

Софийски университет „Св. Климент Охридски“
Физически факултет



ДИПЛОМНА РАБОТА

на

Никол Радостинова Борисова

Специалност „Ядрена техника и ядрена енергетика“

Магистратура: „Ядрена енергетика и технологии“

Катедра: Атомна физика

фак. №3РН3700003

Оценка и определяне на риска за околната среда и
населението вследствие на инциденти и аварии с
хетерогенни радионуклиди

Научен ръководител:

д-р. Николай Бонов

София, юли 2025 г.

Съдържание

1	Въведение.....	3
2	Изисквания за определяне на риска следствие на инциденти и аварии с хетерогенни радионуклиди - Теоретичен обзор	7
2.1	Радионуклиди и тяхната роля	7
2.2	Международни и национални практики и стандарти.....	14
3	Критерии на избор на хетерогенни радионуклиди за изготвяне на анализ за въздействието им върху околната среда и здравето на населението.	18
3.1	Подходи за оценка на риска и критерии за избор на хетерогенни радионуклиди.....	18
3.1.1	Идентификация на опасностите.....	18
3.1.2	Вероятностен анализ.....	19
3.1.3	Последствия при инцидент/авария.....	20
3.2	Критерии за избор на радионуклиди	22
4	Изготвяне на методология за оценка на риска	24
4.1	Цел и обосновка на методологията.....	24
4.2	Основни етапи от оценката на риска	24
5	Сравнителен анализ на избрани радионуклиди	30
5.1	<i>Цел на анализа</i>	<i>30</i>
5.2	<i>Сценарии за анализ.....</i>	<i>30</i>
5.3	Основни механизми на експозиция.....	30
	Изчисление за (критичен 95%):	33
5.4	Обобщение и препоръки	34
6	Заклучение	35

1 Въведение

В съвременния свят ядрените технологии заемат централно място в стратегическите направления на енергетиката, медицината и индустрията. Използването на радионуклиди — нестабилни атомни ядра, излъчващи йонизиращо лъчение — е неразделна част от тези технологии. Те намират широко приложение както в ядрената енергетика, индустриалната дефектоскопия, промишлеността, в медицинската диагностика и терапия. Радионуклидът технеций Te-99m се използва активно в ядрено-медицинските изследвания, а йод I-131 в диагностиката и лечението на заболявания на щитовидната жлеза. (International Atomic Energy, 2018). В промишлеността кобалт Co-60 и цезий Cs-137 се прилагат в гама дефектоскопията, автоматични сензори за дебелина, плътност и нива, както и при контрол на заваръчни съединения. В енергийния сектор уранът U-235 и плутоний Pu-239 са основни ядрени горива, а с помощта на γ -лъчението на кобалт Co-60 се облъчват хранителните продукти. Това се прави с цел унищожаване на патогени, инхибиране на покълване и удължаване на срока на годност, като тази технология е регламентирана и се прилага в множество страни. (Joint FAO/IAEA/WHO Study Group on High-Dose Irradiation, 1999)

Многообразието от радионуклиди, използвани в различни сфери, налага все по-голямата необходимост от ефективни механизми за контрол и управление на риска, особено когато става въпрос за хетерогенни радионуклиди – такива, които се различават по физико-химичните си свойства, произход и активност. Аварии и инциденти, свързани с подобни източници, могат да имат сериозни последици върху околната среда и здравето на населението, особено ако не са адекватно оценени и управлявани. (International Atomic Energy Agency, 2011)

Рисковете произтичащи от експлоатацията на радионуклидите зависят от редица фактори -вида и енергията на лъчението, периода на полуразпад $T_{1/2}$, физическото и химическото състояние, токсичността и възможните пътища за разпространение в околната среда. Идентифицирането на заплахите и оценката на потенциалните последствия изисква систематичен подход, базиран на научно обосновани методологии и международно приети практики.

Всеки отделен промишлен отрасъл има своя дефиниция за риска от аварии, която отразява неговата специфика. Всички обаче, в някаква степен, отчитат двата му

количествени аспекти – честота на нежеланите събития и размер на последствията от тяхната поява.

От гледна точка на технологията, използвана в ядрените централи, рискът от възникване на аварии, се дефинира като „вероятността от възникване на ядрена или радиационна авария за определен период от време е следствие на определена негативна технологична ситуация, природен катаклизъм или резултат от човешка грешка” .

За адекватното управление на риска от възникването на аварии е необходимо той да бъде задълбочено анализиран.

Анализът включва точното формулиране на нежеланото събитие, намирането на начин за количествена оценка на възможността (вероятност/честота) както за появата на това събитие при определени обстоятелства, така и за сериозността на последствията от тази поява.

Математически рискът от възникване на аварии се пресмята като произведение от вероятността/честотата за поява на дадено събитие и размера на последствията от него. Също така може да се представи и като отношение на източника на опасност и взетите мерки за защита.

В България, изискванията за оценка на риска при аварии и инциденти свързани с работа с радионуклиди са регламентирани в Закона за безопасно използване на ядрената енергия (ЗБИЯЕ) и съпътстващите го наредби, като Наредбата за аварийно планиране и аварийна готовност при ядрена и радиационна авария. Наред с това, Международната агенция за атомна енергия (МААЕ) предоставя редица стандарти и ръководства, които определят и конкретизират изискванията към държавите използващи, съхраняващи или експлоатиращи източници на йонизиращи лъчения за определяне на риска, като например GSR Part 7 (IAEA, 2015) и GSG-2.1.

Актуалността на темата, свързана с изготвянето на анализ на риска от въздействието на хетерогенните радионуклиди за защита на населението и опазването на околната среда в случай на ядрена или радиационна авария, в частност усъвършенстване на организационно – функционалната структура, технологичното, информационното, комуникационното и програмното осигуряване, се изразява в:

- съществуването на рискове за населението и околната среда, свързани със създаване на радиационна обстановка и произтичащата от това необходимост от нейното

изясняване, оценка и обследване на контаминирани обекти и територии при провеждане на спасителни и възстановителни аварийни работи;

- необходимостта от събиране, оценка и обмен на данни при възникнала ядрена или радиационна обстановка в съответствие с изискванията на международните документи и българското законодателство при определяне на риска за околната среда и населението;
- възможността чрез въвеждане на съвременни информационни средства и програми за осигуряване на своевременна и достоверна информация за последствията и мониторинга на радиоактивното заразяване;
- реализиране на възможности за изграждане на връзки с министерства и ведомства, които прилагат методологията за оценка на риска по защитата на населението и опазването на околната среда, в случай на ядрена или радиационна авария.

Настоящата дипломна работа е опит да бъде даден отговор на въпросите, произтичащи от тези актуални моменти, както и на определени проблеми, свързани с оценката на риска за функциониращата в РБългария система за защита на населението и околната среда при ядрена или радиационна авария.

В основата на идеята за изготвяне на методологията за оценка на риска за защита на населението и околната среда при аварии и инциденти с хетерогенни радионуклиди е залегнало в използването на програма за изчисляване на източниците на изхвърляне в околната среда и програма за изготвяне на анализи за разпространението на хетерогенните радионуклиди в околната среда, което ще доведе до бърза и точна оценка на радиационната обстановка и качествено определяне на вероятностния риск за околната среда. Определянето на риска за такъв тип събитие се основава на събирането на данни, техния анализ и последваща оценка.

Отчитайки изложеното до тук, целта на настоящата дипломна работа е да се разработи методология за оценка на риска, свързан с аварии и инциденти с хетерогенни радионуклиди, и да анализира въздействието върху околната среда и човешкото здраве. За постигането на целта се решават следните научно-изследователски задачи:

1. Преглед на свойствата и приложенията на радионуклидите с фокус върху хетерогенните източници и въздействието им върху човешкото здраве и околна среда;
2. Изследване на приложимите международни и национални нормативни документи в областта на радиационната защита и аварийното планиране;

3. Формулиране на критерии за подбор на радионуклиди за анализ на риска;
4. Изготвяне на методология за оценка на риска;
5. Провеждане на сравнителен анализ на избрани радионуклиди и представяне на изводи и препоръки, свързани с оптимизацията на ядрената безопасност в български условия.

За нуждите на изследването е използван системният анализ и редица общонаучни изследователски методи, които са в пряка връзка с решаваните задачи.

МАНЕ изисква да се изготви вероятностен анализ на безопасността ниво 3 включващ анализ на радиоактивните последици (оценка на пътищата за разпространение на радиоактивния източник в околната среда, големината на замърсяването и радиологичните ефекти), като по този начин ще се определи и риска за населението и околната среда.

Резултатът от анализите за оценката на безопасността ще ни даде оценка на ранните и късните ефекти върху здравето на хората и на големината на замърсените площи.

Изследването се основава на съвременните ръководства на МАНЕ, регламентиращи изискванията за определяне на риска и от аварии и инциденти с хетерогенни радионуклиди и въздействието им върху околната среда и здравето на човека. Основните документи свързани с анализирането на въздействието на радиоактивните източници следствие на аварийна ситуация и риска от възникване на авария са: GSR Part 7 – Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency (IAEA, 2015), GSG-2.1 – Arrangements for Preparedness и SSG-54 – Accident Management Programmes for Nuclear Power Plants (IAEA, 2019). Тези документи, в комбинация с приетите национални изисквания, формират теоретичната и методологична основа на дипломната работа.

2 Изисквания за определяне на риска следствие на инциденти и аварии с хетерогенни радионуклиди - Теоретичен обзор

Оценката на риска, произтичащ от инциденти и аварии, включващи хетерогенни радионуклиди, представлява съществена част от съвременните стратегии за ядрена безопасност, управление на аварийни ситуации и третиране на радиоактивни отпадъци. Под „хетерогенни радионуклиди“ се разбират радионуклиди с различен произход, физични характеристики (като енергия на излъчване, форма на изотопа, летливост), химична активност и биологично поведение в околната среда и човешкия организъм. Именно това разнообразие в свойствата прави управлението им при инциденти особено сложно и изисква мултидисциплинарен и многопластов подход при оценката на риска.

2.1 Радионуклиди и тяхната роля

Радионуклидите представляват атомни ядра с нестабилна структура, които изпускат йонизиращо лъчение в процеса на радиоактивен разпад. В контекста на риска при аварии, именно видът, енергията на излъчване и периодът на полуразпад са ключови характеристики, които определят потенциалното въздействие върху околната среда и здравето на населението. Една от областите, в която нестабилните ядра са намерили приложения е медицината.

Радионуклидната терапия представлява приложение на терапевтични радиофармацевтици, при което радиоактивни изотопи се насочват към специфични органи или тумори за целенасочено облъчване.

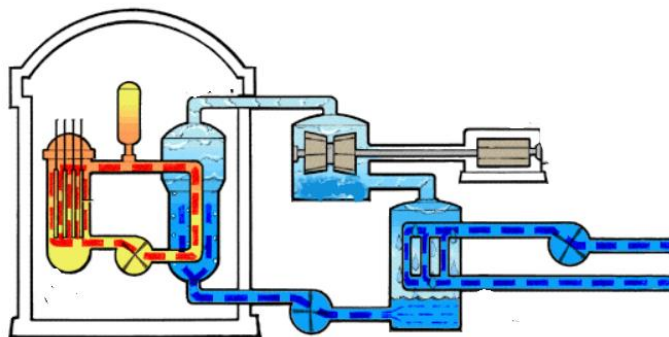
През последните двадесет години радионуклидната терапия се използва широко в различни клинични злокачествени и болкоуспокояващи приложения в медицината. Лечението с радиофармацевтици има предимството да доставя високо концентрирана

абсорбирана доза до целевия тумор, като същевременно щади околните нормални тъкани. Освен това, селективната способност на радионуклидната терапия е предимство при лечението на системни злокачествени заболявания, като например костни метастази, където облъчването на цялото тяло с помощта на външна лъчетерапия е невъзможно. Тъй като прилагането на радионуклиди е минимално инвазивно и продължителността на лечението е по-кратка от химиотерапията, таргетната радионуклидна терапия се е превърнала в един от най-предпочитаните видове ракова терапия. (Yeong, Cheng, & NG, 2014).

Въпреки значителните си предимства, приложението на радионуклиди в медицината не е безрисково. Радиационното облъчване, макар и насочено, може в някои случаи да засегне здрави тъкани, особено при неправилно дозиране или неточна локализация на целта. Използването на радиоактивни вещества изисква специализирани съоръжения и висококвалифициран персонал, което увеличава разходите за лечение. Освен това, радиофармацевтиците често имат кратък срок на годност, което налага строги изисквания за съхранение и доставка. Тези негативни последици могат да доведат до детерминистични ефекти.

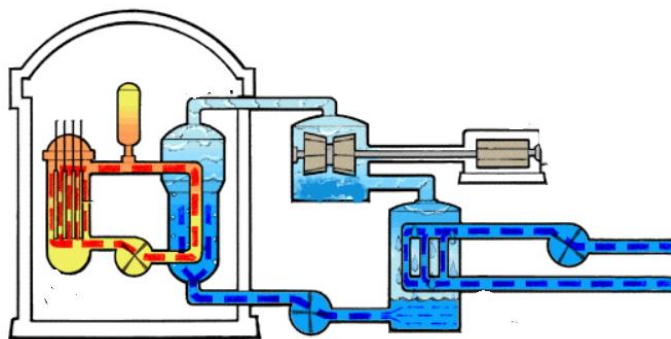
Другата област, в която радионуклидите са от особено важно значение е енергетиката. Ядрената енергия се представя като реална опция в условията на настоящия проблем с изменението на климата и необходимостта от намаляване на емисиите на CO₂. Тази енергия в момента представлява 10% от електрическата енергия, произвеждана в света. През последните осемдесет години в световен мащаб са разработени различни дизайни на ядрени реактори, които могат да бъдат класифицирани според тяхната конфигурация и цели или етапа на поколение. Реакторите ВВЕР-1000 (Водо-воден енергиен реактор, 1000 мегавата електрическа мощност) са едни от най-широко използваните видове ядрени реактори в света. (Fernández-Arias, Vergara, & Orosa, 2020). Този тип реактор използва обогатен уран като гориво и обикновена вода (H₂O) едновременно като охладител и като забавител на неутрони. Горивото се намира в метални таблетки, наредени в активната зона на реактора. Вода под високо налягане циркулира през тази зона, като поглъща топлината, отделена от ядреното делене. За да не кипи, тя се поддържа при налягане около 15.2 МПа. По този начин топлоносителят (водата) не кипи, а пренася топлината към парогенератор, където нагрява втора водна система. Именно в тази втора система водата преминава в пара

и задвижва турбината, която от своя страна върти генератор за производство на



електричество (виж

Фигура 1).



Фигура 1 Схематично представяне на принципа на работа на реактор с вода под налягане (PWR). Ядрената реакция в активната зона (вляво) загрева вода в първичния контур, която циркулира под високо налягане, като предава топлина на вторичния контур чрез парогенератор. Получената пара задвижва турбината, която е свързана с генератор за производство на електричество, след което парата се кондензира и водата се връща обратно в цикъла. Източник: (U.S.NRC, 2017)

Наред с предимствата обаче, ядрената енергетика крие и сериозни рискове. При аварии – макар и редки – последиците могат да бъдат катастрофални, както показват трагичните събития в Чернобил и Фукушима. Освен това, ядрените реактори генерират радиоактивни отпадъци, които трябва да бъдат съхранявани в безопасни условия в продължение на хиляди години. Съществува и риск от разпространение на радиоактивни материали при човешка грешка, терористичен акт или природно бедствие. Изграждането и експлоатацията на ядрени мощности изисква високи първоначални инвестиции, дълъг срок на строителство и комплексна регулаторна рамка.

В световен мащаб най-широко използваните типове ядрени реактори са водно-водните. При експлоатацията и особено при аварийни ситуации, сред основните източници на радиоактивно замърсяване се открояват изотопите на благородните газове и йода. В радиоактивната смес се идентифицират 18 изотопа на криптон (включително ^{85}Kr), 15 на ксенон (сред които ^{133}Xe и ^{135}Xe) и 20 на йода (предимно ^{131}I и ^{133}I), като всички те са с кратки периоди на полуразпад и обикновено присъстват в сравнително малки количества.

Продуктите на делене на ядреното гориво, заедно с радиоактивните вещества, формирани по време на развитието на авария, образуват приблизително 250 различни изотопа. Техните периоди на полуразпад варират от няколко минути до няколко десетки години.

При възникване на ядрена или радиационна авария с изхвърляне на радиоактивни вещества в околната среда, радиационният фон се определя от присъствието на следните компоненти:

- **В радиоактивния облак** се съдържат: благородни газове (^{85}Kr , ^{88}Kr , ^{89}Kr , ^{90}Kr , ^{131}I , ^{132}I , ^{132}Te , ^{133}I , ^{134}I , ^{131}Xe , ^{132}Xe , ^{133}Xe , ^{134}Xe , ^{135}Xe), аерозоли (^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{138}Cs , ^{89}Sr , ^{90}Sr , ^{139}Ba , ^{140}Ba) и тежки частици (^{241}Am , ^{235}U , ^{239}Pu);
- **В почвата** се отлагат същите аерозоли и тежки елементи, които могат да доведат до трайно замърсяване на земната повърхност.

За правилно прогнозиране на потенциалните източници на радиоактивност в околната среда, е необходимо разграничаване между два типа инциденти: **ядрени аварии** и **радиационни аварии**.

При ядрена авария се освобождават значителни количества радиоактивни вещества, натрупани по време на нормалната работа на реактора — включително изотопи на уран (U), плутоний (Pu) и торий (Th), както и продукти от тяхното делене. Тези вещества включват предимно алфа-излъчващи частици и неутронно активни материали.

В случай на радиационна авария, замърсяването обикновено се състои от аерозоли, съдържащи изотопи на цезий (Cs) и барий (Ba), както и от радиоактивни благородни газове — предимно изотопи на ксенон, криптон и йод.

Начинът на разпространение и отлагане на радионуклидите влияе пряко върху дозите на облъчване на населението в засегнатите зони. Дозата на облъчване се формира от погълнатата енергия, отделена от алфа, бета и гама излъчването на радиоактивните елементи, по два основни пътя — вътрешен и външен.

Вътрешното облъчване, което се получава чрез вдишване на радиоактивни изотопи или прием на замърсени храни и вода, представлява около 97% от общата доза и оказва най-сериозно въздействие върху организма. **Външното облъчване** произтича от външно замърсяване на кожата или облъчване от изотопи, попаднали върху повърхността на земята.

След охлаждане, радиоактивните аерозоли се утаяват на повърхността на земята под формата на локални отлагания. С времето те се акумулират в почвата и водните обекти, където оказват влияние върху местната флора и фауна.

Поради това е наложително да се въведе ефективна система за радиационен мониторинг и контрол на замърсяването. Особено внимание трябва да се отдели на изучаването на миграцията на ключови радионуклиди като ^{90}Sr и ^{137}Cs , които представляват сериозна радиоекологична заплаха. Известно е, че ^{90}Sr имитира калция и се натрупва основно в костите, докато ^{137}Cs се държи подобно на калия и се концентрира в мускулната тъкан. Това поведение е от критично значение при оценка на риска и организиране на действия по ликвидиране на последствията от ядрени инциденти.

Нивото и разпространението на радиоактивното замърсяване зависят в значителна степен от атмосферните условия. Радиоактивните аерозоли се пренасят в тропосферата, а при определени обстоятелства и в стратосферата, формирайки замърсяване на различни мащаби в зависимост от радиохимичния им състав и времето на утаяване. (Бонов, 2020)

Хранително вкусовата промишленост е друго звено, в което радионуклидите успешно намират приложение.

Двете основни преки микробиологични ползи от прилагането на ниски дози облъчване върху храни са: подобряване на безопасността на храните – често срещаните бактериални патогени могат да бъдат унищожени, като по този начин се намалява рискът от хранително отравяне и удължаване на срока на годност – броят на жизнеспособните организми, причиняващи разваляне, може да бъде намален, което води до увеличен срок на годност.

В много хранителни приложения и двете ползи могат да се появят едновременно, тъй като дозите, приложени за унищожаване на патогени, ще бъдат ефективни и срещу много организми, причиняващи разваляне. Освен това, може да се получи косвена полза, когато се използва облъчване вместо химикали за намаляване на микробното натоварване на храните. (Patterson, 1990). В международен план гама-лъчението от радионуклидите- ^{60}Co и ^{137}Cs е доказано като безопасна и ефективна технология за удължаване на срока на годност на пресните продукти. Тази технология допълнително инхибира покълването на зеленчуците, растежа на патогени и насекоми, а също така стерилизира зеленчуци и плодове. Гама облъчването с гореспонатите радионуклиди няма нежелани странични ефекти върху храните и не причинява промяна във физикохимичните свойства, включително хранителното съдържание на третирания продукт. Облъчването е обещаваща техника за удължаване на срока на годност и може да допринесе за икономическия растеж на страните чрез износ на качествена продукция. (Shami & Naz, 2019).

Използването на радионуклиди в хранително-вкусовата промишленост има недостатъци. Едно от основните предизвикателства е общественото възприятие – потребителите често възприемат облъчени храни като вредни или "радиоактивни", което води до слабо търсене, независимо от научните доказателства за безопасност. Освен това, при неправилно приложена процедура може да настъпят частични загуби на определени витамини и хранителни вещества. Инсталирането на съоръжения за облъчване е скъпо, а

експлоатацията им изисква спазване на строги регулаторни и радиационни стандарти. Допълнително, при неспазване изискванията за безопасност при използването или съхранението на радиоактивните изотопи, загуба на източник, счупване на капсулата, разхерметизиране и др., може да се стигне до преоблъчване на персонала, включително и до тежки детерминистични здравни ефекти или до стохастични такива, както и радиоактивно замърсяване на околната среда.

Въпреки широкото приложение, което е намерило йонизиращото лъчение в наши дни е важно да се отбележи, че радиационният тероризъм може да бъде разгледан като целенасочено използване на радиоактивни вещества, с цел създаване на радиоактивно заразяване на участъци от околната среда, съоръжения от критичната инфраструктура и облъчване на хората. В контекста на съвременните заплахи от терористични действия, едно от най-вероятните средства за атака с използване на радиоактивни материали е т.нар. „**мръсна бомба**“ – вид радиологично оръжие. Основната ѝ цел не е масово унищожение чрез експлозия, а разпръскване на радиоактивни вещества на ограничен радиус, предизвикване на екологично замърсяване и внушаване на страх сред населението.

Типични изотопи, които могат да бъдат използвани при изграждането на подобни устройства, са цезий-137, кобалт-60 и манган-54, поради своята висока радиоактивност и наличност.

Реалната опасност от подобен сценарий се потвърждава от регистрирани случаи на опити за нелегален внос на радиоактивни материали през последните две десетилетия. Например:

- През май 1999 г. на Дунав мост–1 в Русе е предотвратен внос на обогатен уран-235 (^{235}U);
- През август 2013 г. на пристанище Бургас е задържан опит за внос на цезий-137 (^{137}Cs);
- През октомври 2016 г. на ГКПП Капитан Андреево отново е направен опит за пренасяне на ^{137}Cs .

Основният радиационен риск за хората и околната среда произтича от вдишването на радиоактивни частици, контакт с дим, възникнал от пожар в замърсена зона, както и поглъщане на радионуклиди чрез замърсена храна или вода. Потенциалното въздействие е най-силно в зоната на разпространение на радиоактивния облак, чийто радиус може да варира от няколко метра до няколко километра в зависимост от метеорологичните условия и атмосферната стабилност.

Радиоактивната активност на използваните изотопи е изключително висока, дори при минимални количества материал (Бонов, 2020):

- 1 грам ^{137}Cs има активност от приблизително $3,22 \times 10^{12}$ Bq,
- 1 грам ^{60}Co – около $4,18 \times 10^{13}$ Bq,
- 1 грам ^{54}Mn – приблизително $2,45 \times 10^{14}$ Bq.

Ето защо е важно да се спазват международни изисквания и практики за всеобщата безопасност.

2.2 Международни и национални практики и стандарти

Съгласно международните стандарти на Международната агенция за атомна енергия (МААЕ), всеки оператор на ядрено съоръжение или източник на йонизиращи лъчения е длъжен да извърши предварителна оценка на риска, като част от процеса на лицензиране и аварийно планиране. В документа GSR Part 7 – “Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency” (IAEA, 2015), в Изискване 4: „Оценка на опасността“ (Hazard assessment) се посочва, че държавите трябва да „осигурят провеждането на оценка на опасността, включително вероятността за възникване на ядрени или радиологични инциденти и техните потенциални последствия, за да се определи степента на аварийна готовност и необходимите защитни действия“

Това означава, че при заявяване на разрешение за експлоатация на ядрено съоръжение или използване на хетерогенни радионуклиди, заявителят трябва да представи количествена или качествена оценка на риска. Рискът се разглежда като функция на вероятността за поява на аварийно събитие и тежестта на последствията от него. Именно този принцип – „Риск = Вероятност × Последствия“ – е залегнал в основата на изискванията за аварийно планиране, управление на защита и приоритизиране на защитни действия.

В документа GSG-2.1 – "Arrangements for Preparedness for a Nuclear or Radiological Emergency", се разглежда категоризирането на опасните радиоактивни източници и необходимостта от разработване на адекватни мерки за аварийна готовност. Според този стандарт „опасен източник е такъв, който ако изпадне извън контрол, може да причини сериозни детерминистични здравни ефекти“. Това определение е пряко свързано с разработване на протоколи за реагиране чрез:

- Идентификация и класификация на радионуклидите по потенциална опасност;
- Въвеждане на системи за ранно предупреждение и контрол;
- Изисквания за оборудване, персонал и процедури, които да ограничават риска (напр. екраниране, контейнери, обучение).

Освен това, документът изисква:

1. Разработване на категории за реакция към извънредни ситуации;
2. Определяне на прагова стойност за детерминистични ефекти;
3. Прилагане на подход за подготовка на мерки за реагиране и защита, съобразно опасността

В таблицата по-долу е представен кратък сравнителен анализ на трите ключови ръководства на МААЕ, с фокус върху техните специфични изисквания към оценката на риска и управлението на аварийни ситуации:

<i>Документ</i>	<i>Основна цел</i>	<i>Ключови изисквания</i>	<i>Подход</i>
<i>GSR Part 7</i>	Подготовка и реакция при ядрена или радиационна авария	Национални рамки, аварийни планове, класове на аварии	Оценка на опасностите и разработване на планове
<i>GSG-2.1</i>	Мониторинг, управление и ликвидиране на аварията	Критерии за управление, приключване и възстановяване,	Пост-инцидентна оценка на риска

Таблица 1 Сравнение на основни изисквания в GSR-7, GSG-2.1 и SSG-54. Източници: (IAEA, 2015) (IAEA, 2018) (IAEA, 2019)

След представения сравнителен анализ е важно да се отбележи, че двата документа на МААЕ не само се допълват взаимно, но и изграждат цялостна концепция за справяне с радиационни и ядрени инциденти в контекста на оценката на риска.

България регламентира изискванията на МААЕ чрез имплементирането им в националното си законодателство, като създава законова рамка за контрол и управление в случай на ядрена или радиационна авария. Основният нормативен акт – Законът за безопасно използване на ядрената енергия (ЗБИЯЕ), регламентира задълженията на операторите, лицензирането на дейности с източници на йонизиращи лъчения, и необходимостта от изградена, тествана и въведена в действие система за аварийна готовност за защита на населението и опазването на околната среда.

В допълнение, Наредбата за аварийно планиране и аварийна готовност при ядрена и радиационна авария, приета от Министерския съвет, отразява основните принципи и изисквания на GSR Part 7, включващи оценката на риска от различните типове източници, категоризация на източниците, определяне на зони за защита и необходимите мерки за защита на населението. Наредбата е в сила от 2011 г., с актуализации след 2017 г., които включват също така елементи от GSG-2.1.

България регламентира тези изисквания на IAEA, като ги имплементира в своята нормативна правна рамка, а именно в специализираният Закон за безопасно използване на

ядрената енергия (ЗБИЯЕ) и в Наредбата за аварийно планиране и аварийна готовност при ядрена и радиационна авария.

Изискването на **чл. 16, ал. 1 от ЗБИЯЕ**, е че „лицата, които използват източници на йонизиращи лъчения, са длъжни да осигурят контрол на параметрите на радиационната защита и радиационната обстановка в работната и околната среда“. Това изискване формира основата за оценка на риска, за дейностите свързани с източниците на йонизиращи лъчения при нормална експлоатация и в аварийни условия.

Допълнително, **чл. 19, ал. 2 на закона** изисква, лицензиантът на разрешението за работа с ИЙЛ да предостави допълнителна информация свързана с радиационната защита и оценка на риска. Това задължава лицензиантът на разрешението да използва научнообосновани методики за определяне на риска от инциденти с радионуклиди.

В подзаконовата нормативна база на специализирания ЗБИЯЕ, в **Наредбата за аварийно планиране и аварийна готовност при ядрена и радиационна авария** (приета с ПМС № 20/2011 г.), изискването на **чл. 1** е „да се определят мерки за защита на здравето на населението и околната среда, които се основават на предварителна оценка на радиационния риск, произтичащ от ядрени съоръжения, източници или дейности“.

Допълнително **чл. 2, ал. 1** регламентира „мерките за защита и аварийна готовност се определят на базата на оценка на риска, класификацията на съоръжението или източника и възможните сценарии за авария“.

Тези текстове директно прилагат принципите, заложи в GSR Part 7, където оценката на опасността и класификацията на събитията са основа за планиране.

От гореизложеното се вижда, че българската нормативна база имплементира и прилага международните изисквания за оценка и управление на радиационния риск, както при нормална експлоатация, така и в случай на аварийни събития с източници на йонизиращи лъчения с цел защита на населението и опазването на околната среда.

3 Критерии на избор на хетерогенни радионуклиди за изготвяне на анализ за въздействието им върху околната среда и здравето на населението

3.1 Подходи за оценка на риска и критерии за избор на хетерогенни радионуклиди.

Оценката на риска е комплексен процес, който включва систематично идентифициране, анализ и оценка на потенциалните опасности, както и прогнозиране на вероятността и последиците от инциденти, свързани с радиационната безопасност. Тези подходи са основа за вземане на решения и разработване на мерки за контрол и намаляване на риска.

3.1.1 Идентификация на опасностите

Идентифицирането на потенциални източници на радиационна опасност е първата и най-съществена стъпка в процеса на оценка на риска, свързан с инциденти или аварии, включващи хетерогенни радионуклиди. Целта на този етап е да се извърши задълбочен анализ, чрез който се събират детайлни данни за съоръженията, в които се съхраняват, използват или транспортират радиоактивни материали, както и за условията, при които може да настъпи тяхното неволно освобождаване.

Ключовите компоненти на идентификацията включват определянето на локацията и състоянието на източниците – дали радионуклидите се намират в стабилна конфигурация, под формата на твърд отпадък, течност или газ, или се транспортират в условия, които предполагат повишен риск от инциденти. Наред с това, видът и активността на използваните радионуклиди са от съществено значение – например, дали става дума за високоенергиен гама-излъчващ изотоп като Co^{60} или за бета-емитер с висока биологична усвояемост като Sr^{90} .

Следващият критичен аспект е идентифициране на условията, при които може да настъпи освобождаване на радиоактивни вещества – включително механични повреди, пожари, експлозии, корозия, природни бедствия (земетресения, наводнения), човешки грешки или злонамерени действия. В този контекст, анализът на сценариите се основава на исторически данни, оценка на уязвимости и допускания за най-лошия възможен случай.

Съгласно GSG-3 (IAEA, 2013) „Идентификацията на опасностите е основата за ефективна подготовка при извънредни ситуации и следва да обхваща сценарии с малка вероятност, но с високи последствия“. Това означава, че освен най-вероятните инциденти, трябва да бъдат разглеждани и редки, но критични сценарии, които могат да доведат до значителни последици за общественото здраве и околната среда.

След като бъдат ясно идентифицирани източниците на радиационна опасност и потенциалните сценарии за освобождаване на радионуклиди, следващата стъпка в процеса на оценка на риска е извършването на вероятностен анализ. Този подход позволява количествено или качествено да се оцени каква е възможността за настъпване на различни инциденти, както и тяхната относителна тежест в контекста на радиационната безопасност.

3.1.2 Вероятностен анализ

Вероятностният анализ е втората съществена стъпка в оценката на радиационния риск, като той се основава на количествено или качествено изследване на възможността дадено събитие да се реализира. Докато идентификацията на опасностите определя какво *може* да се случи, вероятностният анализ дава отговор на въпроса *колко вероятно е да се случи*.

Този подход включва събиране и обработка на исторически данни, експертни оценки, моделиране на инциденти и използване на вероятностни разпределения. Целта е да се предскажат честотата и условията на потенциални събития като течове на радиоактивни вещества, повреди в системи за сигурност или човешки грешки в ядрени съоръжения.

Според IAEA (IAEA, 2010), вероятностният анализ (Probabilistic Safety Assessment – PSA) се подразделя на три нива:

- **Първо ниво (Level 1 PSA)** – идентифицира събитията, водещи до загуба на контрол върху ядрената инсталация;
- **Второ ниво (Level 2 PSA)** – оценява поведението на системите след загубата на контрол, вкл. възможностите за задържане на радиоактивни вещества;
- **Трето ниво (Level 3 PSA)** – изчислява последствията за околната среда и населението.

Използването на вероятностни модели е особено полезно при вземане на решения в условия на несигурност. Те дават възможност за сравнение между различни сценарии и подпомагат приоритизирането на мерки за минимизиране на риска. В съвременната практика често се използват софтуерни инструменти като RiskSpectrum, SAPHIRE или HotSpot, които позволяват симулации на сложни системи и предвиждане на аварийни сценарии.

Накратко, вероятностният анализ играе решаваща роля в системния подход за оценка и управление на риска, като осигурява количествена основа за определяне на приоритети и действия.

3.1.3 Последствия при инцидент/авария

Последствията от аварии с участие на радионуклиди могат да бъдат както незабавни, така и дългосрочни, обхващайки различни аспекти – от индивидуалното здраве и обществената безопасност до екологичната и икономическата стабилност на засегнатия регион. Оценката на тези последствия е тясно свързана с характеристиките на самия радионуклид (вида, активността, формата и разпространението му в организма), както и с условията на освобождаване, разпространение и експозиция.

При неконтролирано освобождаване на радионуклиди, едно от основните опасения е вътрешната и външната контаминация на населението. Например, при авария с йод-131, вероятността от поява на заболявания свързани с щитовидната жлеза, включително рак, е значителна – особено при деца и подрастващи (Sanders, 2007). При вдишване или поглъщане на цезий-137 се наблюдава разпределение в меките тъкани, което води до цялостна телесна доза.

Според доклад на Световната здравна организация (World Health Organization, 2013), остро лъчево увреждане (Acute Radiation Syndrome – ARS) може да настъпи при дози над 1 Sv, като симптомите варират от гадене и повръщане до тежки костно-мозъчни поражения. При по-ниски, но продължителни експозиции се увеличава рискът от стохастични ефекти, като онкологични заболявания и генетични мутации. Тези ефекти се характеризират с липса на прагова доза – тоест, дори минимални нива на радиационно облъчване могат да доведат до тяхното развитие. Вероятността за настъпване на стохастичен ефект се увеличава с дозата, но тежестта на ефекта не зависи от нея. Най-често стохастичните ефекти се проявяват под формата на рак или наследствени генетични увреждания, като латентният период – времето между експозицията и проявата на заболяването – може да бъде десетилетия.

От друга страна, съществуват и така наречените детерминистични ефекти, които настъпват само след превишаване на определена прагова доза радиация. За разлика от стохастичните, при детерминистичните ефекти тежестта на увреждането се увеличава с повишаването на дозата. Типични примери за такива ефекти включват радиационни изгаряния, лъчева болест, стерилитет и увреждане на костния мозък. Те се проявяват в кратки срокове след облъчването и са пряко зависими от дозата, получена от организма.

Разграничаването между стохастични и детерминистични ефекти е от съществено значение при оценката на риска и изготвянето на стратегии за радиационна защита, като всяка от категориите изисква различен подход и мерки за контрол.

Околната среда също може да пострада сериозно. Радиоактивното замърсяване на почвата, водата и растителността води до биоаккумуляция на радионуклиди в екосистемите, което може да причини сериозни последици по хранителната верига. Добре документиран пример е аварията в АЕЦ Чернобил, СССР 1986г., при която контаминацията на горски екосистеми в обширни региони на Европа доведе до дългосрочни екологични последици. (UNSCEAR, 2008)

Отвъд здравните и екологичните аспекти, инциденти с радионуклиди често водят до мащабни евакуации, загуба на поминък, стрес и социална дестабилизация. Аварията във

Фукушима, Япония през 2011 г. е показателен пример за социалното и икономическо въздействие дори в страна с висока технологична готовност.

3.2 Критерии за избор на радионуклиди

Приложението на хетерогенните радионуклиди в различните сектори на индустрията – медицина, ядрената енергетика, хранителната индустрия и тероризма – вече беше разгледано. В настоящата точка се поставят специфични критерии за определяне и избор на хетерогенни радионуклиди, които са обект на оценка на риска при инциденти и аварии в различните сфери на индустрията.

Изборът на хетерогенните радионуклиди, трябва да се извършва по строго дефинирани параметри, а именно:

- Физични характеристики на изотопа – период на полуразпад, вид и енергия на излъчване (α , β , γ).
- Радиобиологична токсичност – вътрешно облъчване, натрупване в костите, щитовидната жлеза и др.
- Поведение в околната среда – разтворимост във вода, летливост, сорбция към почва, мобилност в атмосферата.
- Ниво на активност и вероятност за експозиция – реална възможност за излагане на населението при авария.
- Регулаторен и международен приоритет – класификацията на IAEA за източници с висок риск.

Тези критерии позволяват да бъдат подбрани най-релевантните радионуклиди използвани в индустрията, с фокус върху реалната им заплаха върху здравето на човек и замърсяването на околната среда при инциденти или аварии.

От повече от 200 различни изотопа, които се генерират при деленето на ядрата в ядрените реактори, само малка част от тях, могат да окажат реално вредно въздействие върху здравето на населението и замърсяването на околната среда, а също така и да бъдат използвани в другите сфери на индустрията. От изготвените анализи след ликвидирането на Чернобилската авария и аварията в АЕЦ Фукушима, с най-голямо въздействие върху човешкото здраве и замърсяване на околната среда са:

<i>Радионуклид</i>	<i>Период на полуразпад</i>	<i>Вид лъчение</i>	<i>Намрупване</i>	<i>Радиобиологичен риск</i>
Co-60	5.27 години	γ, β^-	Неселективен	Висок при вътрешно облъчване
Cs-137	30.17 години	γ, β^-	Кръв, мускулна тъкан	Висок (продължително външно облъчване)
Sr-90	28.8 години	β^-	Намрупване в костите	Висок – костен рак, левкемия
I-131	8 дни	γ, β^-	Щитовидна жлеза	Висок – тиреоидна токсичност
Am-241	432.2 години	α, γ	Черен дроб, кости	Висок (вътрешно облъчване)

Таблица 2 Сравнително характеристики на хетерогенни радионуклиди.

Таблицата представя сравнителен преглед на основни радионуклиди, които се използват или срещат в различни сфери – от медицината до ядрената индустрия. Изборът на тези хетерогенни източници, с така представените им технически характеристики играят ключова роля за оценка на потенциалното въздействие и възможните нежелани последствия за здравето на населението при инциденти с тях.

Допълнително IAEA, въвежда основни оперативни нива за тези радионуклиди, с цел предотвратяване възникването на стохастични или детерминистични здравни аспекти.

4 Изготвяне на методология за оценка на риска

Оценката на риска, свързан с инциденти и аварии с хетерогенни радионуклиди, изисква използването на структуриран и последователен подход, който да позволява обективен анализ на потенциалните опасности, оценка на вероятността от тяхната поява, както и оценка на последиците за здравето на населението и околната среда. Настоящата методология е разработена в съответствие с изискванията на стандартите по безопасност на Международната агенция за атомна енергия (МААЕ), включени в GSR Part 7 (IAEA, 2015), GSG-2.1 (IAEA, 2018) и GSG-11, както и на добрите практики в оценката на радиационния риск, прилагани от държавите-членки.

4.1 Цел и обосновка на методологията

Целта на предложената методология е да осигури база, въз основа на която да се изчисли риска, който следва да бъде използван при анализ на различни сценарии, свързани с аварии с хетерогенни радионуклиди. Методологията трябва да позволи:

- идентифициране на радиационните опасности, произтичащи от различни източници.
- количествено и качествено определяне на вероятността от инциденти.
- изчисляване на очакваните дози и радиологични последствия.
- класифициране на риска по степен на значимост.
- формулиране на препоръки за превантивни и защитни мерки.

Този подход е особено необходим при хетерогенни радионуклиди, тъй като техните физико-химични и биологични свойства варират в широки граници и изискват индивидуален анализ.

4.2 Основни етапи от оценката на риска

Методологията следва класическата формула:

Определяне елементите на риска Възприет е цифров израз на степенуване на вероятността, експозицията и тежестта на вредата. Възприета е формулата в съответствие с

белгийската практика $P = B \times T$, където се дефинира риска (P) като величина като произведението на трите параметъра – вероятност (B), експозиция (E), тежест на вредата (T)

На тази основа се изгражда системна рамка от стъпки, които се следват при анализа на риска за всеки радионуклид:

Идентификация на радионуклида

На този етап се събират основни данни за радионуклида:

- Период на полуразпад ($T_{1/2}$);
- Вид и енергия на излъчваното лъчение (α , β^- , γ);
- Биологично поведение в организма
- Активност и концентрация на източника;
- Сфери на приложение (медицина, индустрия, енергетика и т.н).

Тази информация позволява предварителна оценка на потенциалната опасност от радионуклида и се използва за по-нататъшни изчисления.

Идентификация на възможни аварийни сценарии

Следващата стъпка включва определяне на потенциалните събития, при които може да се реализира инцидент с участие на съответния радионуклид. Типични сценарии включват:

- Повреда на контейнер;
- Пожар или експлозия в лаборатория или транспортно средство;
- Изпускане поради корозия или техническа грешка;
- Злонамерени действия или терористичен акт;

Оценка на вероятността за настъпване на авария

Класификацията на вероятността от настъпване на инцидент се извършва по четири основни категории:

- **Много ниска вероятност:** Това означава, че вероятността за настъпване на инцидент е по-малка от 1 на 1 000 000 (или $<10^{-6}$ на година). Такива събития се считат за практически невъзможни.
- **Ниска вероятност:** Тук стойностите се движат между 1 на 1 000 000 и 1 на 10 000 ($10^{-6} - 10^{-4}$ на година). Тези събития са редки, но не са изключени.
- **Средна вероятност:** В този диапазон попадат събития, чиято вероятност е между 1 на 10 000 и 1 на 100 ($10^{-4} - 10^{-2}$ на година). Те могат да се случат при определени условия и не са необичайни.
- **Висока вероятност:** Това са събития, които имат вероятност по-голяма от 1 на 100 (или $>10^{-2}$ на година). Те могат да настъпят дори при нормална експлоатация и изискват по-строг контрол.

Класификация на инициращи събития по вероятност и доза

Съгласно Националния план за защита при бедствия, 2010 г, връзката между вероятността от възникване на инцидент или авария и последващата тежест за здравословното състояние за населението от този тип събитие (дозови критерии) се класифицира в пет класа събития. За всеки клас събитие са определени граници за ефективната доза и еквивалентната доза за щитовидна жлеза, при които е необходимо да бъдат предприети съответните защитни мерки за предпазване здравето на населението. Интерфейса между класа на събитието, вероятността от възникване и получената тежест са представени в таблица 3 (Бонов, 2020).

Клас събитие	Вероятност f (събитие x реактор-1 x година-1	Ефективна доза (mSv)
--------------	--	----------------------

1	$10^{-2} \leq f < 1$	0.5	Еквивалентна доза на щитовидна жлеза
			5
2	$10^{-3} \leq f < 10^{-2}$	5	50
3	$10^{-4} \leq f < 10^{-3}$	50	100
4	$10^{-5} \leq f < 10^{-4}$	100	1000
5	$f < 10^{-5}$	500	2500

Таблица 3

Таблица 4 Наредба № 32, 2005 г., Приложение № 6, дозовият коефициент за щитовидната жлеза при инхалация на I-131.. (Бонов, 2020)

<i>Ефективна доза, mSv</i>	<i>Тежест на последствията</i>
0,5	Не се изисква
5	Укриване
50	Евакуация
100	Стохастични ефекти
1000	Детерминистични ефекти

Оценка на риска

Комбинирането на вероятността за настъпване на авария и тежестта на последствията води до класификация на риска в различни нива. В зависимост от комбинацията, резултатът може да бъде:

- **Пренебрежим риск (под 1%):** Това е възможно, когато и вероятността, и последствията са много ниски. Обикновено не се изискват конкретни действия.
- **Нисък риск (1–5%):** Възниква при ниска до средна тежест на последствията и при малка или средна вероятност. Такива рискове изискват мониторинг, но не непременно спешни мерки.

- **Среден риск (5–20%):** Комбинация от средна вероятност и/или последствия. Налага се допълнителен контрол и евентуални подобрения в безопасността.

- **Висок риск (20–50%):** Може да възникне както при висока вероятност с умерени последствия, така и при умерена вероятност с тежки последствия. Изисква значителни мерки за ограничаване.

- **Критичен риск (над 50%):** Това е най-високото ниво и се характеризира с висока вероятност и сериозни последствия. Изисква незабавни действия, строга превенция и готовност за реакция.

Препоръки и защитни мерки

На последния етап се изготвят конкретни предложения за превенция и реагиране:

- Защита чрез физически бариери (екрани, контейнери);
- Организационни мерки – аварийно планиране, маркировка, етикетирание;
- Използване на автоматични детектори и дистанционно управление;
- Аварийна готовност – персонал, обучение, евакуационни планове;
- Мониторинг и симулации чрез софтуерни инструменти.

Разработената методология следва да се прилага от операторите на съоръжения и дейности, включващи използване, съхранение или транспортиране на хетерогенни радионуклиди. Това включва предприятия от индустриалния сектор, здравни заведения с радиофармацевтични приложения, енергийни обекти, както и оторизирани доставчици на радиоактивни източници. Същата може да бъде използвана и от компетентните регулаторни органи, в т.ч. Агенцията за ядрено регулиране (АЯР), при издаване на лицензии, извършване на инспекции или проверка на аварийни планове и системи за безопасност.

Предложената методология е създадена в съответствие с международните стандарти на МААЕ – GSR Part 7 и GSG-2.1, както и с националните изисквания изложени в Закона за безопасно използване на ядрената енергия и Наредбата за аварийно планиране и аварийна готовност при ядрена и радиационна авария. Тя може да служи като основа за предварителна оценка на безопасността, планиране на защитни действия и оптимизиране

на аварийната готовност в различни институционални, медицински и индустриални контексти.

5 Сравнителен анализ на избрани радионуклиди

В настоящия раздел се представя сравнителен анализ на избрани радионуклиди, които са от особено значение в контекста на ядрени аварии и инциденти. Изследвани са радионуклиди, които могат да бъдат освободени в околната среда и да предизвикат непосредствени или дългосрочни рискове за здравето на населението и екосистемите. Анализът за тежестта на последствията за населението и околната среда, се базира на моделиране със софтуера **HotSpot**, който позволява симулация на разпространението на радиоактивен облак и оценка на дозовото натоварване при различни сценарии.

5.1 Цел на анализа

Целта на сравнителния анализ е да се идентифицират ключовите особености на всеки радионуклид, да се оценят потенциалните пътища на експозиция, да се определят мащабите на въздействие върху околната среда и населението, и да се формулират адекватни препоръки за управление на риска.

5.2 Сценарии за анализ

Разгледани са два хипотетични, но реалистични сценария, вдъхновени от исторически аварии:

- **Сценарий 1:** Авария в ядрена електроцентрала от типа на Чернобил или Фукушима, водеща до разтопяване на горивото и изхвърляне на радиоактивни продукти;
- **Сценарий 2:** Детонация на "мръсна бомба" (Radiological Dispersal Device, RDD) в градска среда, подобна на симулиран инцидент в Лондонското метро през 2016 г.

5.3 Основни механизми на експозиция

В условия на авария основните пътища на експозиция са:

- Вдишване на радиоактивен аерозол и прах;
- Поглъщане на замърсена храна или вода;
- Външно облъчване от радиоактивни отлагания;

- Индиректно облъчване чрез замърсени повърхности и материали.

Ефекти при авария в ядрена електроцентрала

При тежка авария с разтопяване на активната зона на реактора се очаква изхвърляне на значително количество радионуклиди, включително йод-131 и цезий-137. Това води до:

- Замърсяване на почви, водоеми и атмосфера;
- Висок риск от стохастични или детерминистични ефекти (онкологични заболявания или лъчева болест и летален изход);
- Необходимост от дългосрочна евакуация на населението;
- Трудности при ремедиация на засегнатите територии.

Регулаторните изисквания на EUR-19841 EN, (Бонов, 2020) за изхвърляне на радиоактивни изотопи в околната среда в случай на тежка авария в атомна електроцентрала представляват:

	Очаквано изхвърляне	Консервативно
Изотопи	Общо (%)	Общо (%)
¹³¹ I	0.65	2.5
¹³⁷ Cs	2.0	3.3

Ефекти при взрив на "мръсна бомба"

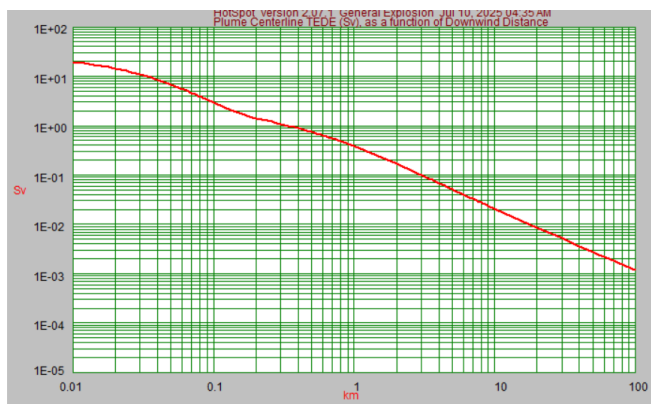
При взрив на RDD (мръсна бомба), основният риск за населението възниква от:

- Вдишване на радиоактивни частици;
- Дългосрочно замърсяване на градската среда;
- Вторични пожари и разпространение на замърсители;
- Замърсяване на храна и вода.

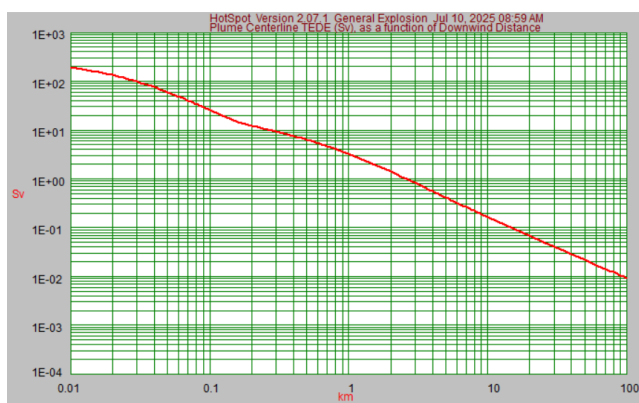
Граници за евакуация и временно преселване на населението от центъра на взрива на мръсна бомба (Бонов, 2020)

Изотоп	Граница за евакуация	
	1 г	1 кг
^{137}Cs	7 м	553 м
^{60}Co	22 м	3880 м
Mix	28 м	7220 м

В конкретната подточка са представени генерирани графики, показващи разпределението на тоталната ефективна доза (TEDE) спрямо разстоянието от източника, като са използвани модели от типа „General Explosion“. Такава визуализация подпомага точната преценка на дозовото натоварване за населението и засегнатите зони при аварийни сценарии с изхвърляне на Cs-137 и Co-60 в околната среда.



2 Зависимост на **тоталната ефективна доза (TEDE, в Sv)** по оста на радиоактивния облак спрямо разстоянието от източника (в km), при модел „General Explosion“ при тежка авария.. Графиката е генерирана чрез софтуера **HotSpot v2.07.1..**



3 Зависимост на **тоталната ефективна доза (TEDE, в Sv)** по оста на радиоактивния облак спрямо разстоянието от източника (в km), при модел „General Explosion“ с радионуклиди **Co-60, Cs-137** при **мръсна бомба**. Графиката е генерирана чрез софтуера **HotSpot v2.07.1.**

Оценката на риска се прави с помощта на дадената по-горе формула.

Изчисление за Cs-137 и Co-60 -висок риск 40%.

Изчисление за радионуклиди при тежка авария -критичен риск 95%.

Изчислените стойности на риска позволяват пряко свързване с дефинираните в методологията прагове за действие в дипломната работа. Тези резултати подчертават важността на предварителна оценка, категоризация и съобразени мерки според класификацията на риска, предложена в точка 4.

5.4 Обобщение и препоръки

Анализите показват, че при различните сценарии и радионуклиди рискът за населението и околната среда може да варира от стотици метри до няколкостотин километри, съответствие с изискванията с Международното законодателство.

Препоръчва се при всяко съхранение, експлоатация или транспорт на такива радионуклиди, да се прилага предложената методология за оценка на риска посочена в раздел 4, а за всички сценарии с изчислен **риск над 5%** (т.е. среден риск и нагоре), да се предприемат съответните задължителни защитни мерки съгласно нормативната база.

6 Заключение

Настоящата дипломна работа разглежда комплексния процес по оценката и управлението на риска от инциденти и аварии с хетерогенни радионуклиди. Разработената методология в глава 4, базирана на утвърдени международни стандарти и изискванията на националното законодателство, предлага надежден и приложим подход за оценка на радиационния риск при различни сценарии.

Сравнителният анализ в глава 5 върху избрани радионуклида изобразява вероятността за достигане на голяма ефективна и еквивалентна доза, което ще доведе до необходимост от прилагане на защитни мерки за защита здравето на населението и опазване на околната среда.

Резултатите показват, че използването на обективни критерии като доза, вероятност и тежест е ключово за ефективното аварийно управление. Съгласно разгледаните сценарии за тежка авария и инцидент с мръсна бомба показват, че методологията може да послужи като инструмент за бърза и ефективна оценка, което ще доведе до правилно взимане на решения за защита на населението при такива типове аварии.

В бъдеще, прилагането на методологията трябва да бъде интегрирана със съответните програмни продукти за навременно оценяване на риска за прилагане на съответните защитни мерки за реакция на национално и международно ниво.

Дипломната работа подчертава важноста за оценките на риска при такива типове аварии с хетерогенни радионуклиди и включването им в различни сценарии.

Разработената методология предлага стабилна рамка, която може да се използва от оператори, регулатори и специалисти в ядрената безопасност за вземане на обосновани решения и минимизиране на последствията от потенциални аварии.

Библиография

1. (2007). *An evidence-based review of poorly differentiated thyroid cancer*. Worlfd.
2. Aprilliani, D. C. (2022). *IAEA safety standards: Preparedness and response for a nuclear or radiological emergency involving the transport of radioactive material*.
3. Fernández-Arias, P., Vergara, D., & Orosa, J. (2020). *A Global Review of PWR Nuclear Power Plants*.
4. IAEA. (2010). *Development and Application of Level 1 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants Specific Safety Guide*. International Atomic Energy Agency.
5. IAEA. (2013). *he Safety Case and Safety Assessment for the Predisposal Management of Radioactive Waste (IAEA Safety Standards Series No. GSG-3)*.
6. IAEA. (2015). *Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency*.
7. IAEA. (2018). *Arrangements for the Termination of a Nuclear or Radiological Emergency*.
8. IAEA. (2019). *Protection Strategy for a Nuclear or Radiological Emergency*.
9. International Atomic Energy. (2018). *Radiation protection and safety of radiation sources: International basic safety standards(GSR Part 3)*.
10. International Atomic Energy Agency. (2011). *Arrangements for Preparedness for a Nuclear or Radiological Emergency (General Safety Guide (GSG))*.
11. Joint FAO/IAEA/WHO Study Group on High-Dose Irradiation. (1999). *High-dose irradiation: Wholesomeness of food irradiated with doses above 10 kGy*. World Health Organization. Извлечено от <https://iris.who.int/handle/10665/42203>
12. OECD/NAE. (2001). *Scenario development methods and practice*.
13. Patil, P., & Amir, S. T. (2021). *FEP Based Model Development for Assessing Well Integrity Risk Related to CO2 Storage in Central Luconia Gas Fields in Sarawak*.
14. Patterson, M. (1990). *The potential for food irradiation* .
15. Sanders, E. M. (2007). *An evidence-based review of poorly differentiated thyroid cancer*. World Journal of surgery. doi:10.1007/s00268-007-9033-3
16. Shami, K., & Naz, S. (2019). *Analyzing the Effects of Gamma Radiation (Cobalt-60) on the Shelf*. BioScientific Review (BSR). doi:<https://doi.org/10.32350/BSR.0101.01>
17. U.S.NRC. (2017). *The Pressurized Water Reactor (PWR)*.

18. UNSCEAR. (2008). *Sources and Effects of Ionizing Radiation*.
19. World Health Organization. (2013). *Health risk assessment from the nuclear accident after the 2011 Great East Japan Earthquake and Tsunami, based on a preliminary dose estimation : executive summary*. Geneva.
20. Yeong, C., Cheng, M., & NG, K. (2014). *Therapeutic radionuclides in nuclear medicine: current and future prospects*.
21. Бонов, Н. (2020). *Усъвършенстване на системата за защита на населението при ядрена и радиационна авария*.