

Нуклеарна форензика – методе за откривање процеса производње, прометовања и кријумчарења недозвољених фисионих материјала

Срећко Илић¹, Радован Радовановић¹, Саша Милић², Александар Алексић², Александар Ивковић¹

¹ *Криминалистичко-полицијски универзитет – департман форензичког инжењерства*

² *Факултет за дипломатију и безбедност*

Апстракт. Савремена технологија са собом доноси савремена и моћна оружја, али и бојазан да она могу бити употребљена ван међународних договора, протокола и обичаја ратовања. Као последица развоја нуклеарних технологија, појавио се нуклеарни тероризам, а нуклеарна форензика је област форензичког инжењерства која се, у садејству са другим традиционалним форензичким методама, бави реконструкцијом догађаја који су претходили неком нуклеарном инциденту или катастрофи. Методологије и мерне методе нуклеарне форензике се користе за откривање кријумчарења и недозвољене производње специјалних фисионих материјала, који су основе језгара у атомским и хидрогенским бомбама. У раду ће бити разматрано више метода са циљем њихове категоризације и систематизације, а детаљно ће бити описане гама-спектрометријска метода, различите методе масене спектрометрије и рендгенска флуоресцентна спектрометрија. Циљ рада је да укаже на значај нуклеарне форензике у имплементацији нуклеарних безбедносних режима, како на локалном, тако и на глобалном нивоу.

Кључне речи: нуклеарна форензика, тероризам, оружје, криминал, инциденти, безбедност

Увод

Открићем нуклеарног наоружања и његовом применом на бојном пољу, у јапанским градовима Хирошима и Нагасаки променио је погледе на обичаје ратовања али и политику и дипломатију. Управо због ове чињенице, данашњи актери на међународној дипломатско-политичкој сцени морају да се обраћају бираним речима једни другима и да њихова дела буду умерена колико год је то могуће. Државе које имају програме нуклеарног наоружања, у једном моменту су, схвативши опасност у којој се свет налази, иницирале механизме за заустављање ширења нуклеарног

наоружања. Тек неколико држава је након тога успело у намери да зварши већ започет нуклеарни програм. Те државе су, заједно са свим осталим које немају нуклеарно наоружање, под будним оком међународне заједнице и МААЕ – Међународне агенције за атомску енергију (*енг.* "IAEA – International Atomic Energy Agency" [1]), проблем је у томе што правни оквири нису у потпуности обавезујући, па су механизми за деловање МААЕ веома сужени.

Чињеница да смо пар држава има нуклеарно наоружање и да је оно инсталирано на територијама неколико других, рекло би се да смо прилично безбедни, али тај простор је попунио нуклеарни тероризам, као стална претња за безбедност незаштићеног становништва било где у свету. У домену је фантастике да терористи могу да дођу до нуклеарног оружја, али они нуклеарне материјале користе у друге сврхе, о чему ће даље у раду бити речи.

Анализом нуклеарних материјала форензичари настоје да установе како, када или где су материјали направљени, односно за шта су коришћени [3, 4]. Треба истаћи да су нуклеарни форензички алати веома значајни за нуклеарне инспекторе приликом у откривања изотопа који се користе приликом конструисања нуклеарног оружја. Ово се односи на инспекцијске надзоре приликом испитивања тврдњи да ли је нека држава покушала да развије или тестира нуклеарни борбени програм и тиме нарушила неки од споразума које је потписала или обогаћује материјал за производњу електричне енергије.

Међународни споразуми о неширењу нуклеарног наоружања

Најзначајнији споразум у домену забране нуклеарне безбедности је Споразум о забрани ширења нуклеарног наоружања (*енг.* "NPT – Non-Proliferation Treaty"). Донет је 1968. године, а

ступио је на снагу 1970. године. Споразумом је као најважније издвојено да је предвиђено да дође до престанка ширења нуклеарног оружја, да дође до укидања ове врсте наоружања и да се појача свеобухватна сарадња у циљу ширења знања везаних за мирнодопске примене нуклеарне енергије. Такође, предвиђено је да МААЕ има улогу у контроли спровођења тачака и контроле коришћења нуклеарне енергије. Ово је веома битна ставка за нуклеарну форензику. Наиме, све потписнице се обавезују да ће МААЕ обезбедити увид у нуклеарна истраживања и производњу и размену фисионих материјала у мирнодопске сврхе. Ове ставке указују на то да би се контрола спроводила управо коришћењем нуклеарних форензичких метода, јер се радионуклиди који се за производњу наоружања (недозвољени фисионих материјали) разликују од оних који се користе у мирнодопске сврхе (дозвољени), те би се форензичком контролом и инспекцијским надзором врло лако могло открити уколико нека држава под велом производње нуклеарне енергије тежи да развије нуклеарни борбени програм.

Други по важности је Свеобухватни споразум о забрани нуклеарних проба (*енг.* – "CTBT - Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty"). Споразуму су претходили неки о делимичној забрани нуклеарних проба, али је овим Споразумом који је донет 1996. године и дефинитивно завршено са нуклеарним пробама. Било је ту и тамо неколико инцидената, односно кршења Споразума, понајвише од стране С. Кореје, али су нуклеарне пробе од стране оних који су их највише изводили и дефинитивно престале.

Поред ова два споразума постоји низ билатералних споразума између САД и Русије. Свим тим споразумима се подразумева редуковање нуклеарног наоружања. Сваки од њих је одиграо неку улогу, али се заправо ништа круцијално, по питању укидања нуклеарног оружја, до данас није десило.

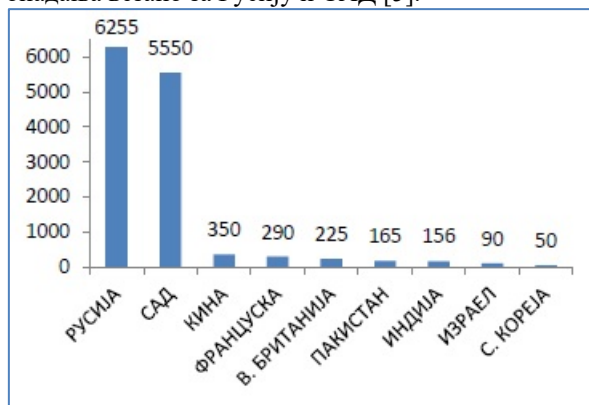
За ову тему значајан акт је свакако Међународна конвенција о спречавању аката нуклеарног тероризма (*енг.* "CNT – International Convention for the Suppression of Acts of Nuclear Terrorism") из 2005. године. Конвенцијом је дефинисан низ аката који се сматрају нуклеарним тероризмом, али је и гарантована помоћ МААЕ у сузбијању ове врсте тероризма, као и решавању кризних ситуација и уклањању непожељних материјала са територије угрожене државе.

Безбедносни акти које нисмо посебно описали, редом према времену доношења или предлагања, су: Повеља о Антарктику (1959), Споразум о делимичној забрани нуклеарних проба (1963), Споразум о космосу (1967), Споразум о

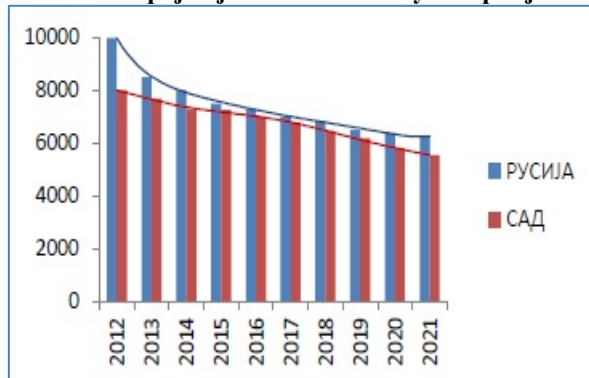
забрани смештања нуклеарног и другог оружја за масовно уништење на дно мора и океана и у њихово подземље (1971), Споразум о Месецу (1979) и Споразум о забрани одређених фисионих материјала (1993).

Тренутно стање у вези са бројем нуклеарних бојевих глава у свету

Од открића нуклеарног наоружања, кроз читав "Хладни рат", па све до данас, Русија и САД су биле водеће војне силе гледано према квантитету нуклеарних бојевих глава. Тренутни тренд у вези са бројем нуклеарних глава у свету можемо видети на графику [5]. Што се тиче тренда раста или опадања, праћењем квантитета бојевих глава у свету, може се уочити да Русија и САД из године у годину смањују број бојевих глава, док остале нуклеарне силе повећавају своје нуклеарне арсенале. Међутим, како остале нуклеарне силе у збиру имају око 10 пута мање бојевих глава од САД и Русије заједно, а тај однос је раније умео да буде и дупло већи, јасно је да је нуклеарно разоружавање у рукама две водеће силе и зато су нам оне, у смислу анализе, најбољи показатељ параметара раста или пада. Тренд опадања везано за Русију и САД [5].



Слика 1. Број бојевих глава по нуклеарној сили



Слика 2. Однос нуклеарних бојевих глава Русије и САД током последњих 10 година

*Систем инспекцијског надзора у оквиру
Међународне агенције за атомску енергију*

Оснивањем Међународне агенције за атомску енергију и изгласавањем њеног Статута 1957. године, било је предвиђено да постоји инспекцијски надзор који би обухватао низ техничких мера којима се врши праћење обавеза држава да не користе нуклеарне мирнодопске системе за развој нуклеарног наоружања, што је забрањено тачком 5. става А, члана 3. Статута. Инспекторски систем на неки начин представља извршно тело у оквиру нуклеарних безбедносних режима. На оснивање инспекцијског система се чекало две године. Договорен је у Канади 1959. године, међутим, документ који је регулисао рад овог тела се чекао још толико. Године 1961. потписан је први документ који је регулисао процедуре за аплицирање и упутства за рад „IAEA“ инспектора. Овај документ је познат под називом „INFCIRC/26“, а након допуне, 1965. године, заведен је под називом „INFCIRC/66“. Када је 1970. године на снагу ступио Споразум о забрани ширења нуклеарног наоружања, створили су се услови за „озбиљније“ деловање Агенције, што је 1971. године, довело до увођења новог „INFCIRC/153“ документа о инспекцији, који је пре свега увео Свеобухватан инспекцијски надзор (*енг.* CSA – Comprehensive Safeguards Agreements). Он је дефинисао начин сарадње између Агенције и држава потписница и то, пре свих, држава које нису декларисане нуклеарне силе, а имају установе које користе нуклеарну енергију у мирнодопске сврхе. Ове државе су се, потписивањем документа, обавезале на свеобухватан инспекцијски надзор од стране „IAEA“ на својој територији, те да ће омогућити инспекторима све податке који су у вези са нуклеарним постројењима и применом радионуклида у било којој области. У оквиру истог акта дефинише се Протокол о малим количинама, који се односи на државе које не поседују велика нуклеарна постројења него имају јако мале количине нуклеарних материјала или их немају уопште. Наиме, њиме се уређује да у државама које потпишу Протокол Агенција нема сталан инспекторски надзор. С друге стране, Протокол не искључује установљене обавезе према Агенцији и разним потписаним споразумима. Дакле, држава која је приступила Протоколу се одриче великих нуклеарних истраживања, што је чини изузетом од сталне инспекторске контроле, али мора да пошаље извештај Агенцији о свим радионуклидима које поседује или жели да набави, као и да одговори на све прописане захтеве „IAEA“ уколико за тим постоји потреба.

Деловање инспектора Агенције у циљу спречавања ширења нуклеарног наоружања у основи се може поделити у четири групе, сакупљање и процена информација, унапређење сарадње са државама, планирање, спровођење и унапређење свих активности, укључујући и рад на терену, као и деловање командног центра у Бечу и доношење закључака и њихово представљање.

Агенција у оквиру инспекторских послова прикупља велики број информација. Извори из којих се долази до њих могу се поделити у три групе:

- 1) информације које је обезбедила сама држава у којој се врши надзор (извештај државе о нуклеарним активностима и радиоактивним материјалима),
- 2) информације које су произашле из података са терена (прикупљени узорци) и обраде у командном центру (подаци из прикупљених узорака, али и они добијени помоћу детектора и камера постављених у нуклеарним постројењима широм света),
- 3) информације из других релевантних извора као што су отворени извори (интернет и други) и они које је доставила трећа страна.

Информације из свих извора морају бити међусобно конзистентне. У супротном Агенција је принуђена да са државом превазилази проблем кроз низ консултација, али и увођењем посебних мера уколико је то неопходно.

Услед немогућности Агенције да, заједно са својим инспекторима, одговори на изазове који су пред њу постављени, дошло је до потребе да се уведе Додатни протокол (INFCIRC/540) у оквиру механизма који се спроводе у циљу поштовања Споразума о забрани ширења нуклеарног наоружања. Овај Протокол Агенцији и њеним инспекторима проширује овлашћења и омогућава већа права на информације од значаја, те лакше откривање забрањених нуклеарних активности. Додатни протокол је донет 1997. године.

**Нуклеарна форензика – организације,
лабораторије и методе**

Нуклеарна форензика је релативно млада област форензике. Свој нагли развој је почела да доживљава развојем нових технологија и то крајем прошлог века, да би у 21. веку доживела потпуни процват. Далеко од тога да неке методе које она

користи нису постојале и раније и далеко од тога да нису постојали начини за откриће забрањених нуклеарно-безбедносних активности, али она тада просто није била установљена као дисциплина, а њене методе нису биле свеобухватне као данас. У нека старарија времена, просто су се користиле методе нуклеарне физике у циљу откривања недозвољених активности. Данас постоји низ организација широм света које раде на јачању ове научне дисциплине, а једна од њих је и МААЕ. Нуклеарна форензика је једини практичан механизам којим се може деловати у циљу спречавања кршења нуклеарних безбедносних режима и ширења нуклеарног наоружања.

Релевантне организације

Иако је МААЕ кровна организација по питању нуклеарне безбедности, она ипак није кровна организација која ради на примени и развоју нуклеарне форензике. Најрелевантнија организација на светском нивоу је МТРГ – Међународна техничка радна група за нуклеарну форензику (*енг.* "ITWG – The Nuclear Forensics International Technical Working Group"). Сматра се да је Радна група основана 1995. године, иако је активно учешће у развоју програма узела тек двадесетак година касније (2016.). Она броји више од 50 земаља потписница, међу којима је и Србија, као и 11 релевантних међународних организација, међу којима је и МААЕ, али и ИНТЕРПОЛ, ЕУРОПОЛ и ОЕБС. Такође, на списку организација је и Глобална иницијатива за борбу против нуклеарног теоризма (*енг.* "GICNT – Global Initiative to Combat Nuclear Terrorism") која се убраја у значајне чиниоце у борби против злоупотребе нуклеарних материјала, а самим тим и у развоју нуклеарне форензике и њених метода. Ова организација се састоји од три групе, од којих је једна Радна група за нуклеарну форензику (*енг.* "NFWG – Nuclear Forensics Working Group") чији главни циљеви леже у охрабрењу држава да формирају националне нуклеарно-форензичке лабораторије и националне нуклеарно-форензичке библиотеке [6].

Међународна техничка радна група је подељена у више мањих група. Свака група има своје деловање. Поред Групе за прикупљање доказа, веома је активна и Група за вежбе. Примарни циљ овог сектора је повећање спремности лабораторија за поступање у случају потреба. Пре договореног састанка Групе, свака лабораторија добија радиоактивни узорак за који треба да изврши анализу коришћењем метода нуклеарне форензике. Група инсистира на анализама које се врше у року од 24 часа од добијања узорка, затим након 7 дана и

последња након 2 месеца. Након тога се сви учесници састају и размењују искуства уз дискусију. Постоје још и Група за смернице, која ради на развоју техничких докумената ове организације, затим Група за формирање националних библиотека за нуклеарну форензику и Група за тренинге, која пружа помоћ у развоју нуклеарне форензике државама и организацијама које то затраже [6].

Методе нуклеарне форензике

У различитим литературама постоје различите категоризације нуклеарних форензичких метода. Оне су углавном извршене према различитим критеријумима. Чак је и "ITWG" у документу бр. 2 серије докумената Међународне агенције за атомску енергију под насловом "Нуклеарна безбедност", дала предлог редоследа метода којим би требало да се приступа у случају вршења нуклеарно-форензичког испитивања, а који се може сматрати одличном категоризацијом датих метода, пре свега према времену испитивања, али и врсти испитивања у смислу избора научне методе.

Високо-резултивна гама спектрометрија (*енг.* "HRGS – High-Resolution Gamma Spectrometry"). Обично се користи у почетној фази испитивања. Неинвазивна је и прилично поуздана за почетни стадијум испитивања, па се користи као незаобилазна метода за добијање смерница за даље испитивање. Заснива се на детектовању γ -фотона и њиховом идентификовању у датом спектру. γ -кванти настају када језгро, након распада, прелази из енергетски побуђеног у неко ниже енергетско стање. Како је енергија γ -фотона једнака разлици енергија које је језгро имало и које има након емисије кванта, јасно је да се тумачењем спектра може доћи до закључка до ког распада је дошло.

Разне врсте масене спектрометрије (*енг.* "MS – Mass Spectrometry"). Масена спектрометрија је веома распрострањена метода. Поуздана је и осетљива, али је и инвазивна, јер узорак пре употребе мора да прође кроз одређене физичко-хемијске припреме. Користи се углавном за одређивање састава неке супстанце. Сепарација појединачних елемената се врши на основу њихове масе. Овде се користи чињеница да наелектрисане честице када се нађу у хомогеном магнетном пољу, почињу да се крећу по кружној путањи. Што је већа маса честице, већи је и полупречник кружне путање. То нас води до тога да ће се честице различите масе различито понашати у магнетном пољу, оне са мањом масом ће описивати кругове мањег полупречника и обрнуто.

У нуклеарној форензици се често користе методе чија је основа масена спектрометрија, али поред ове методе обухватају још неки вид додатне анализе. Од ових метода најчешће се користе:

Масена спектрометрија са индуковано спрегнутом плазмом (енг. "ICP-MS"), **Масена спектрометрија термалном јонизацијом** (енг. "TIMS"), **Масена спектрометрија раствора изотопа** (енг. "IDMS"), **Гасна хроматографија – масена спектрометрија** (енг. "GS/MS"), **Масена спектрометрија секундарним јонима** (енг. "SIMS"), **Масена спектрометрија акцелератором** (енг. "AMS"). Надоградњом методе "ICP-MS" додатним алатима, добијају се још неке сложеније варијанте ове методе, као што су: **Ласерска аблација масена спектрометрија са индуковано спрегнутом плазмом** (енг. "LA-ICP-MS") и **Мулти-колекторска масена спектрометрија са индуковано спрегнутом плазмом** (енг. "MC-ICP-MS") [3, 7].

Поред претходно побројаних метода, у нуклеарној форензици су присутне и следеће методе: **Скенирајућа електронска микроскопија** (енг. "SEM"), **Трансмисиона електронска микроскопија** (енг. "TEM"), **Рендгенска флуоресценција** (енг. "XRF"), **Рендгенска дифракција** (енг. "XRD"), **Инфрацрвена спектроскопија Фуријеовим трансформацијама** (енг. "FTIR"), **Оптичка емисиона спектрометрија са индуковано спрегнутом плазмом** (енг. "ICP-OES"), **Ласерски индукована спектроскопија пробоја** (енг. "LIBS"), **α -спектрометрија** (енг. "AS"), **Микро-Раман Спектроскопија** (енг. "micro Raman Spectroscopy"), као и комбиноване "SEM/XRF", али и "SEM/EDX" или "SEM/WDX" [3, 7].

Све набројане методе су аналитичке и представљају срж нуклеарно-форензичких испитивања. На овај начин добијени подаци се сврставају у категорију која се на енглеском назива "ESS – Environmental Sampling for Safeguards"). Поред њих се користе и методе конвенционалне форензике, нпр. ДНК анализе и узимање отисака прстију. Осим тога, користе се и разне методе мониторинга, праћења итд. Те методе су: откривање недозвољених материјала **вишечаналним анализаторима** (енг. "MCA"), откривање недозвољених материјала **детекторима легура** (енг. "ALEX"), коришћење **инструмената за праћење промена у животној средини** (енг. "Environmental monitoring instruments"), коришћење система **дигиталног видео надзора** (енг. "Digital video surveillance systems"), коришћење **сателитског снимања** (енг. "Satellite imagery"), коришћење **инспекцијске базе података** (енг. "Inspection Database"). У ову групу метода спадају и софтвери који се користе у ове сврхе, а то су: **Скуп неуралних**

мрежа (енг. "CNN"), **Морфолошка анализа за атрибуцију материјала** (енг. "MAMA") [7, 8].

Табела 1. даје поделу према времену коришћења и према групи у коју дата метода спада.

Табела 1 Редослед корака који треба предузети приликом испитивања узорка, према упутству (ITWG) [4]

Врста методе	24 h	7 дана	2 месеца
Радиолошки метод	Брзина дозе (α , β , γ , n) Површинска контаминација Радиографија		
Физичка карактеризација	Визуелни преглед Фотографисање Утврђивање масе и димензија Оптичка микроскопија Густина HRGS	Микроструктура Морфологија SEM XRD	Наноструктура Морфологија TEM
Анализа изотопа		TIMS ICP-MS	SIMS Технике радиоактивног бројања HRGS (sa U) α -Spectrometry GC-MS
Радиохронометрија	HRGS (sa Pu)	TIMS ICP-MS	
Хемијски састав	XRF	ICP-MS Хемијско испитивање FTIR SEM IDMS	
Традиционалне форензичке методе	Примена традиционалних форензичких дисциплина (отисак прста, ДНК анализа власитл.)		

У табели 2. је дат преглед метода према томе у коју сврху се користе. Табела није преузета, али су подаци у њој систематизовани коришћењем података одређеног извора [8]. Ови подаци су приказани табеларно ради веће прегледности. У табели 3. су дате методе према врсти алата у које се убрајају. У табели 4. подела је према величини узорка и информацијама које се о узорку добијају.

Табела 2 Подела метода према томе у коју сврху се користе [8]

Информације које се добијају из дате методе	Врста методе
Елементарни и молекуларни потписи	ICP-MS ICP-OES LA (LA-ICP-MS) LIBS (за мале количине узорка) α -Raman Spectroscopy MC-ICP-MS TIMS AMS SIMS SIMS MC-ICP-MS
Карактеризација изотопа	LA-MC-ICP-MS SIMS XRF SEM/EDX SEM/WDX α -Raman Spectroscopy MAMA CNN
Датирање	
Информације о нехомогености недозвољених нуклеарних материјала	
Морфологија у нуклеарној форензици	

Табела 3 Врста алата и метода у оквиру алата [9]

Врста алата	Метода
Алати за анализу елемента или изотопа	Радиометријске технике (α , β и γ спектрометрија) Масена спектрометрија (TIMS, ICP-MS) Хемијски огледи Радиохемијске методе XRF XRD GC/MS
Алати за визуелну анализу	Визуелно осматрање и фотографија Аутордиографија Оптичка микроскопија SEM TEM
Алати за микроанализу	Рендгенске микроанализе (SEM/EDX и SEM/WDX) SIMS ИЦ спектроскопија α -Раман спектроскопија

Табела 4 Карактеризација према величини узорка и границама детекције [6]

Врста алата	Метода	Врста информације о материјалу	Граница детекције	Просторна резолуција
Алати за анализу елемента или изотопа	HRGS	Изотопске	пг-μг	
	Хемички огледи	Елементарне	пг	
	Радиохемијске/ Радиометријске методе	Изотопске/ Елементарне	фг-пг	
	TIMS	Изотопске/ Елементарне	пг-пг	
	ICP-MS	Изотопске/ Елементарне	пг-пг	
	XRF	Елементарне	10 ppm	
	XRD	Молекуларне	~ 1 ат%	
Алати за визуелну анализу	GS/MS	Молекуларне	ppm	
	Визуелна инспекција	Макроскопске		0.1 mm
	Аутордиографија	Микроскопске		10 – 50 μm
	Оптична микроскопија	Микроскопске		1 μm
	SEM	Микроскопске		1 nm
Алати за микроанализу	TEM	Микроскопске		0.1 nm
	SIMS	Елементарне/ Изотопске	0.1 ppb – 10 ppm	0.1 – 1 μm
	SEM/EDX (WDX)	Елементарне	0.1 – 2 му %	1 μm
	FTIR	Молекуларне	0.1 – 1 му %	10 μm
	цРаман	Молекуларне	~ 1 му %	1 μm

Закључак

Развојем нуклеарно-форензичких метода, нуклеарна безбедност је подигнута на виши ниво. Нуклеарни безбедносни режими су без ових алата немоћни. Постојање метода, значајно је допринело заустављању ширења нуклеарног наоружања, нуклеарног тероризма и недозвољене производње и употребе оружја које се везује за атомску и нуклеарну енергију. Ипак, и поред ових озбиљних метода није дошло до онога чему се тежи, а то је да се у потпуности укине нуклеарно наоружање, које би у некој будућој ескалацији сукоба између сила довело до престанка света каквим га познајемо. Међутим, кривица је у политици, а методе су моћан алат у имплементацији споразума.

Литература

- [1] International Atomic Energy Agency, *IAEA Safeguards Glossary* (No. 3) [Electronic version], Retrieved June 2002, from: https://www.iaea.org/sites/default/files/iaea_safeguards_glossary.pdf
- [2] EU Non-Proliferation Consortium, *Nuclear Forensics Material Analysis for Security Purposes*, Non-Proliferation Papers No. 60 (2017)
- [3] International Atomic Energy Agency, *Nuclear Forensics in Support of Investigations*, IAEA Nuclear Security Series No. 2-G (Rev. 1), IAEA, Vienna, 2015.
- [4] K. Mayer, M. Wallenius, K. Lützenkirchen, J. Galy, Z. Varga, N. Erdmann, R., Buda, J.-V. Kratz, N. Trautmann, K. Fifield, *Nuclear Forensics: A Methodology Applicable to Nuclear Security and to Non-Proliferation*, International Nuclear Physics Conference (2010)
- [5] Sipri, *Arments, Disarmament and International Security*, Yearbooks (2012-2021), from: <https://www.sipri.org>
- [6] International Technical Work Group: <http://www.nf-itwg.org/>
- [7] Z. Varga M. Wallenius, M. Krachler, N. Rauff-Nisthar, L. Fongaro, A. Knott, A. Nicholl, K. Mayer, *Trends and perspectives in Nuclear Forensic Science*, Trends in Analytical Chemistry 146 (2022) 116503
- [8] David L. Donohue, *Key Tools For Nuclear Inspections*, IAEA (2002), from: <https://www.iaea.org/sites/default/files/publication/s/magazines/bulletin/bull44-2/44202451723.pdf>
- [9] M. J. Kristo, *Handbook of Radioactivity Analysis Volume 2: Radioanalytical Applications*, Lawrence Livermore National Laboratory (2018)