Те включват помещения на първи, втори и трети етаж (фиг. 2в), както и санитарни помещения (фиг. 2г), при които е възможно наличие на по-интензивен въздухообмен, вертикални комуникации и локални пътища за пренос на въздух от по-ниските части на сградата. Измерванията по помещения са използвани за сравнение на пространственото разпределение на естествения гама-фон и основните радиометрични показатели.

Допълнително са проведени контролирани тестове в сутеренното помещение при промяна на вентилационните и баричните условия. Целта на тези тестове е да се оцени дали промяната на въздушния обмен и налягането в помещението води до измерими изменения в дозовата мощност и в радон-чувствителните части на гама-спектра. Тези опити са използвани не като самостоятелна оценка на концентрацията на радон, а като проверка на чувствителността на гама-спектрометричните показатели към условията на въздухообмен и възможен почвено-газов пренос.

Обработка и анализ на данните

След приключване на измерванията данните от гама-спектрометъра са прехвърлени и систематизирани в работна база данни. За всяка измервателна точка са отчетени средните стойности на K, eU, eTh и DR, а за продължителния сутеренен мониторинг са анализирани времевите редове на основните радиометрични показатели. Паралелно с това са разгледани и пълните гама-спектри с цел отделяне на енергийни прозорци, свързани с дъщерни продукти на радона.

Особено внимание е отделено на спектралните интервали, свързани с ^{214}Pb и ^{214}Bi , които са кратковъживеещи дъщерни продукти от разпадната серия на ^{238}U и могат да служат като индиректни индикатори за радон-свързани процеси. В анализа е използван прозорец около фотопика на ^{214}Bi при 1764 keV, като неговото поведение е съпоставено с eU, дозовата мощност и метеорологични параметри, включително атмосферно налягане. За външен контрол на регионалната радиационна обстановка са използвани и данни от постоянни радиометрични станции в района на София, достъпни чрез платформата EURDEP/REMap.

Получените резултати са интерпретирани сравнително: между външна и вътрешна референтна точка, между сутерен и надземни помещения, както и между различни периоди от продължителния мониторинг. По този начин методиката е насочена не към директно определяне на концентрацията на радон във въздуха, а към оценка на относителни пространствени и времеви изменения на радиометричните показатели, които могат да бъдат свързани с повишен потенциал за радоново проникване и натрупване.

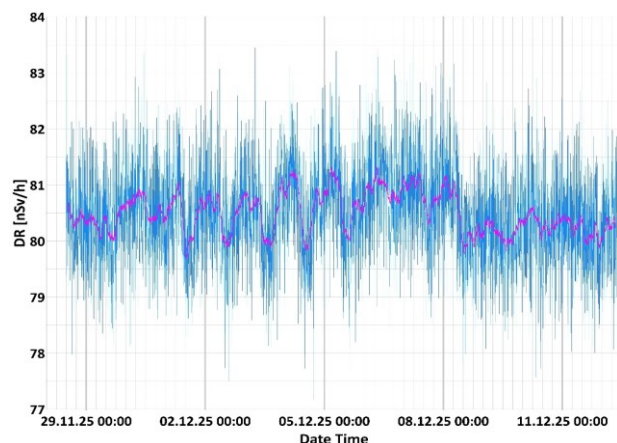
Резултати

Получените резултати показват, че изследваната сграда се характеризира със сравнително стабилни нива на естествения гама-фон. Не са установени резки локални повишения на дозовата мощност или спектрални особености, които да насочват към наличие на аномални изкуствени радиоактивни източници. Основните вариации в регистрираните стойности се свързват с естествените радионуклиди K, U и Th, с различията между отделните помещения и с условията на въздухообмен в сградата.

Референтните измервания извън и вътре в сградата показват по-ниски стойности на дозовата мощност спрямо сутеренното помещение. Външната референтна точка в дворното пространство е характеризирана със стойности на дозовата мощност около 44–54 nSv/h, а вътрешната референтна точка при входната част — около 42 nSv/h. За сравнение, при продължителния мониторинг в сутеренното сервисно помещение средната стойност на дозовата мощност е около 80,5 nSv/h. В същата точка са получени и по-високи средни стойности на радиометричните показатели — K около 3,58%, eU около 6,16 ppm и eTh около 13,34 ppm. Тези различия показват, че сутеренът се отличава от останалите референтни условия както по общия гама-фон, така и по естествената радиоелементна характеристика на средата.

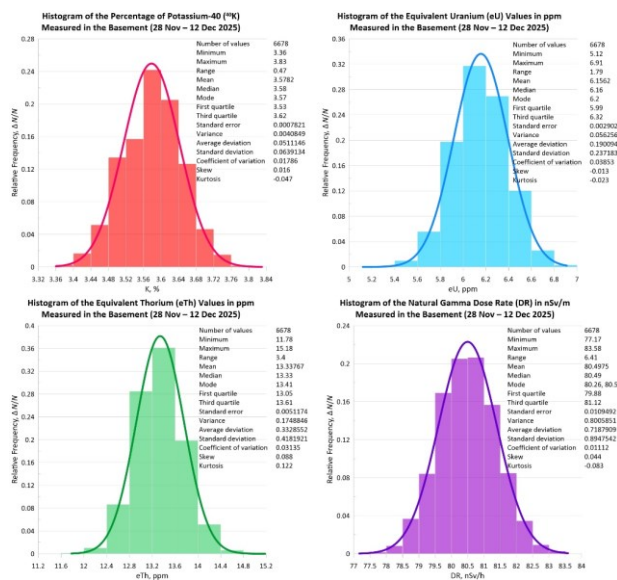
Продължителният мониторинг в сутеренното помещение обхваща периода от 28.11.2025 г. до 12.12.2025 г. и включва 6678 последователни измервания. Времеви ред на дозовата мощност (фиг. 3) показва обща стабилност на фона, без резки аномални отклонения. Въпреки това се откроява слаба, но устойчива денонощна цикличност, най-добре изразена в периода между 30.11 и 09.12.2025 г. В повечето дни се наблюдава относителен минимум около 13:00–15:00 ч., последван от покачване към първи максимум около 18:00–20:00 ч. След това стойностите обикновено слабо намаляват и достигат втори, по-изразен максимум след около 04:00–05:00 ч. Тази цикличност вероятно отразява комбинирано влияние на режима на

използване на сградата, вентилацията, температурно-баричните условия и възможния почвено-газов пренос.



Фиг. 3. Времени ред на дозовата мощност за 14-дневния мониторинг в сутерена на сградата

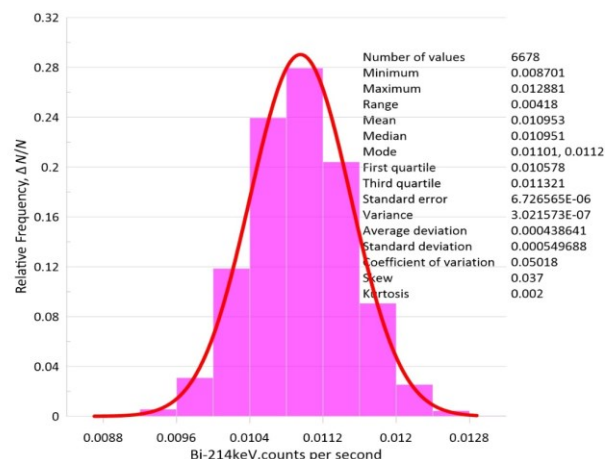
Статистическото разпределение на основните радиометрични показатели K, eU, eTh и DR показва приблизително нормален характер и липса на ясно изразени екстремни стойности. Това потвърждава, че регистрираният гама-фон е доминиран от естествени източници и че наблюдаваните изменения са по-скоро относителни и динамични, отколкото резултат от отделен силен локален източник. Този резултат е важен, тъй като позволява последващият анализ на радон-чувствителните спектрални интервали да се разглежда на фона на сравнително стабилна естествена радиометрична среда.



Фиг. 4. Хистограми на стойностите на K, eU, eTh и DR за измерванията в сутеренното помещение

За оценка на възможни радон-свързани процеси е анализиран спектрален прозорец около фотопика на ^{214}Bi при 1764 keV (фиг. 5). Този пик е свързан с краткоживеещ дъщерен продукт от разпадната серия на ^{238}U и може да реагира на промени в наличността и преразпределението на радон и неговите продукти на разпад. Получените резултати показват, че интензитетът в прозореца около 1764 keV има умерена положителна връзка с еквивалентния уран и с дозовата мощност. Корелационните коефициенти

са съответно около 0,575 за връзката с eU и около 0,602 за връзката с DR (табл. 1). За разлика от това, връзката с K и eTh е много слаба, което подкрепя интерпретацията, че поведението на този спектрален интервал е по-тясно свързано с урановата серия, отколкото с общи вариации на всички естествени радионуклиди.



Фиг. 5. Хистограма на ^{214}Bi индикатора, извлечен от спектралния прозорец 1740–1790 keV за измерванията в сутеренното помещение

Таблица 1. Коефициенти на корелация между основните радиометрични параметри и 1764 keV прозореца (^{214}Bi)

	K	eU	eTh	DR
^{214}Bi	-0.039	0.575	-0.040	0.602

Таблица 2. Коефициенти на корелация между отчетите в 1764 keV прозореца (^{214}Bi) и различни метеорологични параметри при различни времеви закъснения

Времево закъснение	Температура °C	Атм. налягане hPa	Скорост на вятъра km/h	Влажност %
0 min	-0.026912	-0.249355	0.064908	0.158087
30 min	-0.024077	-0.254007	0.076349	0.148018
60 min	-0.012101	-0.257310	0.051863	0.129386
90 min	0.003185	-0.261883	0.062800	0.112118
120 min	0.013426	-0.265497	0.060758	0.133059
150 min	0.009436	-0.271435	0.057199	0.143183

Съпоставката между ^{214}Bi индикатора и метеорологичните параметри показва слаба отрицателна зависимост от атмосферното налягане. Получените корелационни коефициенти са от порядъка на -0,25 до -0,27 при различно времево закъснение между 0 и 150 min. Макар зависимостта да не е силна, устойчивият отрицателен знак е съвместим с възможно влияние на почвено-газов пренос: при по-ниско атмосферно налягане може да се улеснява придвижването на почвен газ към сутеренни пространства, докато при по-високо налягане този процес се ограничава. Връзките с температура, влажност и скорост на вятъра са по-слабо изразени и не показват самостоятелно доминиращ контрол върху радон-чувствителния гама-спектрален индикатор.

Контролните тестове при промяна на вентилационните и баричните условия в сутеренното помещение показват слаба, краткотрайна реакция на радиометричните показатели. Наблюдаваното леко повишение на фона може да се интерпретира като временно освобождаване или преразпределение на радон-съдържащ почвен газ от локални порови пространства, пукнатини или кухини в основата и около сутеренната част на сградата. След преминаване на този кратък преходен ефект стойностите се връщат към обичайния си диапазон. Това показва наличие на динамичен почвено-газов обмен, но в рамките на проведените наблюдения не дава основание да се говори за устойчиво или екстремно натрупване на радон.

Допълнителният радонов монитор, разположен в сутерена, отчита стойности от порядъка на 113 Bq/m^3 за краткосрочната средна стойност и около 149 Bq/m^3 за дългосрочната средна стойност към момента на отчитане. Тези данни не са използвани за количествено калибриране на гама-спектрометричните резултати, но представляват независим ориентир, че в сутеренното помещение е налице измерим радонов фон. Това подкрепя интерпретацията, че част от наблюдаваните изменения в ^{214}Bi индикатора могат да бъдат свързани с радон-свързани процеси.

Интерпретация и дискусия

Получените резултати показват, че преносимата гама-спектрометрия може да бъде използвана като допълнителен инструмент за оценка на радиометричната обстановка в приземни и сутеренни помещения. Предимството на подхода е, че едновременно се получава информация за общия естествен гама-фон, съдържанията на K, eU и eTh, дозовата мощност и пълния гама-спектр. Това позволява да се разграничат обичайни вариации на естествената радиоактивност от по-специфични изменения в спектрални интервали, свързани с урановата разпадна серия и с дъщерните продукти на радона.

В конкретния случай не са установени данни за аномални изкуствени радиоактивни източници. Радиометричните показатели имат сравнително стабилно поведение, а по-високите стойности в сутеренното помещение спрямо външната и вътрешната референтна точка могат да се обяснят с комбинация от естествена радиоактивност на строителната и геоложката среда, пряка връзка с основите на сградата и условия за ограничен въздухообмен. Наличието на комуникационни трасета, фуги и технически отвори допълнително може да създава локални пътища за миграция на почвен газ.

Най-съществен за интерпретацията е анализът на спектралния прозорец около 1764 keV , свързан с ^{214}Bi . Тъй като ^{214}Bi е краткоживеещ дъщерен продукт от разпадната серия на ^{238}U и е свързан с разпада на ^{222}Rn , измененията в този прозорец могат да се разглеждат като индиректен радон-чувствителен индикатор. Умерената положителна връзка на този индикатор с eU и дозовата мощност показва, че той не е случаен шумов ефект, а има връзка с радиометричната характеристика на урановата серия. Същевременно слабата връзка с K и eTh подсказва, че поведението му не се обяснява само с обща промяна на всички естествени радиоелементи.

Слабата отрицателна зависимост между ^{214}Bi индикатора и атмосферното налягане е съвместима с

модел на почвено-газов пренос към сутеренната част на сградата. При по-ниско атмосферно налягане движението на почвен газ към затворени приземни и сутеренни обеми може да се улесни, докато при по-високо налягане този процес се ограничава. Наблюдаваната денонощна цикличност на дозовата мощност вероятно отразява съчетано влияние на този процес с режима на вентилация, температурно-баричните условия и използването на сградата. Поради това тя не трябва да се разглежда като самостоятелно доказателство за повишена концентрация на радон, а като индикатор за динамична радиометрична среда.

Контролните тестове с промяна на вентилацията и налягането допълват тази интерпретация. Слабото краткотрайно повишение на фона може да се свърже с временно разтоварване или преразпределение на натрупан радон-съдържащ почвен газ от локални порови пространства, пукнатини или кухини около сутерена. Последващото затихване на ефекта показва, че газообменът е динамичен и краткотраен. Това подкрепя идеята за наличие на потенциални пътища за почвено-газов пренос, но не показва устойчиво екстремно натрупване в рамките на проведеното изследване.

Важно ограничение е, че гама-спектрометрията не измерва директно концентрацията на радон във въздуха. Радонът е алфа-излъчвател, а регистрираният гама-сигнал е свързан предимно с неговите краткоживеещи дъщерни продукти. Поради това от получените данни не може надеждно да се изведе директна концентрация на радон в Bq/m^3 без специална калибрация, контролирана геометрия и паралелни директни радонови измервания. Допълнителният радонов монитор в сутерена потвърждава наличието на измерими концентрации на радон, но тези данни са използвани само като независим ориентир, а не за калибриране на гама-спектрометричните показатели.

В този смисъл преносимата гама-спектрометрия не замества класическите методи за измерване на радон, но може да ги допълва ефективно. Методът е особено полезен при предварителни обследвания на сгради, при избор на представителни помещения за дългосрочен радонов мониторинг и при открояване на зони с по-висок потенциал за радоново проникване и натрупване.

Заклучение

Проведеното изследване показва, че преносимата гама-спектрометрия може да се използва като полезен неразрушителен метод за предварителна оценка на радиометричната обстановка в приземни и сутеренни помещения. Чрез съвместен анализ на естествения гама-фон, съдържанията на K, eU и eTh, дозовата мощност и избрани радон-чувствителни спектрални интервали могат да се открият пространствени и времеви изменения, свързани с условия за радоново проникване и натрупване.

В изследваната сграда не са установени данни за аномални изкуствени радиоактивни източници. По-високите радиометрични показатели са отчетени в сутеренното помещение спрямо външната и вътрешната референтна точка. Продължителният мониторинг показва сравнително стабилен естествен фон, върху който се проявяват слаба денонощна цикличност и характерно поведение на

спектралния индикатор, свързан с фотопика на ^{214}Bi при 1764 keV.

Умерената положителна връзка на ^{214}Bi индикатора с eU и дозовата мощност, както и слабата отрицателна зависимост от атмосферното налягане, са съвместими с влияние на урановата разпадна серия и почвено-газов пренос върху радиометричната обстановка в сутеренната част на сградата. Тестовите при промяна на вентилационните и баричните условия показват слаба краткотрайна реакция, която може да се интерпретира като временно освобождаване или преразпределение на радон-съдържащ почвен газ от локални пространства около сутерена. В рамките на проведените наблюдения не са получени данни за устойчиво или екстремно натрупване на радон.

Основното ограничение на подхода е, че гама-спектрометрията не измерва директно ^{222}Rn , а регистрира гама-излъчващи негови дъщерни продукти, главно ^{214}Pb и ^{214}Bi . Поради това методът не може да замести директните измервания на радон в Bq/m^3 и не следва да се използва самостоятелно за нормативна оценка на радоновия риск.

Получените резултати показват, че преносимата гама-спектрометрия може да служи като скринингов, сравнителен и интерпретационен инструмент. Тя може да подпомогне избора на помещения за последващ дългосрочен радонов мониторинг и да допълни директните радонови измервания с информация за естествената радиоактивност, радиоелементния състав и динамиката на гама-фона.

Литература

- Пищалов, С., Иванова, В., & Лозенски, И. (1978). *Радиометрия и ядрена геофизика*. Техника.
- Council of the European Union. (2014). *Council Directive 2013/59/Euratom of 5 December 2013 laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation*. Official Journal of the European Union, L 13, 1–73.

- Dentith, M., & Mudge, S. T. (2014). *Geophysics for the mineral exploration geoscientist*. Cambridge University Press.
- El-Taher, A. (2018). *An overview of instrumentation for measuring radon in environmental studies*. Journal of Radiation and Nuclear Applications, 3(3), 135–141. <https://doi.org/10.18576/jrna/030302>
- Erdi-Krausz, G., Matolin, M., Minty, B., Nicolet, J. P., Reford, W. S., & Schetselaar, E. M. (2003). *Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data*. IAEA-TECDOC-1363. International Atomic Energy Agency.
- European Commission, Joint Research Centre. (n.d.). *European Radiological Data Exchange Platform (EURDEP)*. Retrieved December 2025, from <https://remon.jrc.ec.europa.eu/About/Rad-Data-Exchange>
- European Commission, Joint Research Centre. (2025). *EURDEP gamma dose-rate time-series data for station BG0026 Sofia, 27 November–13 December 2025 [Data set]*. European Radiological Data Exchange Platform / REMap. Retrieved December 2025, from <https://remap.jrc.ec.europa.eu/>
- Hernández Santomé, A. C., Sanjurjo-Sánchez, J., & Alves, C. (2025). *Use of hand-held gamma-ray spectrometry to assess decay of granite ashlar in historical buildings of NW Spain (Barbanza, Galicia)*. Journal of Cultural Heritage, 71, 20–29. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2024.10.019>
- Tzankov, C., & Stefanov, B. (2025). *Gamma-spectrometric survey for indirect assessment of radon-related variations in a building at 57 Oborishte Str., Sofia* [Unpublished technical report]. Personal archive of the authors.
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. (2000). *Sources and effects of ionizing radiation: UNSCEAR 2000 report to the General Assembly, with scientific annexes*. Volume I: Sources. United Nations.
- World Health Organization. (2009). *WHO handbook on indoor radon: A public health perspective*. World Health Organization.