

Друштво за заштиту од зрачења Србије и Црне Горе

Монографија
ЧЕРНОБИЉ
30 година после

Уредник
др Гордана Пантелић

Београд
2016

Монографија: **ЧЕРНОБИЉ 30 година после**

Издавач: Институт за нуклеарне науке „Винча“, Лабораторија за
заштиту од зрачења и заштиту животне средине
„Заштита“
Друштво за заштиту од зрачења Србије и Црне Горе

За издавача: др Борислав Грубор

Рецензенти: др Оливера Цирај Бјелац
др Иштван Бикит
др Владимир Удовичић
др Невенка Антовић
др Ивана Вуканац
др Драгослав Никезић
др Душан Мрђа
др Марија Јанковић
др Јелена Крнета Николић

Уредник: др Гордана Пантелић

Лектор/коректор: Мариола Пантелић, MSc

Објављивање монографије помогли:
Министарство просвете, науке и технолошког развоја

ISBN 978-86-7306-138-2

Штампа: Штампарија Института за нуклеарне науке „Винча“, 522,
11001 Београд, Тел. 011-8066-746

Тираж: 150 примерака

УПОРЕДНИ ПРИКАЗ ПОВИШЕНОГ ИЗЛАГАЊА ЗРАЧЕЊУ У ВЕЋИМ АКЦИДЕНТИМА И НУКЛЕАРНОМ ГОРИВНОМ ЦИКЛУСУ УОПШТЕ

Марко М. НИНКОВИЋ

*Лабораторија за заштиту од зрачења и заштиту животне средине
Института за нуклеарне науке, Винча, Београд, Србија, markon@vinca.rs*

Резиме

Приказани су и анализирани расположиви подаци о повишеном излагању зрачењу у процесима производње физионог експлозива и нуклеарног горива као и у значајнијим акцидентима на нуклеарним реакторима. Пошло се од података о нивоима излагања зрачењу током производње плутонијума у нуклеарним центрима у Хенфорду (САД) и Мајаку (бивши СССР). Потом су приказани подаци о излагању зрачењу у већим акцидентима на нуклеарним реакторима почев од Виндскејла, преко Острва Три миље и Чернобиља до Фукушима. Резултати анализе показују да су излагања дозама зрачења изнад 0,5 Гу, као неке врсте условне границе, била у знатној мери у Чернобиљу и неупоредиво мањој и без фаталних последица у Фукушими као и у совјетском нуклеарном центру у Мајаку. На крају дати су упоредо резултати мерења јачина доза гама зрачења на великим растојањима од Чернобиља и Фукушима током активних фаза акцидента.

1. УВОД

Велики број радијационих акцидената десио се на нуклеарним постројењима, као и у медицинској, индустријској и другим областима примене извора и генератора зрачења. Детаљни преглед свих ових акцидената може се наћи у извештајима Комитета Уједињених нација за ефекте атомских зрачења (UNSCEAR) [1]. У овом раду приказане су и дискутоване увећане дозе зрачења којима су били изложени радници током већих акцидената на нуклеарним постројењима као што су били: Виндскејл у Великој Британији 1957, Острво Три Миље у САД 1979, Чернобиљ у бившем СССР-у 1986 и Фукушима у Јапану 2011. Поред тога анализиране су дозе зрачења којима су били изложени радници у процесима производње нуклеарног експлозива тј. на реакторима коришћеним за производњу плутонијума и постројењима за обраду плутонијума као што су Хенфорд у САД и Мајак у бившем СССР-у, иако ова излагања не потичу из акцидената већ рутинског рада током 40-их и почетком педесетих година прошлог века. односно, времена када свест о потреби појачане заштите од зрачења није била довољно препозната.

У овој анализи највише су коришћене спољашње дозе зрачења, јер за њих постоје најпотпунији подаци добијени помоћу личних дозиметара. Дозе су реферисане као еквивалентне или ефективне у зависности од тога да ли се

односе на ризик по цело тело или појединачне органе. Поред спољашњих, значајним унутрашњим дозама су радници били излагани у процесима рутинских радова и нарочито у акцидентима. Међутим, унутрашње дозе се не могу мерити директно већ су резултат процена количина унетих радионуклида у организам. Из тих разлога ови подаци нису одмах расположиви и са протоком времена непрекидно се допуњују. Чињеница је да су дозе интерног озрачивања присутне и да су оне биле значајне у процесима производње нуклеарног горива и нарочито нуклеарног експлозива четрдесетих и педесетих година прошлог века.

2. СРЕДЊЕ ГОДИШЊЕ ДОЗЕ РАДНИКА У НУКЛЕАРНОМ ГОРИВНОМ ЦИКЛУСУ

Посматрајући нуклеарни горивни циклус у целини, нивое излагања зрачењу у свим његовим фазама прати Комитет Уједињених нација за ефекте атомских зрачења (UNSCEAR) [2]. Неки од најновијих података ове институције приказани су у табели 1, у којој су дати подаци о укупном броју ангажованих радника и одговарајућим средњим ефективним дозама током два анализирана периода 1975-1979. и 2000-2002.

Табела 1. Број контролисаних радника и средња годишња ефективна доза у нуклеарном горивном циклусу [2]

	Број радника (x1000)		Средња доза (mSv)	
	1975/79	2000/02	1975/79	2000/02
Ископ руде	240	12	5,5	1,9
Млевење	12	3	10	1,1
Обогаћивање	11	18	0,5	0,1
Производња	20	20	1,8	1
Сагор. у реакт.	150	437	4,1	1,0
Прерада	78	76	7,1	0,9

Како се може видети из ових података број радника ангажованих у прве две фазе горивог циклуса (вађење и млевење руде) значајно се смањило од првог до другог анализираног периода, док се у осталим фазама или повећао (погон реактора) или остао практично непромењен. Са друге стране средња годишња ефективна доза током периода 1975-1979. била је < 5 mSv у фазама обогаћивања уранијума, производњи горива и погону реактора; истовремено у фазама ископа руде, млевења и прераде искоришћеног горива ова величина је била од 5 до 10 mSv. Током другог анализираног периода (2000 – 2002) средња доза се смањила и била је < 2 mSv у свим фазама горивог циклуса.

3. СРЕДЊЕ ГОДИШЊЕ ДОЗЕ РАДНИКА ТОКОМ РУТИНСКИХ ПОСЛОВА НА ПОЧЕЦИМА НУКЛЕАРНЕ ЕРЕ

На почетку нуклеарне ере током четрдесетих година прошлог века, нуклеарна енергија је развијана за ратне потребе. Подаци који се анализирају у овом раду потичу са две локације у свету: Хенфорда у САД и Мајака на јужном Уралу у бившем СССР-у.

Локација Хенфорд налази се у јужно - централном делу државе Вашингтон у САД. Изабрана је 1943. [3] године за производњу плутонијума и других нуклеарних материјала у функцији развоја нуклеарног оружја за употребу у II светском рату. Први нуклеарни реактор на овој локацији пуштен је у рад 1944. године, да би током наредних година било изграђено још неколико реактора за производњу плутонијума. На овим пословима радило је доста радника од којих је неколико хиљада њих било обухваћено контролом индивидуалног излагања зрачењу. Контрола излагања односила се на спољашње озрачивање јер се сматрало да је то доминантни пут излагања.

Након нуклеарних експлозија у Хирошими и Нагасакију 1945. године, у бившем СССР-у донета је одлука о развоју сопственог нуклеарног оружја. За те сврхе изграђен је индустријски нуклеарни комплекс у Мајаку на јужном Уралу. У оквирима тог комплекса изграђени су нуклеарни реактори, радиохемијско постројење за издвајање плутонијума из озраченог нуклеарног горива и постројење за производњу плутонијума [4]. Изградња првог реактора на овој локацији започета је 1945. да би био пуштен у рад 1948. године. Изградња радиохемијског постројења започета је 1946, а прве количине плутонијума за уградњу у атомску бомбу биле су доступне 1949. године. Приближно око 20000 радника било је ангажовано на овим пословима. Основни путеви излагања зрачењу радника били су спољашње зрачење (примарно гама зрачење) и унутрашње од плутонијума доспелог у организам.

Процењене годишње ефективне дозе зрачења за раднике у Хенфорду [3] и Мајаку [5,6] дате су у табели 2 и на слици 1. Ради упоређивања, претпостављено је да су приказани подаци о дозама, који за Хенфорд представљају спољашње дозе продорног зрачења и ткиво еквивалентне дозе у ваздуху за Мајак, приближно једнаке ефективним дозама.

Како се може видети из приказаних података разлике у вредностима средњих годишњих доза спољашњег зрачења у Мајаку и Хенфорду су веома велике. Годишње средње дозе радника у Хенфорду су углавном $< 5 \text{ mSv}$ са само неколико појединачних случајева када су достигале вредности од око 50 до око 150 mSv. Насупрот томе, средње годишње ефективне дозе у Мајаку су биле $\sim 1000 \text{ mSv}$ почетком педесетих, да би се потом стално смањивале до око 15 mSv што је регистровано у 1970. Разлог за овако високе дозе био је недостатак заштитних средстава као и у то време још увек недовољно разумевање последица излагања радника овако високим дозама зрачења. Поред тога, због непостојања одговарајућих заштитних мера у Мајаку су радници били изложени и високим интерним дозама зрачења као резултат уношења плутонијума у организам. Процењено је да су кумулативне апсорбоване дозе на појединим интерним органима достигале вредности

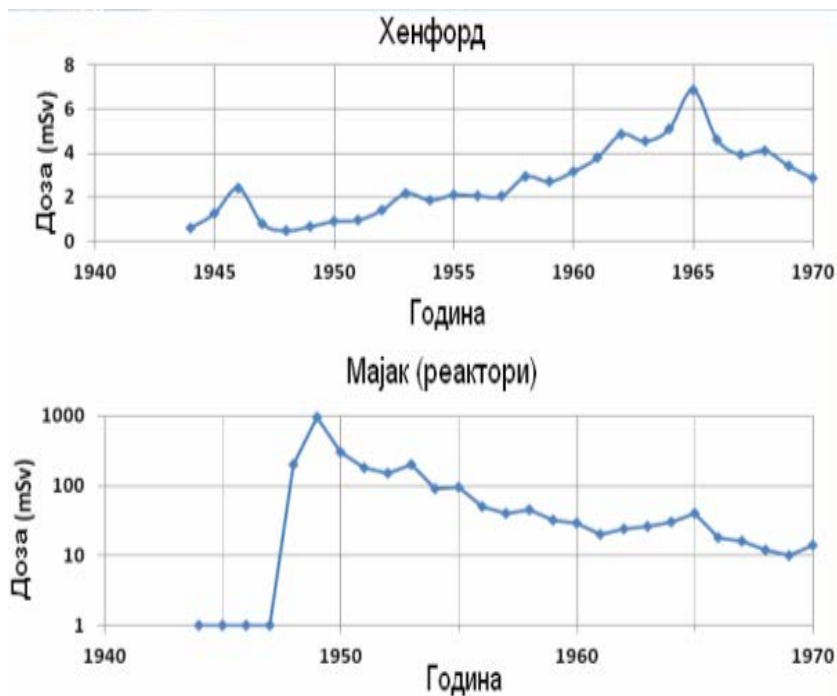
преко 1000 mGy [4]. На пример, на плућима код 53 радника > 500 mGy; на јетри > 500 mGy код 77 радника, као и на површини костију код 243 радника регистрована је кумулативна доза већа од 500 mGy.

Табела 2. Средње годишње дозе (mSv) радника Хенфорда (САД) [3] и Мајака (бивши СССР) [5,6] од спољашњег зрачења

Год.	Хенфорд	Мајак	Мајак	Мајак
	Сви радници	Радници реактора	Радници радиохем. постро.	Радници Рипостројења
1944	0,59			
1945	2,25			
1946	1,39			
1947	0,79			
1948	0,48	200		
1949	0,65	950	400	10
1950	0,90	300	950	170
1951	0,95	190	1020	230
1952	1,41	150	650	130
1953	2,19	200	300	90
1954	1,88	90	190	40
1955	2,12	95	210	
1960	3,18	29	170	
1965	6,99	40	20	
1970	3,20	14	16	

4. АКЦИДЕНТИ НА НУКЛЕАРНИМ ПОСТРОЈЕЊИМА

Поред свих напора у циљу побољшања сигурности нуклеарних постројења и руковања са изворима зрачења, катастрофални акциденти, као што су Чернобил и Фукушима нису могли бити избегнути. У наредном тексту изложени су основни подаци, о до сада регистрованим већим акцидентима у свету, разврстани по степену опасности.



Слика 1. Средња индивидуална доза од спољашњег излагања зрачењу у Хенфорду и Мајаку у периоду 1944/1970, (mSv)

4.1. Чернобиљ (1986) – бивши СССР

Несумњиво да је акцидент најтежих размера онај који се догодио априла 1986. године у Чернобиљу (Украјина) [7], којом приликом су, после експлозије, у околину избачене велике количине радиоактивног садржаја из језгра реактора. Овај догађај је класификован, од стране Међународне агенције за атомску енергију (IAEA) као догађај **7. нивоа**, највишег на Међународној скали нуклеарних догађаја (INES) [8]. Том приликом директно је страдало 28 интервентних радника, од излагања високим дозама зрачења, док је истовремено значајним нивоима контаминације било изложено становништво већег дела Европе, као и целе Северне хемисфере. У процесима санације акцидента до сада је ангажовано више од пола милиона радника, а да све последице још увек нису уклоњене.

4.2. Фукушима Даи Ичи акцидент (2011) - Јапан

Фукушиму даи ичи нуклеарну катастрофу [9], проузроковао је велики Цунами који се развио после Тохоку земљотреса у марту 2011. Била је то друга катастрофа размера **7. нивоа** по INES скали. Цунами талас разорио је већину сигурносних система и енергетских извора, изузев једног дизел агрегата на 6. реакторској јединици што је проузроковало немогућност хлађења реакторских језгара и базена са свежим искоришћеним горивом и коначно топлење горива код три реактора. Услед тога дошло је до

испуштања велике количине радиоактивних материјала у околину и њене контаминације. Експлозије водоника на овим постројењима допринеле су њиховом разарању. Услед свега тога морало је бити евакуисано становништво из двадесето километарске зоне око локације електране.

4.3. Киштим (1957) – бивши СССР

Озбиљан нуклеарни акцидент који се десио крајем септембра 1957. код града Киштима на падицама јужног Урала у бившем СССР [10]. Оцењено је да су размере акцидента биле 6. нивоа по INES скали акцидента. Акцидент је проузрокован престанком хлађења једног од базена са свежим течним високоактивним отпадом што је изазвало прегревање и експлозију. Том приликом је високо у атмосферу избачено око 800 PBq радиоактивних материјала. Дошло је до контаминације подручја изнад којих се простирао радиоактивни облак и због тога морало је бити евакуисано око 10000 становника из 22 мања насељена места.

4.4. Острво Три миље (1979) – САД

Највећи акцидент у историји коришћења нуклеарне енергије у САД [11,12], настао је услед делимичног топљења језгра реактора Јединице 2 нуклеарне електране Острво Три Миље, марта месеца 1979. године. Оцењено је да се радило о акциденту 5. нивоа према INES скали. Акцидент је изазвала серија отказа у секундарном систему реактора праћена грешкама дежурног особља, што је довело до губитка хлађења и услед тога делимичног топљења језгра, једног од нуклеарних реактора на локацији електране. При томе није било значајнијег излагања зрачењу радног особља и контаминације околине, иако су извесне количине радиоактивних гасова испуштене у атмосферу.

4.5. Виндскејл (1957) – Велика Британија

Најтежи нуклеарни акцидент у историји коришћења нуклеарне енергије у Великој Британији десио се почетком октобра 1957, када је избио пожар на једном од реактора са графитним језгром у Виндскејлу [13]. Догађај је класификован као акцидент 5. нивоа по INES скали, јер је проузроковао испуштање радиоактивних материјала у непосредну околину. Према проценама, на основу увећаног излагања зрачењу радника и становништва, могла се очекивати појава 240 случајева канцера. Узрок избијању пожара су били затворени издувни канали за ваздух, што је довело до прегревања једног реактора. Други реактор на локацији, иако није био захваћен пожаром, је затворен. Постројење је деконтаминирано и касније су његови делови преименовани у Селафилд.

4.6. Чок Ривер (1952) - Канада

Национални истраживачки експериментални реактор (NRX) у Чок Ривер Лабораторијама претрпео је један од значајних акцидента током децембра месеца 1952. године [14]. Том приликом је језгро NRX реактора било оштећено услед топљења због екскурзије снаге и делимичног губитка

хлађења реактора. Акцидент је класификован размера 5. нивоа по INES скали. Реактор због тога није радио две године, а потом је настављено његово коришћење све до коначног заустављања 1993. године.

4.7. Токаикура (1999) – Јапан

Први озбиљнији акцидент у Јапану десио се у просторији за конверзију урана, постројења за репроезинг, лоцираног у граду Токаи-кура септембра 1999. године [15]. Акцидент се састојао у неконтролисаној успостављању реакције фисије при раду са већом количином висико-обогаћеног урана у процесу припреме нуклеарног горива за реактор. Оцењено је да је акцидент био 4. нивоа по INES скали. Акцидент је изазвао смрт два радника и увећано озрачивање неколико запослених. Преко 200 становника у околини било је изложено различитим нивоима зрачења.

4.8. Сан Лорен (1980) – Француска

На Сан – Лорен нуклеарној електрани у Француској десио се најтежи нуклеарни акцидент у овој земљи [16]. Марта месеца 1980. године дошло је до квара на систему за хлађење који је проузроковао топљење једног горивног канала у Сан Лорен А2 реактору. Процењено је да је акцидент био 4. нивоа по INES скали, јер није било испуштања радиоактивности изван локације. Пре овог догађаја, на истој електрани, десио се још један акцидент у октобру 1969, када се истопило 50 kg уранијума, у реактору А1. Процењено је да је и овај акцидент био 4. нивоа. према INES скали.

5. НИВОИ ИЗЛАГАЊА ЗРАЧЕЊУ У АКЦИДЕНТИМА НА НУКЛЕАРНИМ РЕАКТОРИМА

Од свих акцидентата на нуклеарним реакторима, који су укратко приказани у претходном параграфу, по нивоима излагања зрачењу професионалаца, интервентних радника и становништва у околини издвајају се четири акцидента: Виндскејл, Острво Три Миље, Чернобил и Фукушима, наводећи их по временском редоследу настанка. Иначе по размерама ефеката редослед је другачији: Чернобил, Фукушима, Острво Три Миље и Виндскејл. У наредном тексту приказани су детаљнији подаци о величинама доза зрачења којима су били изложени професионални радници и интервентно особље током акцидентата и у процесима њихове санације.

5.1. Виндскејл акцидент

Према доступним подацима [17], укупно 471 радник био је ангажован у процесу санације акцидента. За цео месец октобар, када се десио акцидент, регистрована је средња доза спољашњег зрачења од 4,5 mSv, при чему је максимална појединачна доза износила 44 mSv. Током три месеца по акциденту, 14 радника је било изложено кумулативним дозама зрачења углавном < 30 mSv, при чему је максимална индивидуална доза била 47 mSv. У литератури нису доступни подаци о интерним дозама зрачења као ни о

дозама зрачења радника који су радили на деконтаминацији постројења у процесу санације.

5.2. Острво Три Миље

Подаци о излагању зрачењу професионалног особља електране дати су у табели 3.

Табела 3. Острво Три Миље: Дозе интервентних радника током и након акцидента [17]

Година	Број радн.	Макс. доза (mSv)	Средња доза (mSv)
1979	3975	45	3,5
1980	2328	21	1,7
1983	1592	27	7,3
1984	1079	-	6,4
1985	1890	-	4,5
1986	1497	-	6,1
1990	484	-	2,8
1995	191	-	0,1

Подаци се односе само на дозе од спољашњег зрачења. Потребно је напоменути да се наведени подаци за период од 1979. до 1985. односе на раднике обе електране на локацији. Као што се може видети у табели 3, максимална индивидуална кумулативна доза од спољашњег зрачења износила је 45 mSv у 1979. години, години акцидента. Иначе, како се може уочити, санација акцидента трајала је до средине деведесетих, уз смањивање броја ангажованих радника по годинама.

5.3. Акцидент у Чернобиљу

При анализи увећаног излагања зрачењу радника који су учествовали у санацији акцидента у Чернобиљу посебно се посматрају две групе радника. Прву групу чине радници који су се стицајем околности затекли на електрани у тренутку акцидента и учествовали у непосредним почетним акцијама санације, а другу радници који су обављали разне врсте послова у вези санације на локацији и њеној непосредној околини, до растојања од 30 km, у постакциденталним условима у периоду од 1986. до 1990. године.

Прву групу сачињавали су 374 радника електране, 69 ватрогасаца, 113 чувара и 10 медицинских радника. Од њих укупно 566, из дела групе реакторских радника и ватрогасаца 134 је оболело од радијационе болести. Дозе зрачења којима су били изложени ови радници дате су у табели 4.

Табела 4. Чернобил: Број интервентних радника изложених високим дозама зрачења (> 0, 8 Gy) у почетној фази санације акцидента и смртност међу њима [2]

	Распон дозе	Број радника	Смртност
Значајне	(0,8 – 2,1 Gy)	41	0
Средње	(2,2 – 4,1 Gy)	50	1
Високе	(4,2 – 6,4 Gy)	22	7
Врло високе	(6,5 – 16 Gy)	21	20
	Укупно	134	28*

* У следећих 20 година, од 1986. до 2005, умрла су још 22 радника од 134 високо- озрачених [20]

Подаци приказани у табели 4 представљају дозе од спољашњег зрачења. Како се може видети сви високоозрачени разврстани су у четири категорије по висинама доза. Запажа се да је за доњу границу високе озрачености узета вредност од 0,8 Gy, што је осам пута већа вредност од ICRP препоруке [21], што представља још једну потврду о димензијама акцидента.

Након почетне фазе акцидента, ангажовано је више од пола милиона радника у петогодишњем постакциденталном периоду на пословима санације акцидента и изградње саркофага. Подаци о броју радника по годинама и средњим дозама зрачења којима су били изложени дати су у табели 5. Запажа се да се број ангажованих радника смањивао протоком година, као и да је појединачно излагање зрачењу радника било систематски контролисано у мање од 50% случајева.

Коначно у табели 6, дати су подаци о размерама укупног излагања зрачењу, како радника учесника у санацији тако и најизложенијих одабраних група становништва. Како се види, сумирани подаци односе се на четири групе излаганих: интервентне раднике у периоду 1986/1990; евакуисано становништво из околине електране током 1986. и становништво из строго контролисаних и осталих контаминираних зона за двадесетогодишњи период 1986/2005.

5.4. Акцидент у Фукушими

Од тренутка акцидента па до краја 2012. године на пословима санације акцидента ангажовано је укупно између 23 и 25 хиљада радника. При томе око једна четвртина радника су били радници електране, значи професионално изложена лица, а преостале 3/4 су спољни радници. Дозе зрачења којима су били изложени интервентни радници у целом анализираном периоду, од марта 2011. до децембра 2012, приказане су у табели 7 [22]. Подаци се односе на укупне кумулативне дозе од спољашњег и унутрашњег излагања зрачењу. Како се може видети од свих 25000 интервентних радника само код 6 појединаца су регистроване кумулативне дозе веће од 250 mSv. За ову вредност, која је иначе 2,5 пута већа од препоручене [21], као горњу границу прихватљивог излагања, определиле су се јапанске власти на почетку санације акцидента. Анализа разлога прекорачења ове границе, у наведених шест случајева, показала је да је

Акциденти и мониторинг

прекорачење последица недовољно ефикасне заштите од интерне контаминације [23].

Табела 5. Чернобил: Укупан број радника учесника у санацији акцидента у периоду 1986/1990, са подацима о проценту контролисаних и средњих годишњих доза

Година (mSv)	Број радника	% контр. радника	Средња доза
1986	305 826	35	146
1987	138 173	64	96
1988	51 278	71	43
1989	24 128	69	41
1990	5 776	66	47
1986-1990	526 245	48	117

Табела 6. Укупне средње акумулиране дозе, од чернобилског акцидента, за специфичне групе становништва и интервентне раднике

Група становника	Број	Средња доза (mSv)
Интервен. радници (1986-1990)	526 245	~ 117
Евакуисани из високо конт. зона (1986)	116 000	33
Становн. у строго контр. зонама (1986/2005)	270 000	~ 70
Становништво осталих конт. зона (1986/2005)	5 000 000	10-20

Уз велику помоћ јапанске Агенције за нуклеарну енергију и Националног института за радиолошке науке, руководство електране у Фукушими је успело да процени дозе од интерног излагања зрачењу код више од 90% интервентних радника. Ови подаци су дати у табели 8 [24, 25]. Интерне дозе су процењиване на бази података о степену и врсти интерне контаминације радника добијене мерењем радиоактивности целог тела, WBC-техником. Како се може видети из ових података допринос интерног излагања укупној кумулативној дози није био занемарљив.

Табела 7. Фукушима: дозе интервентних радника током санације акцидента од марта 2011 до децембра 2012 [22]

Распон доза (mSv)	Радници електране	Спољни радници	Укупно
> 250	6	0	6
100 – 250	140	21	161
50 – 100	585	661	1246
20 – 50	599	3032	3631
10 – 20	708	3316	4024
1 – 10	987	8735	9722
< 1	661	6163	6824
Укупно	3628	21770	25398
Макс. доза (mSv)	679	238	679

6. МЕРЕНЕ ЈАЧИНЕ ДОЗА ЗРАЧЕЊА НА ВЕЋИМ РАСТОЈАЊИМА ОД МЕСТА АКЦИДЕНТА (ЧЕРНОБИЉА И ФУКУШИМЕ)

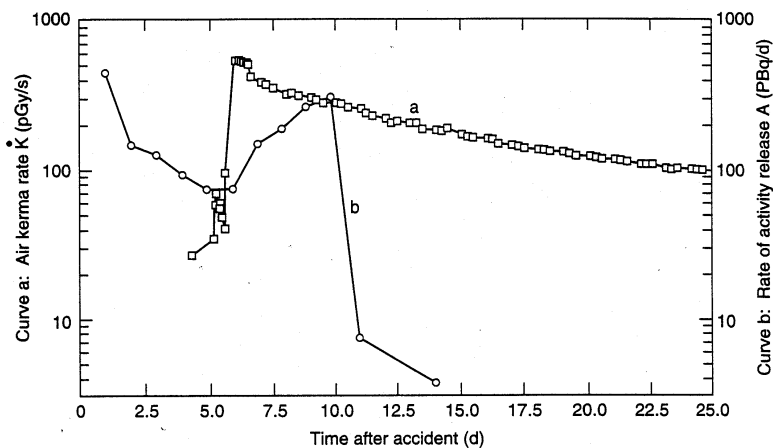
Мерења код Београда након акцидента у Чернобиљу, чији су резултати сумирани на слици 2, вршена су помоћу јонизационе коморе са гасом под притиском RSS-111, која је данас постала референтни уређај широм света за мерење малих јачина доза гама зрачења блиских природном фону, ради чега је и конструисана. Иначе, први подаци о развоју овог специфичног инструмента саопштени су 1972. године на годишњој Конференцији Друштва за заштиту од зрачења САД. У Институту Винчи је већ почетком 1974. године покренут поступак за његову набавку чиме су остварени услови да крајем те године почне да се користи у текућој пракси. Управо то је омогућило да се спремно дочека и активно пропрати прелаз радиоактивног облака из Чернобиља преко региона Београда, почетком маја 1986. године. Све до акцидента у Фукушими у литератури се није могло наићи на одговарајућа мерења.

Како се може видети на слици 3, Јапанци су, након акцидента у Фукушими, слична мерења обавили у провинцији и граду Чиба, удаљеном око двеста километара од Фукушиме.

7. ЗАКЉУЧАК

Резултати анализе излагања зрачењу у четири велика нуклеарна акцидента, који су се десили у протеклом периоду коришћења нуклеарне енергије, као и на прва два постројења у свету за производњу плутонијума за ратне сврхе, изложени су у овом раду. Посебна пажња је посвећена акциденту у Чернобиљу, који се десио у априлу месецу 1986. у бившем СССР-у, акциденту у Фукушими који се одиграо марта месеца 2011. у Јапану и раним

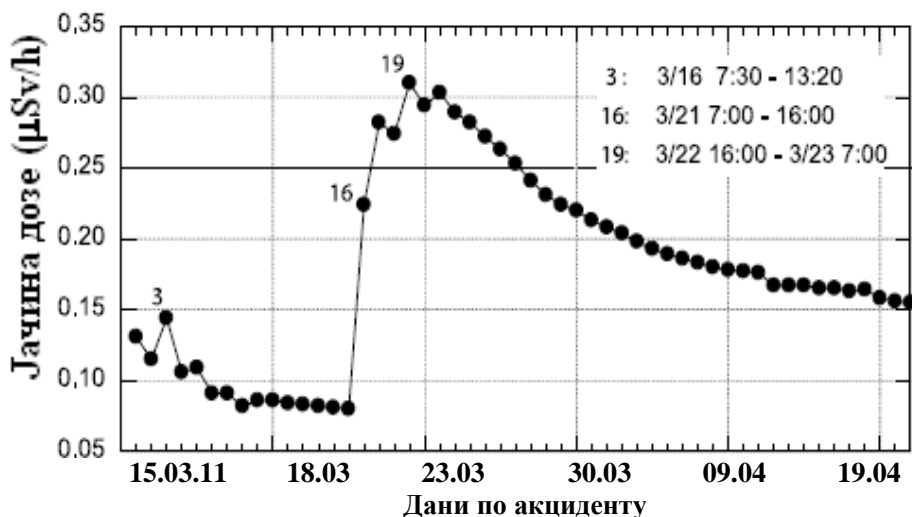
радовима на производњи плутонијума, четрдесетих и педесетих година прошлог века у Хенфорду (САД) и Мајаку (бивши СССР).



Слика 2. Резултати мерења јачине керме у ваздуху код Института у Винчи током 25 дана по акциденту у Чернобиљу (крива а) [25, 26], дати упоредо са интензитетом дневне емисије радиоактивности у околину електране током активне фазе акцидента (крива б) [27]

Катастрофални акцидент у Чернобиљу је догађај у свету који је на свој начин обележио другу половину двадесетог века и врло озбиљно уздрмао опредељење света, да се већим коришћењем нуклеарне енергије успори и умањи непожељни већ узнапредовали процес деградације животне средине. Штетни укупни ефекти овог акцидента су неупоредиво већи од било ког другог акцидента. То се посебно види из обима и нивоа излагања зрачењу радника који су радили на санацији акцидента. Посебно угрожену групу међу њима чини 134 радника код којих је регистрована радијациона болест. Они су били изложени дозама од спољашњег зрачења од 0,8 до 16 Gy. Средња кумулативна ефективна доза интервентних радника, њих више од 500000, који су учествовали у прве четири године санације акцидента износила је око 120 mSv.

Размере излагања зрачењу интервентних радника након акцидента у Фукушими, иако знатно мање него у Чернобиљу, значајне су. У анализираном периоду, од тренутка акцидента до краја 2012. године, у санацији акцидента је учествовало око 25000 радника. Захваљујући доброј организацији рада и доследном коришћењу заштитних средстава, само 6 радника је било изложено кумулативним ефективним дозама већим од 0,25 Sv. Већи део ангажованих интервентних радника, око 95%, био је изложен дозама мањим од 0,01 Sv.



Слика 3. Дозе зрачења измерене у граду Чиба на југу-југозападу од Фукушиме, удаљеном око 220 km. Мерења су вршена помоћу јонизационе коморе на 1,5 m изнад тла [28]

Табела 8. Расподела ефективне дозе (mSv) од унутрашњег озрачивања код радника Фукушиме [24]

Доза (mSv)		Радници електране	Спољни радници	Укупно
0	- 5	4655	16636	21291
5	- 10	316	424	740
10	- 20	425	337	762
20	- 50	194	94	288
50	- 100	37	42	79
100	- 250	7	0	7
	> 250	5	0	5
Укупно		5639	17533	23172

Потребно је нагласити да регистроване дозе зрачења, којима су били изложени интервентни радници после акцидента у Фукушими, садрже доприносе од оба пута излагања, спољашњег и унутрашњег.

Како се из приказаних података може видети, средње годишње дозе зрачења којима су били изложени радници у центрима за производњу плутонијума, посебно у совјетском нуклеарном центру Мајак, биле су врло високе. У почетним годинама приближавале су се вредности од 1 Sv. Основни разлог за то је било непознавање последица тако високог излагања зрачењу у то почетно време рада са изворима зрачења. Иначе основни допринос дози потицао је од плутонијума као унутрашњег озрачивача.

Табела 9. Акциденти на нуклеарним постројењима од 1945. до 2005, праћени смртним исходима

Година	Земља	Број озрачених	Распон доза (Gy)	Број умрлих
1945	САД	2	(1,2 – 3)	1
1946	САД	7	(0,2 – 12)	1
1958	ЈУГОСЛ.	6	(2,1 - 4,4)	1
1961	САД	3	(0,3 – 350)	3
1961*	СССР	30	(1,0 – 50)	8
1964	САД	3	(0,3 – 46)	1
1983	АРГЕНТ.	7	(0,1 – 44)	1
1986	СССР	237	(1 – 16)	(28+22)**
1999	ЈАПАН	3	(3 – 17)	2

* Хаварија једног од реактора на подморници која се у том тренутку налазила у Атлантском океану у близини обала Исланда.

** 28 током 3 месеца по акциденту + 22 у наредних 20 година (до 2005.) од високо озрачених интервентних радника.

На крају овог закључног дела, дајемо табелу 9, са компилираним подацима о броју смртних случајева у нуклеарним акцидентима који су се десили од 1945. до 2005. године у свету [23]. Према подацима које садржи ова табела, очигледно је да је акцидент у Чернобиљу и по овој основи, неупоредиво најтежи.

8. ЛИТЕРАТУРА

- [1] UNSCEAR. Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 2008 report. Volume II: effects. Annex D. Health effects due to radiation from the Chernobyl accident. New York: United Nations; 2011a.
- [2] Buschbom RL, Gilbert ES. Summary of recorded external radiation doses for Hanford workers 1944-1989. Richland, WA: Pacific Northwest Laboratory Report PNL-8909 AD-902; 1993
- [3] Vasilenko EK, Khokhryakov VF, Miller SC, Fix JJ, Eckerman K, Choe DO, Gorelov M, Khokhryakov VV, Knyasev V, Krahenbuhl MP, Scherplez RI, Smetanin M, Suslova K, Vostroitiin V. Mayak worker dosimetry study: an overview. Health Phys 93:190-206; 2007
- [4] Romanov SA, Vasilenko EK, Khokhryakov VF. Studies on the Mayak nuclear workers. Radiat Environ Biophys 41: 23-28; 2002.
- [5] Napier B. A., Joint U.S./Russian studies of pop. exp. from nuclear prod. activities in the S. Urals.(Mayak), Health Physics. 106(2):294-304, 2014
- [6] International Atomic Energy Agency, 1991, The International Chernobyl Project: Proceedings of International Conference, Vienna, Austria, 1991
- [7] The International Nuclear Event Scale (INES), Users Manual, 2001 Edition, IAEA-INES-2001, Vienna 2001
- [8] The Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident: OECD/NEA Nuclear Safety Response and Lessons Learnt, NEA No. 7161, OECD 2013

- [9] S.A.Kabakchi, A.V.Putilov, Data analysis and physicochemical modeling of the radiation accident in the Southern Urals in 1957, *Atomnaza Energiya* 1,46-50, 1995
- [10] J.S.Walker, Three Mile Island: A nuclear crisis in historical perspective, Berkely: University of California Press, 2004
- [11] U.S.NRC Backgrounder on the Three Mile Island Acci-dent, February 2013
- [12] Editorial, The Windscale reactor accident – 50 years on, *J. Radiol. Prot.*, 27, 211-215, 2007
- [13] P.Jedicke, The NRX incident, *Environmental Science* 304, London, Ontario, 1989
- [14] IAEA, Report on the preliminary finding mission following the accident at the nuclear fuel processing facility in Tokaimura Japan, International Atomic Energy Agency, Vienna, 1999..
- [15] <http://www.buzzle.com/articles/nuclear-power-plant-disasters.html>
- [16] McGheoghegan D, Binks K. Mortality and cancer registration experience of the Sellafield employees known to have been involved in the 1957 Windscale accident. *J Radiol Prot* 20, 261-274, 2000
- [17] A.Bouville and V.Kryuchkovf, Introduction of Increased Occupational Exposures: Nuclear Industry Workers. *Health Phys.* 106(2):259-271; 2014
- [18] UNSCEAR. Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2008 report. Volume II: effects. Annex C. Radiation exposures in accidents. New York: United Nations; 2011b.
- [19] International Atomic Energy Agency (2005), Environmental Consequences of the Chernobyl accident and Their Remediation: Twenty Years of Experience, Report of the Chernobyl Forum Expert Group “Environment” (EGE), IAEA, Vienna, 2005
- [20] ICRP(2007), The 2007 Recommendation of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 103, Ann. ICRP 37(2-4), 2007
- [21] TEPCO.Exposure dose distribution. Tokyo: Tokyo Electric Power Company; 2013.Available at http://www.tepco.co.jp/en/press/corp.com/release/betu13_e/images/130131e1001.pdf. Accessed 6 August 2013
- [22] М.М.Нинковић, Упоредни приказ неких ефеката акцидентата у Чернобилу и Фукушими, Зборник радова 57. Конференције ЕТРАН-а, Злагинбор, 03. до 06. јуна 2013.
- [23] UNSCEAR 2013 Report, Scientific Annex A, Levels and effects of radiation exposure due to the nuclear accident after the 2011 great east – Japan earthquake and tsunami, United Nations, New York, 2014.
- [24] WHO. Health risk assessment from the nuclear accident after the 2011 Great East Japan earthquake and tsunami based on a preliminary dose estimation. Geneva: World Health Organization; 2013
- [25] М.М.Нинковић, Ћинjenice i kontroverze o nekim posledicama akcidenta u Ćernobilu, Uvodno predavanje, Savetovanje JDZZ "Ćernobil, 10 godina posle", Zbornik radova, str.17-25, Budva, 4-7.jun.
- [26] M.M.Ninkovic, J.J.Raićević, S.Pavlovic, Effect of the Chernobyl Accident on the Gamma Radiation level in the Belgrade Region, *Nuclear Safety*, 38, 1, 69, 1997.
- [27] P.H.Gudiksen, T.F.Harrey, R.Lange, Proceedings of the Seminar on Comparative Assessment of the Environmental Impact of Radionuclides Released during Three Major Nuclear Accident: Kyshtym, Windscale, Chernobyl, Vol.I, p.93 -112, Luxembourg, 1-5October, 1990
- [28] I.Nobuyoshi, T.Keiko, T.Hyoe, F.Kazuhiro, K.Isao, W.Yoshito, U.Shigeo, Deposition in Chiba Prefecture, Japan, of Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Fallout, *Health Physics.* 104(2):189-194, February 2013

COMPARATIVE OVERVIEW ELEVATED RADIATION EXPOSURE IN MAJOR NUCLEAR REACTOR ACCIDENTS AND IN NUCLEAR FUEL CYCLE IN GENERAL

Marko M. NINKOVIĆ

*Vinca Institute of Nuclear Sciences, Radiation and Environmental Protection
Department, Belgrade, Serbia, markon@vinca.rs*

In this work are presented and analyzed available data on elevated exposure to radiation in the process of the fissile explosives and nuclear fuel production, as well as in major accidents at nuclear reactors. The starting point there were data on levels of exposure to radiation during the production of plutonium in nuclear centers in Hanford (USA) and Mayak (former Soviet Union). Then they presented data on radiation exposure in major accidents at nuclear reactors starting from Windscale through Three Mile Island and Chernobyl to Fukushima. Analysis of the results shows that exposure to radiation doses above 0.5 Gy, as a kind of conditional border, was significantly at Chernobyl and much less, without fatal consequences, in Fukushima and in the former Soviet Union nuclear center at Mayak. Finally intensities of the radiation dose levels measured at great distances from the Chernobyl and Fukushima during the active phase of the accidents are given.

CIP - Каталогизација у публикацији –
Народна библиотека Србије, Београд

614.876(082)

621.311.25(477.41)(082)

504.5:539.16(497.11)(082)

ЧЕРНОБИЉ : 30 година после : монографија / уредник
Гордана Пантелић. - Београд : Институт за нуклеарне науке
"Винча", Лабораторија за заштиту од зрачења и заштиту
животне средине "Заштита" : Друштво за заштиту од зрачења
Србије и Црне Горе, 2016 (Београд : Институт за нуклеарне
науке "Винча"). - 286 стр. : илустр. ; 25 cm

Тираж 150. - Библиографија уз сваки рад. - Summaries.

ISBN 978-86-7306-138-2 ("Винча")

1. Пантелић, Гордана [уредник]

а) Нуклеарна електрана "Чернобил" - Хаварија - Зборници

б) Животна средина - Загађење радиоактивним материјама

- Србија - Зборници с) Несреће у нуклеарним електранама

- Последице - Зборници д) Јонизујуће зрачење - Штетно

дејство - Србија - Зборници

COBISS.SR-ID 226685452