Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích
Zdravotně sociální fakulta

Jaderné testy a jejich důsledky pro zdraví obyvatel a kvalitu životního prostředí

Bakalářská práce

Vedoucí práce:
doc. Ing. Vladimír Pitschmann, CSc.

Autor práce:
Lubomír Fabián

5. května 2011

Nuclear tests and their implications for public health and environmental quality

The aim of this thesis is to give an overview of past nuclear testing and draw some conclusions regarding its potential implications on public health. The introduction presents all kinds of nuclear tests, the history of nuclear testing with respect to particular countries, provides the description of the kinds of ionizing radiation and protection against it as well as the biological effects of ionizing radiation on tissue. There is a part devoted to international treaties in this field – The Partial Nuclear Test Ban Treaty, The Threshold Test Ban Treaty and The Comprehensive Nuclear Test Ban Treaty.

The summary of the number, the yield and the geographical distribution of the past atmospheric nuclear tests follows. There is an explanation of the global fallout mechanism of the radionuclides released, the estimates of emitted doses and the relationship between these doses and their probability of inducing cancer in the human body.

The objective of this work is to make an assessment of the contribution of doses originating from nuclear testing to total population doses (irradiation) and subsequently quantify health implications for the population. The method of achieving this is based on calculating theoretical estimation of cancer incidence from known effective doses commitments and in comparison with those real incidences raised by all the different sources and reasons in world areas chosen, derived from the statistical data gathered from scientific studies and publications of international organizations involved.

The outcome of this work is the confirmation of the first hypothesis that nuclear testing has statistic impact on enhancing the frequency of cancer disorders on the world population; however this is relatively small with respect to the other sources of radiation and a rate of naturally spontaneous (non-radiation-induced) cancer occurrence.

Also the second hypothesis that underground nuclear tests have significantly smaller influence on public health and environment quality than the other kinds of nuclear tests is acknowledged.

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma ***Jaderné testy a jejich důsledky pro zdraví obyvatel a kvalitu životního prostředí*** jsem vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce fakultou, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejné přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce.

Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledky obhajoby kvalifikační práce.

Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé kvalifikační práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

V Kolíně 5. května 2011

……..

Lubomír Fabián

Poděkování

Touto cestou bych chtěl poděkovat svému vedoucímu práce, doc. Ing. Vladimíru Pitschmannovi, CSc., za veškerou pomoc, cenné podněty a vstřícnost při zpracování tématu této bakalářské práce.

……..

Lubomír Fabián

OBSAH

ÚVOD *7*

1 SOUČASNÝ STAV *11*

1.1 Jaderné zbraně **11**

1.2 Jaderné testy **11**

1.2.1 Rozdělení jaderných testů dle velikosti nálože 12

1.2.2 Rozdělení jaderných testů dle místa konání 12

1.2.2.1 Atmosférické jaderné testy 12

1.2.2.2 Pozemní jaderné testy 13

1.2.2.3 Hladinové jaderné testy 13

1.2.2.4 Podmořské jaderné testy 13

1.2.2.5 Testy ve vysoké atmosféře 13

1.2.2.6 Podzemní jaderné testy 14

1.3 Jaderné testy jednotlivých států **14**

1.3.1 Jaderné testy Spojených států amerických 14

1.3.2 Jaderné testy Svazu sovětských socialistických republik 16

1.3.3 Jaderné testy Velké Británie 16

1.3.4 Jaderné testy Francie 17

1.3.5 Jaderné testy Číny 19

1.3.6 Jaderné testy Indie 20

1.3.7 Jaderné testy Pákistánu 20

1.3.8 Jaderné testy Severní Koreje 21

1.4 Jaderné testy a mezinárodní právo **22**

1.4.1 Smlouva o částečném zákazu zkoušek (PTBT) 22

1.4.2 Smlouva o úplném zákazu jaderných zkoušek (CTBT) 23

1.5 Ionizující záření, jeho druhy a ochrana před nimi **24**

1.5.1 Záření alfa 25

1.5.2 Záření beta 25

1.5.3 Záření gama 25

1.5.4 Nepřímo ionizující neutronové záření 25

1.6 Biologické účinky ionizujícího záření na tkáň **26**

1.6.1 Molekulární a buněčné změny po expozici ionizujícímu záření 26

1.6.2 Vliv ionizujícího záření na poškození DNA a RNA 26

1.6.3 Stochastické a deterministické účinky 27

2 CÍL PRÁCE A HYPOTÉZY *28*

3 METODIKA *29*

4 VÝSLEDKY *32*

4.1 Přehled jaderných testů od roku 1945 do současnosti **32**

4.2 Globální a lokální radioaktivní spad **35**

4.3 Radionuklidy uvolněné v atmosférických jaderných testech **37**

4.4 Dávky z ozáření **38**

4.4.1 Veličiny používané v radiobiologii 38

4.4.2 Dávky ozáření z atmosférických jaderných testů 40

4.4.3 Srovnání dávek z atmosférických jaderných testů s ostatními zdroji záření 45

4.5 Pravděpodobnost a závislost účinků záření na lidský organismus na dávkách .. **47**

5 DISKUZE *51*

6 ZÁVĚR *67*

7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY *68*

8 KLÍČOVÁ SLOVA *70*

ÚVOD

Jaderné zbraně, jakožto technologicky nejdokonalejší forma hromadného ničení, budí již od počátku svého vzniku mnoho emocí. Již samotná jejich existence je pro mnoho lidí zdrojem úzkosti a obav. Od svého sestrojení a prvního použití v roce 1945 zásadním způsobem ovlivnily celé 20. a počátek 21. století.

Se samotným vývojem a zdokonalováním jaderných zbraní je úzce spjato jejich testování. Pokud má být „jaderný džin" vypuštěn z láhve, je nejdříve nutné vědět, co od něj lze očekávat. Bohužel jaderné testování není jen lokální záležitostí daného státu, ale v případě atmosférických testů se stává otázkou celoplanetární. Zatímco za dobu své existence byly jaderné zbraně ve válečném konfliktu použity pouze dvakrát, a to Američany na konci druhé světové války v srpnu roku 1945, jaderných testů bylo po celém světě uskutečněno 2 379 všech druhů [14]. Zůstává otázkou, zda tyto testy, respektive radioaktivita uvolněná při jejich průběhu, mají statisticky významný vliv na zdraví obyvatelstva.

Jaderná energie je do značné míry fascinující záležitostí. Jak je možné, že z částice, nepozorovatelné pouhým okem, lze uvolnit energii, která může buď zásobovat lidstvo elektrickou energií či bořit celá města?

Lidstvo se od samého počátku své existence zajímalo o podstatu světa, látek a materiálů, vyskytujících se kolem něj. První pokusy o vysvětlení povahy a vlastností látek na základě jejich vnitřní struktury učinili již v 5. století před naším letopočtem řečtí atomisté Leukippos a Démokritos. Věřili, že veškerá hmota se sestává z velmi malých částic, majících různý tvar a velikost, které způsobují odlišné vlastnosti jednotlivých látek. Tyto částice měly být dále nedělitelné, a proto byly starověkými filozofy nazvány atomy (*a tomos – nedělitelný*). Tuto myšlenku dále rozvinuli Epikuros a Titus Carus Lucretius.

S bouřlivým rozvojem fyziky v 19. století, zvláště pak v jeho druhé polovině, dochází také k postupnému poznávání skutečné struktury hmoty. V roce 1859 profesor Julius Plücker objevil katodové paprsky vychylované v magnetickém poli. V roce 1895 učinil Wilhelm Conrad Röntgen objev paprsků X, první cíleně využívaný druh

ionizujícího záření. Francouzský profesor Antoine Henri Becquerel zjišťuje roku 1896, že fotografická deska zatěžkaná kusem minerálu s obsahem uranových solí zčernala – je objeveno záření uranu. Další silně zářící prvek – radium – bylo objeveno v jáchymovském smolinci v roce 1898 Marií Curie-Skłodowskou, jejím manželem Pierrem a Gustavem Bémontem.

Přibližně ve stejné době jsou také pozorovány první negativní účinky radioaktivity na lidský organismus, a to nejen u vědců pracujících prakticky bez jakýchkoliv ochranných pomůcek s radioaktivními látkami, ale také například u žen pracujících s izotopy ^{226}Ra a ^{228}Ra, které sloužily jako nátěr ciferníků leteckých přístrojů.

Současně s objevy nových radioaktivních látek postupuje na přelomu století dopředu také fyzika a pomáhá vysvětlit podstatu radioaktivních jevů. Ernest Rutherford publikuje v roce 1900 zprávu o radioaktivním záření, kde rozlišuje jeho tři druhy, alfa, beta a gama. V roce 1902 Frederick Soddy na základě studia rozpadu radia uveřejňuje teorii radioaktivního rozpadu. Pomocí ostřelování tenké zlaté folie alfa částicemi dochází Ernest Rutherford roku 1911 k objevu atomového jádra. Jsou postupně rozpracovány základní modely atomu. Rutherfordův planetární model je v roce 1913 nahrazen Bohrovým kvantovým modelem. Sen alchymistů, i když v poněkud přeneseném smyslu slova, se podařilo uskutečnit v roce 1919, kdy se Rutherfordovi podařilo realizovat první transmutaci prvků. Nevyrobil sice zlato, ale dokázal ozařováním alfa částicemi přeměnit dusík ^{14}N na kyslík ^{17}O.

Když v roce 1905 publikuje Albert Einstein svoji speciální teorii relativity, není ještě po jaderných zbraních ani památky. Nicméně z jeho práce vyplývá, a roku 1932 je také experimentálně potvrzeno, že z hmoty, přesněji z atomového jádra, lze získat neuvěřitelné množství energie. Chadwickův objev neutronu z roku 1932 umožňuje přesnější představu o atomovém jádře a hlavně tak byla získána „munice“ pro nastartování řetězové reakce. Následovaly další vědecké výzkumy, které potvrdily, že nejvhodnějším prvkem pro štěpení je uran ^{235}U, který se, pokud je ostřelován pomalými neutrony, štěpí za produkce dalších neutronů schopných ve vhodném prostředí vyvolávat další kaskádu štěpení.

Od těchto teoretických poznatků k vytvoření funkční jaderné zbraně vedla ještě poměrně dlouhá cesta. Napadení USA a jeho vstup do války mělo zásadní vliv na urychlení celého vývoje. Byl ustaven projekt Manhattan, sdružující asi 5 000 vědců, mezi nimiž byly takové kapacity jako Enrico Fermi a Julius Robert Oppenheimer, k vyřešení nelehkých technologických problémů na získání vojensky čistého uranu ^{235}U v dostatečném množství. Během výzkumů tohoto projektu byl také objeven vojenský potenciál plutonia ^{234}Pu, které představovalo rychlejší a levnější cestu k jaderné zbrani.

Byla také vyřešena konstrukční otázka jaderné zbraně a vyvinuty dva koncepty. Prvním je dělový, kde jedna podkritická část slouží jako projektil, který se vystřelí proti druhé podkritické části – cíli a dojde k řetězové reakci. Druhý, implozivní princip využívá ke stlačení dvou podkritických množství konvenční výbušniny. Tato technologie je pokročilejší, protože umožňuje lepší využití jaderného paliva.

Všechny teoretické a technologické problémy konstrukce jaderné zbraně byly vyřešeny na konci června 1945 a plutoniová implozivní bomba s názvem The Gadget (*Zařízení*) mohla být 16. července 1945 v 5:29:45 místního času, po menším zdržení způsobeném nepřízní počasí, odpálena. Lidstvo vstoupilo do atomového věku [1].

Další dva jaderné výbuchy, jež následovaly, bohužel nebyly výbuchy pokusnými, stály, a ještě budou stát, životy přes sto tisíc Japonců.

Konec druhé světové války a následující válka studená vedly k jadernému zbrojení dosahujícímu obludných rozměrů. Sovětský svaz se po USA stává druhou jadernou velmocí v roce 1949 a od té doby se datují „jaderné dostihy“ mezi těmito dvěma supervelmocemi, kterým zdárně sekundují i Velká Británie a Francie. Roku 1960 se do „jaderného klubu“ přidává i komunistická Čína.

Doktrína vzájemně zaručeného zničení mezi supervelmocemi USA a SSSR sice odrazovala obě země od použití jaderných zbraní v konfliktech, avšak vedla k masivnímu zbrojení, jež si vyžadovalo velké množství testování. Nezodpovědné atmosférické testování zejména USA a SSSR vedlo k uvolnění a rozptýlení velkých dávek radioaktivních izotopů do ovzduší a jejich rapidnímu nárůstu po celé Zemi.

Vrcholem těchto testů byl výbuch sovětské termonukleární bomby Car, která se svojí silou více než 2 500krát převyšující tonáž hirošimské bomby, byla největším jaderným výbuchem v dějinách lidstva.

Dramaticky narůstající množství izotopů z jaderných testů v životním prostředí alarmovalo sovětské i americké vědce a vedlo k podepsání smluv zakazujících atmosférické testování a výrazně omezujících testování podzemní.

Ačkoliv se může zdát, že doba „divokého“ testování již skončila, dávky ozáření, jež se dostaly mezi obyvatelstvo a dodnes na něj působí, rozhodně nebyly malé a i v současnosti je třeba mít na paměti, že neuvážené jaderné testování je hazardem se zdravím obyvatel na celé planetě.

1 SOUČASNÝ STAV

Jaderné zbraně spatřily světlo světa v roce 1945 a s nimi vznikla i potřeba jejich testů. Od roku 1945 do současnosti bylo provedeno téměř 2 400 testů jaderných zbraní s nemalým vlivem na zdraví obyvatelstva a kvalitu životního prostředí [14]. V současné době platí Smlouva o zákazu jaderných zkoušek v ovzduší, vesmíru a pod vodou (*Partial-Test-Ban Treaty, PTBT*) z roku 1963, povolující podzemní jaderné testování, která má však být nahrazena Smlouvou o úplném zákazu jaderných zkoušek (*Comprehensive-Nuclear-Test-Ban Treaty, CTBT*), otevřenou k podpisu v roce 1996. Navzdory tomu k jaderným testům dochází i nadále.

1.1 Jaderné zbraně

Jaderné zbraně jsou zbraně hromadného ničení, které využívají princip neřízené řetězové reakce jader těžkých prvků, zejména pak uranu ^{235}U a plutonia ^{239}Pu. K jaderným zbraním bývají řazeny také zbraně termonukleární, které k získání ničivé energie využívají slučování lehkých jader. Typicky se jedná o izotopy vodíku (deuterium a tritium) či izotopy lithia.

1.2 Jaderné testy

Jaderné testy jsou pokusné jaderné výbuchy sloužící k výzkumu jaderných zbraní. Vzhledem k faktu, že jaderné zbraně byly v historii lidstva vojensky použity jen dvakrát, jaderné mocnosti potřebovaly a potřebují větší množství dat o průběhu nukleárních explozí. Jsou pečlivě sledovány a data z nich jsou analyzována.

K testování existují nejrůznější racionální důvody. Z těch nejběžnějších jmenujme například zdokonalování konstrukce jaderných či fúzních systémů, testování nových nosičů jaderných zbraní, zjišťování dopadů jaderných výbuchů na bojovou techniku, opevnění, průmyslová a urbanistická centra, zkoumání vlivu jaderného výbuchu na morální odolnost vojsk, ale také na jejich fyzickou kondici a schopnost plnit

bojové úkoly, vytváření databáze pro počítačovou simulaci jaderných výbuchů a demonstrace síly státu a jeho obranyschopnosti [7]. Některé teroristické režimy používají jaderné testy také jako politický nástroj.

Jaderné testy se realizují na takzvaných jaderných střelnicích, místech odlehlých od civilizačních center, aby účinky testování na obyvatelstvo byly minimalizovány.

1.2.1 Rozdělení jaderných testů dle velikosti nálože

Mohutnost jaderných výbuchů se udává v kilotunách (kt) či megatunách (Mt) ekvivalentu výbuchu nálože trinitrotoluenu (TNT). Jedna kilotuna TNT převedena na jednotky SI je $4{,}18 \times 10^{12}$ J.

Z hlediska mohutnosti (síly, tonáže, ráže) můžeme jaderné a termonukleární zbraně rozdělit do následujících kategorií:

- jaderné nálože velmi malé ráže (do 1 kt)
- jaderné nálože malé ráže (do 15 kt)
- jaderné nálože střední ráže (do 100 až 150 kt)
- jaderné nálože velké ráže (do 1 Mt)
- jaderné nálože velmi velké ráže (nad 1 Mt)

1.2.2 Rozdělení jaderných testů dle místa konání

1.2.2.1 Atmosférické jaderné testy

Jako atmosférické jaderné testy označujeme jaderné testy konající se na zemi, na moři, ve vzduchu, či ve vysokých vrstvách atmosféry. Při realizaci těchto testů může být výbušné zařízení umístěno při zemi, na věži, lze také použít balónů, či může být shazováno z letadla. Výhodou těchto testů je, že umožňují modelovat, jak by vypadalo použití jaderných zbraní v případě válečného konfliktu.

1.2.2.2 Pozemní jaderné testy

Pozemní jaderné testy jsou testy odehrávající se na zemském povrchu. Během tohoto druhu testů je nasáváno množství materiálu, který pak může v podobě radioaktivního spadu ovlivňovat i velmi vzdálené lokace. Nevýhodou je velké množství radioaktivně kontaminovaného materiálu, který stoupá v podobě typického „atomového hřibu“ a může se potom v podobě radioaktivního spadu dostat i na velmi vzdálené destinace od původního místa jaderného testu.

1.2.2.3 Hladinové jaderné testy

Hladinové jaderné testy jsou svým provedením velice podobné pozemním testům s tím rozdílem, že se nevytváří tak velké množství radioaktivního spadu jako při testech pozemních. Nicméně vzniká nezanedbatelné množství páry. Při tomto druhu testů může také vznikat rychle se šířící rázová vlna podobná vlně cunami.

1.2.2.4 Podmořské jaderné testy

Podmořské jaderné testy se odehrávají pod mořskou hladinou, tvoří se při nich velké množství radioaktivní páry, která může kontaminovat okolí. Slouží k simulacím účinku jaderných zbraní proti námořním hladinovým plavidlům a ponorkám. Největší nebezpečí představuje právě množství radioaktivní páry, uvolňující se do atmosféry.

1.2.2.5 Testy ve vysoké atmosféře

Testy ve vysoké atmosféře jsou testy, které se odehrávají více než 50 km nad zemským povrchem [17]. Při realizaci jaderného testu ve vysoké atmosféře dochází také ke vzniku silného elektromagnetického pulzu a narušení magnetosféry Země, což může způsobit rozsáhlé výpadky telekomunikační sítě a další škody na elektronických zařízeních.

1.2.2.6 Podzemní jaderné testy

K podzemním jaderným testům dochází v různých hloubkách pod zemským povrchem. Vzhledem ke Smlouvě o zákazu jaderných zkoušek v ovzduší, vesmíru a pod vodou (*Partial-Test-Ban Treaty, PTBT*) z roku 1963 jsou toto jediné oficiální jaderné testy, ke kterým může v současnosti docházet. U tohoto druhu testů je minimalizováno riziko vzniku radioaktivního spadu, a tudíž je radiační kontaminace lokalizována pouze na blízké okolí. Jisté nebezpečí představuje neodhadnutí geologických podmínek a případný únik kontaminovaného materiálu na povrch a do atmosféry. V závislosti na použité tonáži nukleárního zařízení vzniká také měřitelná seismická aktivita.

1.3 Jaderné testy jednotlivých států

Vzhledem k tomu, že technologie jaderných zbraní, i když k jejímu vyvinutí bylo zapotřebí spojení vědců z nejrůznějších oborů, byla v praktických ohledech technologií nevyzkoušenou, bylo třeba zjistit chování jaderných a termonukleárních zbraní při praktickém použití. Jaderné a termonukleární zbraně mají jakožto zbraně hromadného ničení ohromný rádius působení, proto bylo třeba vytipovat dostatečně odlehlé oblasti pro provádění jaderných testů.

Každá jaderná velmoc postupovala podle svých možností. Ať už se jedná o neobydlené pouštní oblasti Nevady, rozlehlé kazašské stepi, nehostinnou oblast arktického severu, řídce obydlené tichomořské oblasti či saharskou poušť.

1.3.1 Jaderné testy Spojených států amerických

První jadernou velmocí se staly Spojené státy americké. Dne 16. července 1945 se v poušti státu Nové Mexiko uskutečnil první pokusný jaderný výbuch. 20kilotunová plutoniová nálož, zvaná prostě The Gadget (*Zařízení*), byla odpálena ráno v 5:29:45 v rámci testu Trinity. Jednalo se o plutoniovou nálož, která využívala nového principu stlačení materiálu do kritického množství pomocí chemických výbušnin.

Od té doby do roku 1992 uskutečnily Spojené státy testy 1 052 pokusných jaderných zařízení různých tonáží během 54 testovacích kampaní. Z toho bylo 212 testů atmosférických (9 ve vysokých vrstvách atmosféry, 83 vzdušných, 84 pozemních a 36 hladinových), 5 podmořských a 835 podzemních.

Nejvyužívanějším areálem testování nukleárních zbraní USA je Nevadská testovací střelnice (*Nevada testing site, NTS*). V letech 1951 až 1958 zde bylo provedeno 100 atmosférických tesů a v letech 1961 až 1992 828 podzemních testů.

Další významné jaderné střelnice USA se nacházejí v Tichomoří, zejména pak na atolu Enewetak v souostroví Marshallovy ostrovy, kde bylo mezi roky 1948 až 1958 uskutečněno 43 testů, mezi nimi i první termojaderné zařízení s kódovým označením Mike.

Atol Bikiny, nacházející se rovněž v souostroví Marshallovy ostrovy, sloužil jako střelnice pro termonukleární zbraně během testovací kampaně Castle, kdy bylo v rámci testování odpáleno pět termonukleárních zařízení, včetně zatím největšího amerického zařízení Shrimp o síle 15 Mt při pokusu Castle Bravo dne 1. března 1954.

Vánoční ostrov v souostroví Kiribati v Tichém oceánu byl využíván jako jaderná střelnice společně pro USA a Velkou Británii. USA zde v rámci série jaderných testů Dominic I a II v roce 1962 odpálili 22 pokusných jaderných zařízení a Britové zde v roce 1957 úspěšně testovali svoji první vodíkovou zbraň.

U Johnstonova ostrova v severním Pacifiku došlo v rámci kampaní Hardtacks I a Dominic I a II k sérii 12 testů ve vysokých vrstvách atmosféry. Některé testy (Starfish Prime) se odehrávaly ve výškách 400 km nad zemským povrchem. Jejich důsledkem bylo narušení Van Allenových pásů a vytvoření silné elektromagnetické vlny [4].

Z dalších testovacích oblastí jmenujme ostrov Amčitka v Aleutském souostroví na Aljašce, kde byl uskutečněn největší americký podzemní test, oblast prvního jaderného testu Trinity v Novém Mexiku, Hattiesburg ve státě Mississippi, kde byly uskutečněny dva pokusné podzemní výbuchy v solných dolech, Hot Creek Valley a Fallon v Nevadě, Green Valley a Rifle v Coloradu a Carlsbad a Farmington v Novém Mexiku [3].

1.3.2 Jaderné testy Svazu sovětských socialistických republik

Od roku 1949 do roku 1990 provedl Sovětský svaz celkem 715 jaderných testů, z toho 219 atmosférických (5 ve vysoké atmosféře, 177 vzdušných, 32 povrchových a 2 hladinové) a 496 podzemních.

SSSR uskutečnilo svůj první jaderný test 29. srpna roku 1949. Plutoniová nálož o ráži 22 kt byla spuštěna z 30 m vysoké věže na jaderném polygonu Semipalatinsk na území dnešního Kazachstánu.

První termojaderný test SSSR se uskutečnil 12. srpna 1953, jednalo se o zařízení ráže 400 kt. U této bomby ještě převažoval princip štěpení nad principem fúze [9]. K testu první skutečné vodíkové bomby došlo 22. listopadu 1955 na jaderné střelnici Semipalatinsk, bomba měla po technických úpravách, které zhruba desetkrát zmenšily její účinnost, ráži 1,6 Mt [9].

Rusko v průběhu svého jaderného testování používalo zejména dvě jaderné střelnice, již zmiňovaný jaderný polygon v kazašské stepi u města Semipalatinsk a testovací střelnici v arktické oblasti v souostroví Nová země, kde byla také 30. října 1961 odpálena zatím nejsilnější, dvoustupňová (původně plánovaná jako třístupňová), termonukleární nálož v dějinách lidstva, a to 50Mt bomba, vyvíjená pod jménem Ivan či Váňa, západem později překřtěná na Car-bombu (*Tsar Bomb*).

1.3.3 Jaderné testy Velké Británie

Velká Británie uskutečnila celkem 45 jaderných testů, z toho 21 v australských teritoriích a převážnou většinu zbývajících na amerických jaderných střelnicích v Nevadě a v Tichomoří.

První britský jaderný test se odehrál 3. srpna 1953. Jednalo se o implozní plutoniové zařízení o ráži 25 kt. Test byl proveden jako hladinový test na střelnici na ostrovech Monte Bello u západního pobřeží Austrálie.

Největší britský jaderný test na australském území se uskutečnil 19. června 1956, kdy byla (opět na střelnici Monte Bello) v rámci operace Mozaika (*Mosaic*)

odpálena jako pokus G2 bomba o síle 98 kt, která měla být základem pro sestrojení zbraně vodíkové. Je zajímavostí, že její ráže byla ve výsledku o 50 % silnější oproti teoretickým výpočtům.

K prvnímu, zcela úspěšnému testu britské termonukleární zbraně došlo 8. listopadu 1957, kdy na střelnici na Vánočním ostrově byla v rámci operace Grapple z letadla shozena dvoustupňová termonukleární bomba o síle 1,8 Mt.

Nejsilnějšími britskými pokusnými termojadernými výbuchy byly ty z 3. a 28. září 1958, jednalo se o termonukleární zařízení o ráži 2,5–3 Mt, která byla odpálena v atmosféře u Vánočního ostrova.

Velká Británie také uskutečnila na 25 podzemních nukleárních testů na americké nukleární střelnici Nevada testing site [10].

1.3.4 Jaderné testy Francie

Po 2. světové válce, i přes nestabilitu a nedostatek financí, cítila Francie potřebu zahájit práci na výrobě vlastního jaderného arzenálu, který by jí umožnil uchovat si významné geopolitické postavení. Tato se prohloubila zejména v souvislosti se Suezskou krizí.

Celkem bylo francouzskou vládou do dnešního dne učiněno 210 jaderných testů, z toho 17 v poušti na území Alžírska v letech 1960-1966 a 193 ve Francouzské Polynésii v následujícím období do roku 1996.

Na pole jaderného testování vstoupila Francie jako čtvrtá země na světě (po USA, SSSR a Velké Británii) odpálením první vlastní, samostatně vyvinuté jaderné nálože dne 13. února 1960 v oblasti alžírské Sahary, uprostřed války o nezávislost Alžírska. Jednalo se o atmosférický test s kódovým označením Gerboise Bleue (*Modrý tarbík*) s tonáží nálože 70 kt, čímž předčil všechny do té doby uskutečněné pokusné výbuchy.

Do dubna roku 1961 následovaly další tři atmosférické testy, ovšem o podstatně menší síle. K těmto odpalům do atmosféry bylo využíváno jaderné testovací středisko C.S.E.M. (*Centre Saharien d'Expérimentations Militaires*) na základně Reggane, které

nahradilo dosavadní C.I.E.E.S. (*Centre Interarmées d'Essais d'Engins Spéciaux*) v Hammaguiru.

Po vyhlášení samostatnosti Alžírska v roce 1962 přešla Francie od atmosférického k podzemnímu testování, ovšem stále na území alžírské pouště. V této souvislosti bylo rovněž přemístěno testovací jaderné zařízení do oblasti In Ekker (C.E.M.O. - *Centre d'Expérimentations Militaires des Oasis*).

V období od listopadu 1961 do února 1966 bylo uskutečněno 13 podzemních jaderných testů, počínaje Agathe. Během druhého podzemního testu Béryl (20 kt) dne 1. května 1962 došlo k nehodě, když se díky nedostatečnému utěsnění uvolnil radioaktivní prach do atmosféry a devět vojáků bylo vystaveno ozáření o dávce 600 mSv a dalších 100 osob dávce 50 mSv. Ještě v roce 2006 bylo na místě nehody naměřeno 93 μSv za hodinu, což odpovídá 1% povolené roční dávky.

Dalšími z hlediska síly nálože významnými podzemními testy provedenými na Sahaře byly Rubis (100 kt) v roce 1963 a Saphir (150 kt) v roce 1965. Po vypršení pětileté smlouvy s nově ustavenou alžírskou vládou přesunula francouzská armáda těžiště svého pokusného jaderného testování do Francouzské Polynésie. Nové střelnice pro experimentální jaderné výbuchy vznikly na atolech Mururoa a Fangataufa v Tichomoří.

Francie započala s vývojem vlastní termonukleární bomby a dne 24. srpna 1968 následoval na Fangataufa první pokusný výbuch dvoustupňové vodíkové nálože Canopus o síle 2,6 Mt, který je zároveň co do tonáže dosud největším francouzským experimentem. Francie se tak zařadila jako pátá po boku USA, SSSR, Velké Británie a Číny mezi země s programem na výzkum a testování termonukleárních zbraní. Po výbuchu zůstal atol z důvodu radioaktivní kontaminace neobyvatelný. Celkem realizovala Francie v oblasti Tichomoří na 40 atmosférických jaderných testů.

Vzhledem ke skutečnosti, že v roce 1963 odmítla účast na PTBT, pokračovala Francie i nadále v provádění atmosférických jaderných testů, a to až do roku 1973, kdy pod tlakem a v reakci na vyvolanou celosvětovou vlnu odporu, zastoupenou především Novým Zélandem a Austrálií, tuto činnost ukončila. V návaznosti na ratifikaci CTBT

v roce 1996 uskutečnila Francie svůj vůbec poslední pokusný výbuch nálože s označením Xouthos (120 kt) dne 27. ledna 1996 ve Francouzské Polynésii [16].

1.3.5 Jaderné testy Číny

Čína celkem ve své historii provedla 45 jaderných testů, z toho 22 atmosférických a 23 podzemních, všechny na testovací základně Lop Nur poblíž města Malan v autonomní provincii Sin-ťiang.

Vůbec první test byl uskutečněn 16. října 1964 pod kódovým označením Zařízení 596, reprezentující měsíc a rok, kdy SSSR odmítl poskytnout Číně prototyp jaderného zařízení [15]. Jednalo se o odpal atmosférický o síle 20-22 kt. Čína tak chtěla demonstrovat vlastnictví prostředků zastrašování jak vůči USA, tak vůči tehdejšímu SSSR.

Velice záhy se Číně podařilo vyvinout a úspěšně vyzkoušet svoji první vodíkovou bombu. Stalo se tak 17. června 1967, tj. pouhých 32 měsíců po úplně prvním čínském experimentálním jaderném výbuchu, což je historicky nejkratší doba, za kterou kdy jaká země dokázala přejít od štěpné reakce k fúzní. Dle pořadí bylo určeno kódové označení Test č. 6 a síla nálože činila 3-3,3 Mt.

Od roku 1969 začala Čína souběžně s atmosférickým testováním provádět i testy podzemní. Poslední ze svých 22 odpalů do atmosféry uskutečnila Čína 16. října 1980 (tonáž 200 kt - 1 Mt) a byl to zároveň vůbec poslední atmosférický test na světě. Dne 29. září 1988 Čína odzkoušela svoji první neutronovou bombu (1-20 kt, v pořadí její 34. jaderný test celkem). Ukončení jaderného testování celkově posledním, 45. čínským pokusným výbuchem dne 29. července 1996 (1-5 kt) předcházelo podpisu CTBT Čínou v září téhož roku.

Z hlediska tonáže odpálených zařízení byl největší čínskou explozí v atmosféře termonukleární jaderný test z roku 1976 o síle 4 Mt, nejrozsáhlejší podzemní výbuch ráže 660-1000 kt proběhl v roce 1992. Celkově realizovala Čína 15 odpalů s tonáží nad 100 kt a 6 odpalů o síle přesahující 1 Mt [6].

1.3.6 Jaderné testy Indie

Indie celkem uskutečnila 6 jaderných testů, všechny na základně v oblasti Pokhranu a všechny jako podzemní.

Svůj první pokusný výbuch nálože plutonia o síle 6-20 kt, který označila za „mírovou jadernou explozi“, provedla 18. května 1974. Ve známost vešel pod označením Operation Smiling Budha (*Operace smějící se Budha*). Indie tak pravděpodobně chtěla vyslat vzkaz o vlastnictví zastrašujících prostředků a posílit a upevnit svou regionální pozici. Bylo to vůbec poprvé po vzniku Smlouvy o nešíření jaderných zbraní, co byl proveden jaderný test, a to vyvolalo značnou nelibost ze strany světové veřejnosti.

Po téměř čtvrt století dlouhé pauze, způsobené obavou z mezinárodní kritiky, byly za nejpřísnějšího utajení zahájeny přípravy na sérii dalších jaderných testů. Ve dnech 11. a 13. května 1998 byly v rámci Operace Shakti provedeny dvě sady pokusných výbuchů, první zahrnovala tři zařízení odpálená zároveň, z nichž jedno bylo termonukleární, druhou sadu představovala detonace dvou zařízení současně [18].

1.3.7 Jaderné testy Pákistánu

Pákistán vyvíjel jaderné zbraně v utajení mnoho desetiletí, počínaje koncem 70. let 20. století, a to zejména v reakci na jaderný výzkum Indie, přičemž byl ochoten dosáhnout tohoto cíle i za cenu totálního ekonomického vyčerpání a uvržení běžného obyvatelstva do naprosté chudoby. Ovšem i přesto dle USA nevlastnil Pákistán jadernou zbraň minimálně do roku 1990.

Až v roce 1998 uskutečnil Pákistán dvě série pokusných výbuchů v pohoří Chagai, rovněž jako odpověď na jaderné testy provedené Indií jen o pár týdnů dříve, a tím dovršil svůj vstup mezi světové jaderné velmoci.

K cvičným explozím došlo ve dnech 28. a 30. května 1998. V první sérii, s kódovým označením Chagai I, proběhla detonace celkem 5 zařízení v podzemním horizontálním tunelu, umístěném u Koh Kambaran v okrsku Chagai v Balúčistánu.

Ohlášená síla náloží měla dohromady představovat 40-45 kt, s ráží největší nálože pohybující se okolo 30-35 kt. Avšak na základě naměřených seismologických otřesů, které odpovídaly tonáži cca jen 2-15 kt, dospěly západní mocnosti k domněnce, že Pákistán sílu a počet bomb úmyslně přecenil.

Druhý pokusný výbuch, nazvaný Chagai II, proběhl v poušti Kharan ve stejnojmenném okrsku rovněž na území Balúčistánu o dva dny později, a zahrnoval pouze jedno jaderné zařízení odpálené ve vertikálním podzemním tunelu. Západ se opět kloní k odhadu, že síla exploze činila pouze cca 2 kt, oproti oznámeným 18-20 kt [18].

1.3.8 Jaderné testy Severní Koreje

Severní Korea bývala signatářem Smlouvy o nešíření jaderných zbraní, ale v roce 2003 oznámila odstoupení poté, co ji USA obvinily z rozvoje tajného programu na obohacování uranu a vypověděly jí energetickou podporu.

V roce 2005 Severní Korea prohlásila, že vlastní funkční jadernou zbraň, ačkoliv západní mocnosti toto vyjádření zpochybnily z důvodu nedostatku provedených testů. V reakci na tyto pochyby oznámila 9. října 2006 Severní Korea, že v provincii Severní Hamgyong úspěšně uskutečnila svůj první jaderný test.

Zpravodajská služba USA se domnívá, že Severní Korejci skutečně odpálili jaderné zařízení, ale zároveň se shoduje, že tento test byl zřejmě úspěšný pouze částečně. Síla exploze je na základě naměřených seismologických údajů odhadována na méně než 1 kt, což je výrazně pozadu v porovnání s ostatními zeměmi při jejich prvních pokusných výbuších.

25. května 2009 Severní Korea provedla svoji druhou cvičnou jadernou explozi ve stejné lokalitě, tentokrát pravděpodobně s daleko vyšší tonáží, přičemž odhady založené na velikosti seismických otřesů se pohybují od 3 do 20 kt [20].

1.4 Jaderné testy a mezinárodní právo

Z počátku nebylo provádění jaderných testů mezinárodním právem nijak upravováno a bylo zcela na libovůli a zodpovědnosti jaderných velmocí, jak a kde své testy uskutečňují.

Ale již v polovině 50. let sovětští vědci odhadovali, že pokud budou testy pokračovat, za třicet let se kontaminace rozsáhlých oblastí světa, včetně velkých městských aglomerací, zvýší 10násobně [7]. V případě takovéhoto zamoření by již velmi reálně hrozil zásah do genetického kódu lidstva jako celku a samozřejmě i do genetických kódů ostatních organismů.

Distribuce radioaktivity byla sledována na koncentracích stroncia 90, což je radionuklid s poločasem rozpadu 27,7 let a má v živočišných tkáních afinitu k vápníku. Z měření obsahu ^{90}Sr v mléce, prováděných v americkém státě Wisconsin v letech 1954-1957, se jeho obsah zvýšil čtyřnásobně. Zvýšený výskyt radioaktivního stroncia byl zaznamenán i v Moskvě, a to jak v potravinách, tak v lidských kostech [7].

V červnu 1957 navrhl Sovětský svaz dvou až tříleté moratorium na jaderné testy pod dohledem mezinárodní komise. I když přední američtí jaderní vědci přesvědčovali prezidenta Eisenhowera, že jaderné testy jsou nezbytné pro vyvinutí takzvané „čisté bomby“ a že Sovětský svaz beztak moratorium dodržovat nebude, je faktem, že USA i SSSR v letech 1959 a 1960 moratorium dodržely a Velká Británie dokonce neprováděla testy až do roku 1961.

1.4.1 Smlouva o částečném zákazu zkoušek (PTBT)

Na květen 1960 se chystala k podpisu Smlouva o zákazu jaderných testů v atmosféře, v oceánech, v kosmu a pod zemí. Tuto smlouvu v plné šíři akceptoval i Sovětský svaz a Velká Británie. Bohužel podpis této smlouvy zhatil incident sestřelení amerického špionážního letounu U2 nad sovětským územím 1. května 1960.

Tento incident způsobil, že smlouva byla podepsána až 5. srpna 1963 jako Smlouva o zákazu zkoušek jaderných zbraní v atmosféře, v kosmickém prostoru a pod

vodou (*Limited-Test-Ban Treaty* nebo také *Partial-Test-Ban Treaty, PTBT*), která vstoupila v platnost 10. října 1963. Do července roku 2008 ke smlouvu ratifikovalo 123 zemí. Deset států smlouvu podepsalo, ale neratifikovalo. Státy se v této smlouvě zavazují neprovádět jakékoliv výbuchy jaderných zbraní v místech nacházejících se pod jejich jurisdikcí nebo kontrolou [19].

Po podepsání této smlouvy mohlo tedy docházet již pouze k podzemním testům, u kterých je riziko kontaminace radioaktivním spadem minimální. Bohužel vlivem používání testovacích zařízení velkých ráží nejméně 10 % všech podzemních testů narušilo integritu prostředí a radioaktivní materiál se dostával mimo hranice zkušebních střelnic.

Tato skutečnost vedla 3. července 1974 k podpisu bilaterální Smlouvy o omezení podzemních zkoušek mezi USA a SSSR (*Threshold-Test-Ban Treaty, TTBT*), omezující ráži podzemních testů na maximálně 150 kt.

1.4.2 Smlouva o úplném zákazu jaderných zkoušek (CTBT)

Na základě série rezolucí Valného shromáždění OSN v roce 1977 Sovětský svaz, Spojené státy americké a Velká Británie přistoupily k vypracování smlouvy o úplném a všeobecném zákazu zkoušek jaderných zbraní.

Tato smlouva od samého počátku narážela na množství problémů, jednak ze strany amerických vědců, kteří tvrdili, že odstrašovací efekt amerických jaderných zbraní bude podlomen bez podepření provedenými jadernými testy, a dále pak tito vědci tvrdili, že při vývoji nových zbraňových systémů je z hlediska funkčního i z hlediska bezpečnostního nemyslitelné vypustit fázi testování. Dalším faktorem, který výrazně zpozdil přijetí smlouvy, byla sovětská invaze do Afghánistánu v roce 1980.

Smlouva o úplném zákazu jaderných zkoušek (*Comperhensive-Nuclear-Test-Ban Treaty, CTBT*) byla Valným shromážděním OSN přijata 10. září 1996, téměř dvacet let od prvních impulsů k jejímu vzniku. Téhož roku 24. září byla smlouva předložena k podpisu. K 31. březnu 2011 smlouvu podepsalo 182 zemí a ratifikovalo ji 152 států včetně České republiky [8].

Platnost smlouvy je podmíněna popisem a ratifikací 44 vyjmenovaných zemí. K 31. březnu 2011 byla smlouva podepsána 41 vybranými státy (nepodepsaly Indie, Pákistán a Severní Korea) a ratifikována 35 vybranými státy (chybí podpisy USA, Izraele, Číny, Íránu, Egypta a Indonésie).

V současnosti se jaderné testování ubírá cestou testů používajících podkritická množství jaderného materiálu. Tyto druhy testů neporušují Smlouvu o úplném zákazu jaderných zkoušek. Tuto variantu volí pro svůj testovací program zejména Rusko a Spojené státy americké. Nicméně úskalím této cesty je fakt, že podkritické testování přináší hodnotné výsledky pouze zemím, které již mají dostatečné množství poznatků získaných na základě plnohodnotného jaderného testování. Toto mohou země, které do „jaderného klubu“ vstoupily v historický nedávné době, právem pociťovat jako diskriminaci.

Další možností jsou počítačové simulace, ale opět s tím dovětkem, že pouze jaderná velmoc, která sesbírala dostatek statistických dat o jaderných explozích, je schopna s dostatečnou věrností virtuálně simulovat průběh testu, nehledě na fakt, že tyto simulace vyžadují neskutečně velké množství strojového výpočetního času.

1.5 Ionizující záření, jeho druhy a ochrana před nimi

Jako ionizující záření označujeme takové záření, jehož kvanta mají natolik vysokou energii, že jsou schopna vyrážet elektrony z atomového obalu, a tím látku ionizovat [11].

Rozeznáváme tři základní druhy přímo ionizujícího záření, alfa, beta, gama, a nepřímo ionizující záření neutronové. U záření alfa, beta a gama se za hraniční energii považuje energie 5 keV [11]. Nepřímo ionizující neutronové záření nemá definovánu tuto prahovou hodnotu, protože i velmi pomalé neutrony jsou schopné vstoupit do jádra a vyvolat tak sekundární ionizaci. Podobně není tato prahová hodnota definována pro pozitronové záření beta+, kde pozitrony s nízkou energií anihilují s elektrony a vytváří tím tvrdé záření gama.

1.5.1 Záření alfa

Záření alfa je tvořeno jádry helia He^{+}. Toto záření má nízkou pronikavost v pevných látkách (řádově zlomky mm) a k jeho odstínění postačuje i tenká vrstva materiálu (typicky se udává list papíru) nebo dostatečná vzdálenost (několik cm) od alfa zářiče. Alfa záření představuje největší hrozbu při přímém kontaktu se zářičem, při inhalaci či ingesci, nebo také při vniknutí zářiče do těla poraněním.

1.5.2 Záření beta

Rozeznáváme dva druhy beta záření. Jsou to záření $beta^{-}$, tvořené proudem elektronů, a záření $beta^{+}$, jež tvoří proud pozitronů.

Záření $beta^{-}$ lze nejefektivněji odstínit 5-10 cm silnou vrstvou akrylátového skla, která slouží ke zpomalení elektronů, kombinovanou s tenkou vrstvou olova, které pohltí vznikající brzdné záření.

U záření $beta^{+}$ je na odstínění kromě vrstvy akrylátového skla nezbytné použít také nejméně 3cm silnou vrstvu olova, která je schopna zachytit tvrdé brzdné záření o energii 511 keV, vznikající při anihilaci elektron-pozitronového páru.

1.5.3 Záření gama

Záření gama je tvořeno proudem gama částic – vysokoenergetických fotonů. Toto záření je silně pronikavé. K jeho odstínění je vhodné použít materiály s vysokou měrnou hustotou (olovo, wolfram, baryt).

1.5.4 Nepřímo ionizující neutronové záření

Neutronové záření tvoří proud rychlých neutronů. Neutrony samy o sobě nezpůsobují ionizaci, ale svými reakcemi s atomy, či jejich jádry vytváří sekundární ionizující záření.

Neutrony je nutné nejdříve zpomalit látkami, jež jsou bohaté na vodík (plast, beton, parafín). Po zpomalení neutronů je důležité použít druhou vrstvu s látkami, jež jsou schopny neutrony absorbovat (bór, kadmium, indium). Při absorbování neutronů dochází k emisi brzdného záření a toto záření je třeba odstínit vrstvou olova.

1.6 Biologické účinky ionizujícího záření na tkáň

1.6.1 Molekulární a buněčné změny po expozici ionizujícímu záření

Lidské tělo je přibližně ze 70 procent tvořeno vodou, a tudíž je z hlediska poškození radiací vysoce pravděpodobné, že bude zasažena molekula vody. Radiolýzou vody lze získat různé volné radikály. Tyto volné radikály jsou velice reaktivní a poškozují biomolekuly tím, že jim odnímají vodík [21].

1.6.2 Vliv ionizujícího záření na poškození DNA a RNA

Ionizující záření je schopno vyvolat změny na molekulách DNA a RNA. Může poškozovat báze i vést ke zlomům jednoho nebo obou řetězců dvojšroubovice DNA. Při vícenásobných zlomech na jedné šroubovici a uvolnění vodíkových vazeb DNA dochází ke zvýšené ohebnosti molekuly, což v konečném výsledku může vést ke vzniku nových vazeb uvnitř jedné molekuly DNA. Toto dále vede ke vzniku odchylek v genetickém kódu [21].

Po ozáření dochází v buňkách ke zpomalení syntézy vlastní DNA, neboť buňka reaguje na poškození genetického kódu tvorbou supresorových proteinů (např. p53), aby zamezila přenos případných genových defektů do filiálních buněčných generací [21].

Většina poškození DNA je zcela opravitelná. Buňky disponují enzymovými systémy, které zvládají nápravu těchto škod. Replikační (nebo základní reparační) systém dělá jednu chybu na 10^7 nukleotidů. Systém opravující neshody v DNA opravuje

99 % replikačních chyb, zvyšujíce celkovou přesnost na jednu chybu na 10^9 nukleotidů [21].

RNA polymerázy dělají jednu chybu na 10^4 nukleotidů, protože nemají tak důmyslné enzymové systémy. Toto odráží skutečnost, že transkripce nemusí být tak přesná jako DNA replikace, protože RNA není používána jako trvalá zásobní forma genetické informace. Radiační poškození RNA je podstatně menší než u DNA. Rozsah retikulací je malý, neboť jejich molekulová hmotnost je proti DNA podstatně menší [21].

Efekt ionizujícího záření v buňkách - pokud byla DNA buňky poškozena, je několik možností, jak se její osud bude vyvíjet [21]:

- DNA byla úspěšně reparována, buňka přežívá a je schopná se množit
- DNA byla poškozena, buňka není schopná se množit a umírá
- DNA byla poškozena, buňka je schopna se dělit a její vlastnosti mohou být pozměněné; tyto buňky mohou vést k nádorovému bujení [21]

1.6.3 Stochastické a deterministické účinky

Z hlediska dávky, účinku i ochrany před zářením rozlišujeme dva základní typy účinků - stochastické a deterministické.

Deterministické účinky jsou takové, kdy účinek roste s růstem obdržené dávky záření. Tyto účinky lze vyloučit, nebude-li u daného organizmu překročena určitá (pro daný účinek specifická) prahová hodnota. Do této skupiny patří například akutní nemoc z ozáření nebo radiační poškození kůže. S ohledem na existenci dávkového prahu jsou z hlediska času zpravidla akutní [21].

Stochastické účinky jsou takové, u nichž s dávkou roste míra účinku. Jakékoliv ozáření má tedy nenulovou pravděpodobnost vzniku. Příkladem jsou nádory indukované ozářením u ozářených jedinců a genetické změny, projevující se u následujících generací. Je velmi nesnadné odlišit nádorová onemocnění vyskytující se přirozeně v každé populaci od onemocnění, která mají za původce předchozí vystavení působení ionizujícímu záření [21].

2 CÍL PRÁCE A HYPOTÉZY

Od roku 1945 do současnosti bylo po celém světě provedeno více než 2000 jaderných testů, z toho 502 atmosférických o celkové ráži přibližně 440 Mt. Většina testů se uskutečnila na severní polokouli. Testování jaderných zbraní dosáhlo svého vrcholu v letech 1952 – 1958 a 1961 – 1962. Do roku 1963 nebylo jaderné testování nijak ošetřeno mezinárodními smlouvami, od tohoto roku vstoupila v platnost smlouva o částečném zákazu zkoušek, zakazující atmosférické testy. V roce 1996 byla otevřena k podpisu smlouva o úplném zákazu jaderných zkoušek.

Jaderné testování zanechalo na Zemi poměrně značnou dávku radioaktivity a je otázkou, zda toto množství má nějaké kvantifikovatelné účinky na životy a zdraví obyvatelstva.

Cílem této bakalářská práce je popis testování jaderných zbraní od roku 1945 do současnosti a zhodnocení vlivu jednotlivých druhů jaderných testů na zdraví obyvatelstva a vliv na kvalitu životního prostředí.

V praktické části své práce jsem se rozhodl porovnat průběh jaderného testování, a to zejména atmosférických testů, a jeho vliv na efektivní dávky a výskyt onkologických onemocnění v populaci. Pomocí základního statistického vyhodnocení těchto údajů bude možno zodpovědět základní **hypotézy**, které jsem si pro svou práci stanovil:

a) Jaderné testy mají statisticky významný vliv na zvýšení výskytu rakovinných onemocnění populace.

b) Podzemní jaderné testy mají menší důsledky pro zdraví obyvatel a kvalitu životního prostředí než ostatní druhy jaderných testů.

3 METODIKA

Vzhledem k povaze zvoleného tématu bakalářské práce není umožněn sběr vlastních statistických údajů. Jelikož vytvoření datové základny je nezbytným počátečním předpokladem pro zhodnocení stanovených hypotéz a vyvození relevantních závěrů, vychází práce v tomto ohledu z různých dostupných zdrojů, zejména z vědeckých studií a průzkumů mezinárodních organizací, přičemž se snaží o kompilaci nashromážděných dat v logické posloupnosti a, vzhledem k omezení danému rozsahem práce, se zaměřením na nejdůležitější aspekty problému. V první fázi se tedy jedná o souhrn údajů týkajících se množství, druhu a síly jaderných testů včetně jejich časového průběhu, identifikaci uvolňovaných radionuklidů při znalosti jejich vlastností a účinků na živé organismy a zejména pak údajů o odvozených dávkách ozáření na tyto organismy.

Na tomto základě práce hledá příčinné souvislosti a pokouší se kvantifikovat riziko zvýšení pravděpodobnosti rakovinových onemocnění v populaci v důsledku expozice ozáření z jaderných testů a zároveň nastínit problémy této kvantifikace spojené s odlišením příspěvku tohoto jednotlivého zdroje od ostatních zdrojů ozáření a s vývojem celkového trendu onkologických onemocnění u obyvatelstva v současnosti. Závěry práce jsou doplněny o modelový případ a interpretaci některých vlastních postřehů.

Vzhledem k rozsahu bakalářské práce jsem se při sběru dat týkajících se jaderného testování rozhodl zaměřit především na atmosférické testy. Příspěvek atmosférických testů k celosvětovým dávkovým úvazkům je vzhledem k jejich ráži a množství radionuklidů vyvržených do životního prostředí oproti ostatním druhům testů dominantní.

Jako datová základna týkající se jaderného testování jsou použity publikace UNSCEAR (*United Nations Scientific Committee o the Effects of Atomic Radiation*), v kterých jsou sumarizovány informace týkající se průběhu atmosférických testů od roku 1945 do současnosti, včetně odvozených dávek z ozáření.

Pokud se týká vlivu jaderného testování na zdraví obyvatelstva, rozhodl jsem se spočítat teoretické incidence všech nádorových onemocnění způsobené známým dávkovým úvazkem z atmosférických testů v čase a pak je pomocí tkáňového váhového faktoru přepočítat na incidence konkrétních nádorových onemocnění spojených s expozicí ionizujícímu záření z těchto testů. Vycházel jsem z lineárního neprahového modelu (*linear-non-treshold model*, či *LNT model*) sledujícího vztah dávka - účinek.

Jako konkrétní nádorová onemocnění jsem zvolil rakovinu plic, mající vztah k působení globálního spadu a možnosti jeho inhalace, rakovinu žaludku, mající souvislost s ingescí spadových radionuklidů, leukémii, mající afinitu k ukládání radionuklidu stroncia ^{90}Sr v kostech, rakovinu štítné žlázy, k níž je afinitní radionuklid jódu ^{131}I, rakovinu gonád a rakovinu prsu.

Dále jsem se potom rozhodl porovnat v rámci modelového případu výsledky tohoto teoretického výpočtu se skutečnými statistickými údaji o vývoji rakovinných incidencí v čase ve vybraných světových lokalitách.

Jako zdroj dat o reálné incidenci a nádorových onemocněních jsem použil statistické údaje evidované Světovou zdravotnickou organizací (*WHO*), přesněji její Mezinárodní agenturou pro výzkum rakoviny (*International Agency for Research on Cancer, IARC*). Tato agentura ve svých sbornících Incidence rakoviny na pěti kontinentech, svazek I až IX (*Cancer Incidence in Five Continents, Vol. I-IX*) shrnuje data sesbíraná z různých oblastí světa během let 1960 až 2002 (viz Tabulka 1).

Vzhledem k tomu, že intenzita jaderného testování dosáhla svého vrcholu v roce 1962, a s ohledem na skutečnost, že stochastické účinky ionizujícího záření se projevují v odstupu několika let až desetiletí, je pro účely hodnocení nejvhodnější použít ty soubory dat (světové lokality), které jsou vedeny již od roku 1960 a kde by tedy počáteční hodnoty incidencí jednotlivých druhů rakovinných onemocnění neměly být významněji ovlivněny dávkami pocházejícími z jaderných testů.

Zaměřil jsem se tedy na ty oblasti, ze kterých jsou k dispozici data nepřetržitě od roku 1960 do roku 2002, a provedl jejich užší výběr. Při výběru jednotlivých oblastí jsem se pokusil postihnout i jejich co možná nejrozmanitější geografickou polohu.

Tabulka 1: Přehled publikací Incidence rakoviny na pěti kontinentech a data v nich obsažená (množství sledovaných souborů a časová období)

Vydání	Rok publikování	Počet registrů	Počet populací	Počet zemí	Sledované období (přibližně)
I	1966	32	35	29	1960–1962
II	1970	47	58	24	1963–1967
III	1976	61	79	29	1968–1972
IV	1982	79	103	32	1973–1977
V	1987	105	137	36	1978–1982
VI	1992	138	166	49	1983–1987
VII	1997	150	183	50	1988–1992
VIII	2002	186	214	57	1993–1997
IX	2007	225	300	60	1998–2002

Zdroj: Cancer Incidence in Five Continents, Vol. IX

Deterministické účinky nukleárních testů u obyvatelstva jsou v rámci celosvětového měřítka marginální a omezují se pouze na několik málo incidentů, proto se jejich hodnocení nebude práce věnovat. Vzhledem k rozsahu bakalářské práce jsem se rozhodl nezahrnovat do zpracování vlivů jaderného testování ani dědičné vlivy.

4 VÝSLEDKY

4.1 Přehled jaderných testů od roku 1945 do současnosti

V první kapitole byla stručně popsána historie jaderného testování jednotlivých jaderných velmocí. V této části se budeme soustředit na přehled jejich celkového počtu, druhy prováděných jaderných testů a jejich geografické rozložení.

Pozornost bude zaměřena zejména na vliv v minulosti uskutečněných atmosférických testů, jejichž míra radioaktivní kontaminace v důsledku spadu radioaktivních částic, uvolněných při explozi do otevřeného prostoru nad zemským povrchem, je z hlediska dopadu na životní prostředí daleko určující v porovnání s významem vlivu testů podzemních, kdy tyto částice zůstávají uzavřeny v horninovém masivu.

Tento předpoklad podtrhuje i fakt, že zatímco z celkového počtu 2 379 dosud celosvětově provedených jaderných testů bylo pouze 502 (21 %) atmosférických a zbývajících 1 877 (79 %) podzemních, z hlediska použité tonáže odpálených zařízení je tento poměr opačný, tj. z celkových 530 Mt činí 440 Mt (83 %) energie uvolněná při testech atmosférických a 90 Mt (17 %) při testech podzemních [14].

Skutečnost, že provádění podzemních jaderných testů, pomineme-li několik incidentů způsobených špatným utěsněním, nepřispívá zásadně k dávkám ozáření populace, vystihuje i Obrázek 3, ze kterého je zřejmé, že hodnota průměrné roční efektivní dávky z ozáření z jaderných testů strmě klesá po roce 1962, kdy došlo k ukončení atmosférických pokusných výbuchů.

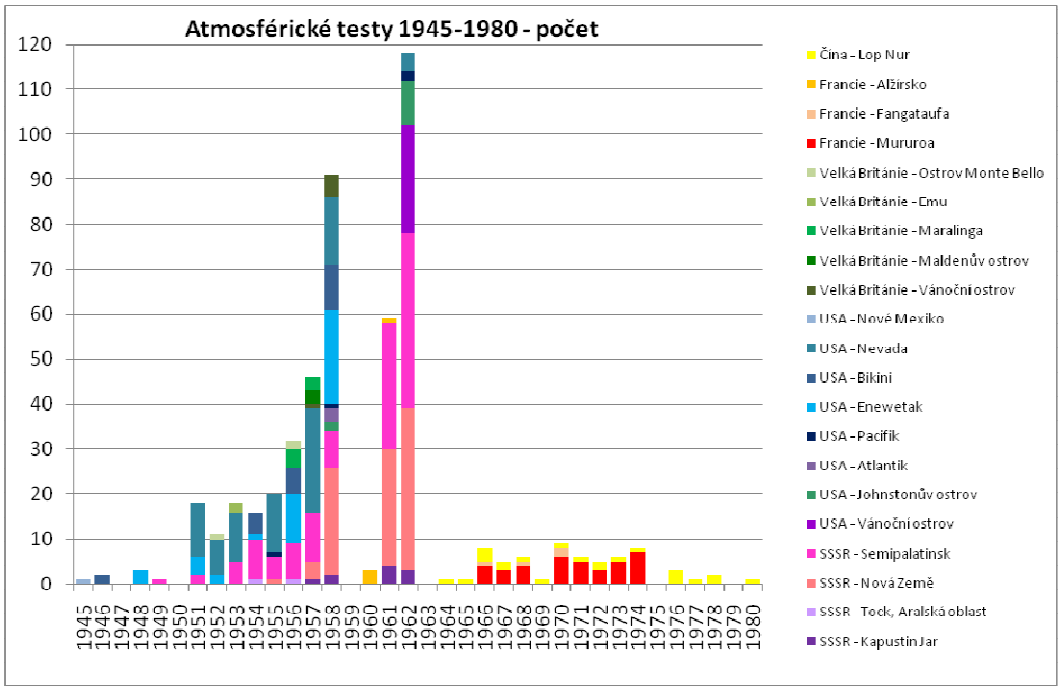
Výše zmiňovaných 502 atmosférických jaderných testů proběhlo v letech 1945-1980 na testovacích střelnicích umístěných převážně na severní polokouli. V následující Tabulce 2 je uvedena jejich přehledná sumarizace. Navazující Obrázky 1 a 2 pak představují graf zachycující rozložení atmosférických jaderných testů dle počtu a dle tonáže v jednotlivých letech uvedeného období.

Tabulka 2: Atmosférické jaderné testy prováděné v letech 1945-1980 dle jednotlivých zemí, střelnic a tonáží

Testovací střelnice	**Počet testů**	**Tonáž (Mt)**			**Radioaktivní spad ze štěpných reakcí v jednotlivých vrstvách atmosféry vyjádřený dílčí tonáží (Mt)**		
		Štěpná reakce	***Fúzní reakce***	***Celkem***	***Místní a regionální***	***Troposféra***	***Stratosféra***
Čína							
Lop Nur	22	12,2	8,5	20,72	0,15	0,66	11,4
Francie							
Alžírsko	4	0,073	0	0,073	0,036	0,035	0,001
Fangataufa	4	1,97	1,77	3,74	0,06	0,13	1,78
Mururoa	37	4,13	2,25	6,38	0,13	0,41	3,59
Celkem	45	6,17	4,02	10,19	0,23	0,58	5,37
Velká Británie							
Ostrov Monte Bello	3	0,1	0	0,1	0,05	0,049	0,0007
Emu	2	0,018	0	0,018	0,009	0,009	0
Maralinga	7	0,062	0	0,062	0,023	0,038	0
Maldenův ostrov	3	0,69	0,53	1,22	0	0,56	0,13
Vánoční ostrov	6	3,35	3,3	6,65	0	1,09	2,26
Celkem	21	4,22	3,83	8,05	0,08	1,75	2,39
USA							
Nové Mexiko	1	0,021	0	0,021	0,011	0,01	0
Nevada	86	1,05	0	1,05	0,28	0,77	0,004
Bikini	23	42,2	34,6	76,8	20,3	1,07	20,8
Enewetak	42	15,5	16,1	31,7	7,63	2,02	5,85
Pacifik	4	0,102	0	0,102	0,025	0,027	0,05
Atlantik	3	0,0045	0	0,0045	0	0	0,005
Johnstonův ostrov	12	10,5	10,3	20,8	0	0,71	9,76
Vánoční ostrov	24	12,1	11,2	23,3	0	3,62	8,45
Celkem	195	81,5	72,2	153,8	28,2	8,23	44,9
SSSR							
Semipalatinsk	116	3,74	2,85	6,59	0,097	1,23	2,41
Nová Země	91	80,8	158,5	239,6	0,036	2,93	77,8
Tock, Aralská oblast	2	0,04	0	0,04	0,00015	0,037	0,003
Kapustin Jar	10	0,68	0,3	0,98	0	0,078	0,61
Celkem	219	85,3	162	247,2	0,13	4,28	80,8
Všechny země							
Celkem	**502**	**189**	**251**	**440**	**29**	**15**	**145**

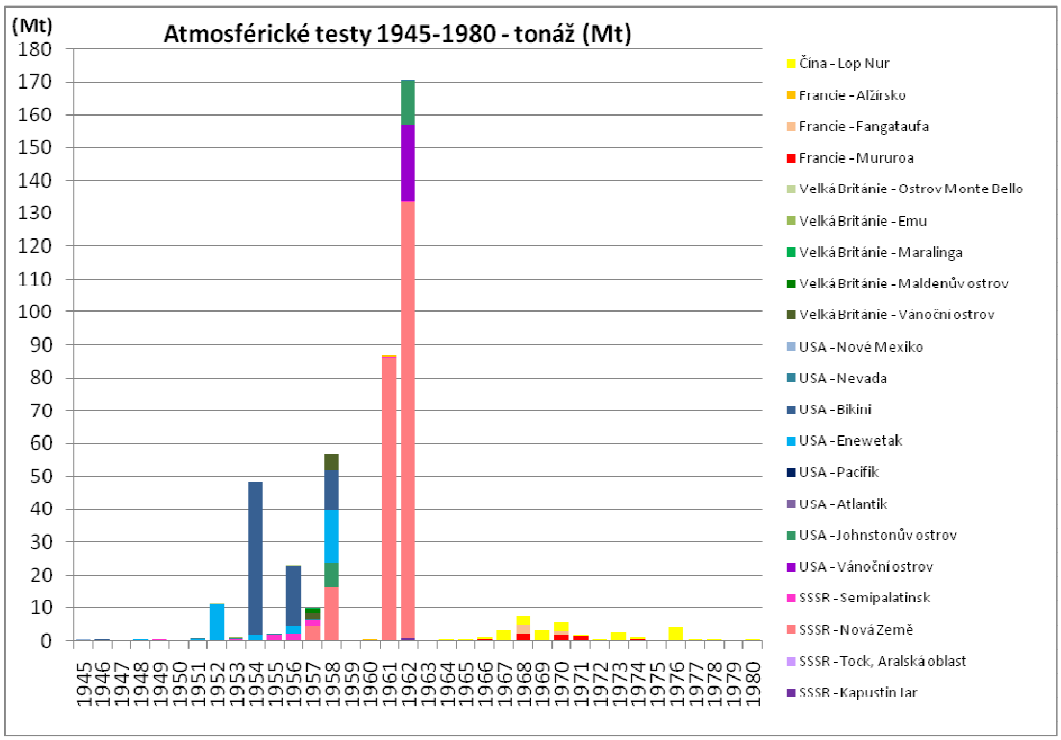
Zdroj: Sources and Effects Ionizing Radition. UNSCEAR 2008 Report, Annex B – Exposures of Public and Workers from Various Sources of Radiation. Tab. 32, s. 349

Obrázek 1: Počet atmosférických testů v letech 1945-1980



Zdroj: vlastní výpočty na základě dat UNSCEAR 2000 Report, Annex C, Tab. 1, s. 195

Obrázek 2: Tonáž (Mt) atmosférických testů v letech 1945-1980



Zdroj: vlastní výpočty na základě dat UNSCEAR 2000 Report, Annex C, Tab. 1, s. 195

Z tabulky a grafů je zřejmé, že co do počtu dosud uskutečněných atmosférických testů vede bývalý Sovětský svaz (219), těsně následován USA (195). SSSR jednoznačně převládá nad ostatními jadernými velmocemi i z hlediska velikosti použité tonáže ve všech svých provedených pokusných atmosférických výbuších dohromady (247 Mt), kdy na její celosvětové hodnotě se samotný podílí více jak polovinou.

Valná většina sovětských atmosférických jaderných testů se odehrála na základnách v Semipalatinsku (116) a v Nové Zemi (91), přičemž cvičné výbuchy proběhnuvší na testovací střelnici v Nové Zemi byly mezi ruskými zároveň zdaleka ty nejsilnější (240 Mt), a to i přesto, že toto množství zahrnuje i nálož 50 Mt jediného zařízení (bomby Car), co do ráže dosud nejrozsáhlejšího atmosférického testu vůbec.

Spojené státy americké vyvíjely největší činnost z hlediska počtu testů na své základně v Nevadě (86), ačkoliv z pohledu síly odpálených náloží byly nejvýznamnějšími střelnicemi ty mimo vlastní území USA, na atolech Bikini (77 Mt) a Enewetak (32 Mt) v Tichomoří. Se 154Mt tonáží ve všech svých provedených atmosférických jaderných testech se USA v globálním měřítku řadí na pomyslné druhé místo za SSSR.

Vrcholu dosáhla aktivita jaderných velmocí v oblasti atmosférického jaderného testování v letech 1952-1958 a 1961-1962 jak co do počtu, tak z hlediska síly cvičných explozí (viz Obrázky 1 a 2). Absolutní maximum představuje 118 testů o celkové síle 170 Mt v jediném roce 1962. Po podpisu PTBT v roce 1963 došlo k výraznému omezení, narušovanému pouze nepřistoupivší Francií a Čínou. USA, SSSR a Velká Británie přešly k výhradně podzemnímu testování.

Z celkového množství 440 Mt tonáže v atmosférických testech vůbec bylo 93 % odpáleno v období 1952-1962, 97 % představovaly pokusné výbuchy na severní polokouli, 43 % tvořila energie uvolněná ze štěpných reakcí a 57% z reakcí fúzních.

4.2 Globální a lokální radioaktivní spad

Při výbuchu jaderného zařízení v atmosféře dochází k uvolnění a globálnímu rozptýlení určitého množství daných radioaktivních částic do životního prostředí.

V závislosti na druhu testu, geografické poloze střelnice a tonáži se tyto radionuklidy dostávají do různých vrstev atmosféry, odkud se následně v podobě radioaktivního spadu postupně ukládají zpět na zemský povrch, především s dešťovými srážkami, a dlouhodobě kontaminují půdu a vodu. Některé z těchto radionuklidů, emitujících nebezpečné ionizující záření, jsou v atmosféře přítomné dodnes, přičemž jejich životnost se řídí poločasem rozpadu.

Jaderný spad představuje největší hrozbu z pokusných jaderných výbuchů. Jedná se tedy o směs štěpných produktů, které jsou nasáty pozemním výbuchem, unášeny větrem a postupně dopadají na povrch země tvoříce takzvanou radioaktivní stopu.

Čím lehčí částice, tím vyšší vrstvy atmosféry je schopna dosáhnout a tím déle v ní pobývá a do větší vzdálenosti od místa výbuchu se může rozptýlit, než se snese zpět na zem. Míra nebezpečí ozáření obyvatelstva je tedy nejvyšší u těch radionuklidů, jejichž poločas rozpadu řádově přesahuje jejich délku pobytu v atmosféře.

Lokální spad, obsahující největší částice (20 až 40 μm), může zahrnovat až 50% z celkového množství radioaktivního spadu pocházejícího z atmosférického testu a na zemi se ukládá do 24 hodin v dosahu 100 km od epicentra [14].

Menší částice (méně než 20 μm) vynesené do troposféry se vzhledem k převažujícímu západovýchodnímu vzdušnému proudění rozptylují v pásu zeměpisné šířky lokality výbuchu a z troposféry vypadávají do 30 dnů od exploze. Spad pocházející z nejlehčích částic vynesených až do stratosféry se na zemi snáší v rozmezí několika let od výbuchu prakticky kdekoli na světě, i když k tomu dochází převážně na stejné hemisféře jako místo pokusné exploze. Troposférický a stratosférický spad označujeme jako **globální spad** [14].

Pokud budeme uvažovat pouze nestabilní radionuklidy uvolněné během štěpných reakcí v atmosférických testech, vyplývá z Tabulky 2, že z celkového množství činí podíl jejich lokálního a regionálního spadu 15 %, globální troposférický spad je zastoupen 8 % a nejvyšší podíl 77 % připadá na globální spad stratosférický.

Vzhledem k tomu, že atmosférické testy byly prováděny v odlehlých neobydlených oblastech, nepřispívá expozice lokálnímu a regionálnímu spadu významně ke zvýšení světových kolektivních dávek, ač u jedinců v blízkosti testovacích

střelnic mohly individuální efektivní dávky tohoto původu dosahovat značných hodnot. Pro omezený rozsah této práce však problematice lokálního spadu nebude v této práci dále věnován zvláštní prostor.

4.3 Radionuklidy uvolněné v atmosférických jaderných testech

Radioaktivní spad obsahuje nebezpečné izotopy. Během štěpné reakce je produkováno celé spektrum různých radionuklidů, zatímco fúzní reakce vytváří v zásadě pouze tritium (^{3}H) [12].

Tabulka 3 na základě odhadů UNSCEAR vyčísluje aktivitu jednotlivých radionuklidů ze spektra uvolněného v důsledku všech v minulosti provedených atmosférických testů.

Tabulka 3: Množství radionuklidů uvolněných a globálně rozptýlených při atmosférickém jaderném testování v letech 1945-1980

Radionuklid	Poločas rozpadu	Aktivita (PBq)
^{3}H	12.33 let	186 000
^{14}C	5 730 let	213
^{54}Mn	312.3 dnů	3 980
^{55}Fe	2.73 let	1 530
^{89}Sr	50.53 dnů	117 000
^{90}Sr	28.78 let	622
^{91}Y	58.51 dnů	120 000
^{95}Zr	64.02 dnů	148 000
^{103}Ru	39.26 dnů	247 000
^{106}Ru	373.6 dnů	12 200
^{125}Sb	2.76 let	741
^{131}I	8.02 dnů	675 000
^{140}Ba	12.75 dnů	759 000
^{141}Ce	32.5 dnů	263 000
^{144}Ce	284.9 dnů	30 700
^{137}Cs	30.07 let	948
^{239}Pu	24 110 let	6,52
^{240}Pu	6 563 let	4,35
^{241}Pu	14.35 let	142

Zdroj: Sources and Effects Ionizing Radition. UNSCEAR 2008 Report, Annex B – Exposures of Public and Workers from Various Sources of Radiation. Tab. 34, s. 351

Globální spad těchto radionuklidů na zemský povrch ovšem neprobíhá rovnoměrně, ale jejich výskyt se mění se zeměpisnou šířkou.

Pro stanovení jejich rozložení na zemském povrchu se využívají dlouhodobá roční měření hustoty ukládání ^{90}Sr, resp. ^{95}Zr v jednotlivých pásech zeměpisné šířky. Radionuklid ^{90}Sr slouží jako srovnávací pro radionuklidy s dlouhou dobou poločasu rozpadu (s výjimkou ^{3}H a ^{14}C) a ^{95}Zr pro radionuklidy s krátkou dobou poločasu rozpadu při (pro usnadnění představy) znalosti poměru hustoty ukládání libovolného radionuklidu k hustotě ukládání radionuklidu srovnávacího [12].

Velmi zjednodušeně obdržíme průměrnou globální hustotu spadu váženým průměrem přes plochu a obyvatelstvo pásu zeměpisné šířky. Na tomto základě je následně odvozen i odhad efektivních dávek a dávkových úvazků z ozáření ze spadu.

Největší hustoty dosahuje globální spad v pásu 40-50° zeměpisné šířky na obou hemisférách. Vyjádřeno koeficientem určujícím poměr mezi skutečnou distribucí radionuklidů v konkrétním šířkovém pásu a průměrnou hustotou spadu vypočtenou pro danou polokouli je to 1,51 násobek pro polokouli severní a 1,65 pro jižní. Naopak minimální hodnoty nabývá tento poměr na severním a jižním pólu (potažmo pás 80-90° zeměpisné šířky), a to 0,12, resp. 0,14. Zároveň je průměrná hustota radioaktivního spadu na severní polokouli cca více jak 3x vyšší než na polokouli jižní [14].

Pro příklad uveďme, že 90 % množství radionuklidu ^{90}Sr ukládaného na zemský povrch pochází ze stratosférického spadu, zatímco u ^{95}Zr je to pouze třetina a pro ^{131}I jenom 5 %, což je dáno délkou poločasu rozpadu daných izotopů [13].

4.4 Dávky z ozáření

4.4.1 Veličiny používané v radiobiologii

Absorbovaná dávka je energie předaná ionizujícím zářením a absorbovaná v jednotkové hmotnosti ozařované látky v určitém místě. Jednotkou je gray [Gy] s rozměrem [J/kg].

Ekvivalentní dávka je suma absorbovaných dávek z jednotlivých druhů ionizujícího záření vážených jakostním faktorem, který vyjadřuje závažnost absorbované dávky dle biologické účinnosti nabitých částic tuto dávku způsobujících. Nabývá hodnoty od 1 pro řídce ionizující gama záření a elektrony až do 20 pro hustě ionizující alfa částice, tj. udává, kolikrát je daný druh záření biologicky účinnější než záření fotonové (resp. rentgenové o energii 200 keV). Jednotkou ekvivalentní dávky je sievert [Sv] s rozměrem [J/kg] (tj. stejně jako gray).

Efektivní dávka je vážený součet ekvivalentních dávek působících na jednotlivé orgány nebo tkáně násobených tkáňovým váhovým faktorem, který vyjadřuje relativní zdravotní újmu spojenou se stochastickými nebo biologickými účinky v tkáni nebo orgánu (zjednodušeně řečeno rozdílnou citlivost těchto orgánů a tkání na přijmutou dávku). Norma je taková, že součet všech váhových faktorů je 1.

Tabulka 4: Hodnoty tkáňových váhových faktorů

Tkáň, orgán	**Tkáňový váhový faktor**
Gonády (průměr muži a ženy)	0,08
Prsní žláza (průměr muži a ženy)	0,12
Červená kostní dřeň	0,12
Plíce	0,12
Štítná žláza	0,04
Povrch kostí	0,01
Tlusté střevo	0,12
Žaludek	0,12
Játra	0,04
Kůže	0,01
Močový měchýř	0,04
Jícen	0,04
Slinná žláza	0,01
Mozek	0,01
Ostatní tkáně (součet)	0,12

Zdroj: ICRP 103

Efektivní dávka tedy představuje součet dílčích různě závažných příspěvků dané tkáně nebo orgánu k následkům pro celý organismus při rovnoměrném ozáření, hodnotí míru zdravotního rizika plynoucího z expozice ionizujícímu záření. Pomocí efektivní

dávky lze naopak i srovnávat radiační zátěž osob vyvolanou nerovnoměrným ozářením z nejrůznějších zdrojů na jednotné bázi přepočtu účinku na celé tělo.

I přes vyjmenované výhody zavedení veličiny efektivní dávky je třeba mít na paměti, že se nejedná o veličinu přímo měřitelnou a že její koncept je založen pouze na zjednodušeném zprůměrovaném kvalifikovaném odhadu. Jednotkou efektivní dávky je sievert [Sv] s rozměrem [J/kg] (tj. stejně jako gray).

Pro příklad uveďme, že k převodu absorbované dávky ze vzduchu na dávku efektivní pro dospělé osoby se používá vztah 0,7 Sv/Gy.

Úvazek dávky je definován jako časový integrál (plocha pod křivkou) příkonu dávkového ekvivalentu (tj. podíl přírůstku ekvivalentní dávky v časovém intervalu a tohoto časového intervalu) spojeného s příjmem radionuklidu za dané časové období od příjmu, typicky za 50 let.

Tato veličina se nejčastěji využívá k hodnocení dlouhodobých následků časově vymezené radiační události, která ovšem může dát vzniknout expozicím za velmi dlouhou dobu od svého konání. Úvazek dávky tedy zjednodušeně řečeno vyjadřuje vystavení hypotetického jedince celkové dávce z dané události od jejího vzniku do současnosti, resp. do jakéhokoli okamžiku v budoucnosti. Jednotkou je sievert [Sv].

Kolektivní dávka je součet efektivních dávek u jednotlivých (zprůměrovaných, hypotetických) jedinců ve vymezené skupině za dané časové rozmezí násobený počtem osob této populace. Nejčastěji se vyjadřuje ve vztahu k dávkám z konkrétního zdroje záření nebo z provozní činnosti. Např. u atmosférických jaderných testů tedy vyjadřuje celkovou újmu způsobenou populaci všemi (i budoucími) dávkami z tohoto zdroje. Jednotkou je man sievert [man Sv] [2, 11].

4.4.2 Dávky ozáření z atmosférických jaderných testů

Z hlediska dávek pro obyvatelstvo je rozhodující složkou radioaktivního spadu směs především beta a gama zářičů. Při povrchovém kontaktu je nejdůležitější příspěvek záření beta. Dávka beta záření v bazálních vrstvách kůže je 5-10x vyšší než dávka současného gama záření z radioaktivního spadu. Při kontaktu s vodou může dojít

k vyluhování radionuklidů. Tyto vylouhované radionuklidy jsou adsorbovány do půdy, kde postupně dochází k jejich rozpadovým přeměnám. Z půdy se tyto radionuklidy dostávají kořenovým systémem do rostliny a tím se stávají součástí potravního řetězce.

Mechanismus vzniku dávky z ozáření je následující: radionuklidy uvolněné v průběhu atmosférického výbuchu se dostávají do atmosféry, odkud se v podobě globálního spadu ukládají na zemský povrch. K celkové dávce organismu přispívá na jedné straně vnější ozáření z atmosféry a vnější ozáření ze zemského povrchu, na straně druhé zprostředkovaný proces vnitřního ozáření, kdy se radionuklidy ukládají do tkání jednak inhalací z atmosféry a jednak požitím stravy kontaminované na zemském povrchu, a inkorporované v těchto tkáních dále působí ionizujícím zářením na své okolí a vytváří tak vnitřní příspěvek k celkové dávce ozáření [12].

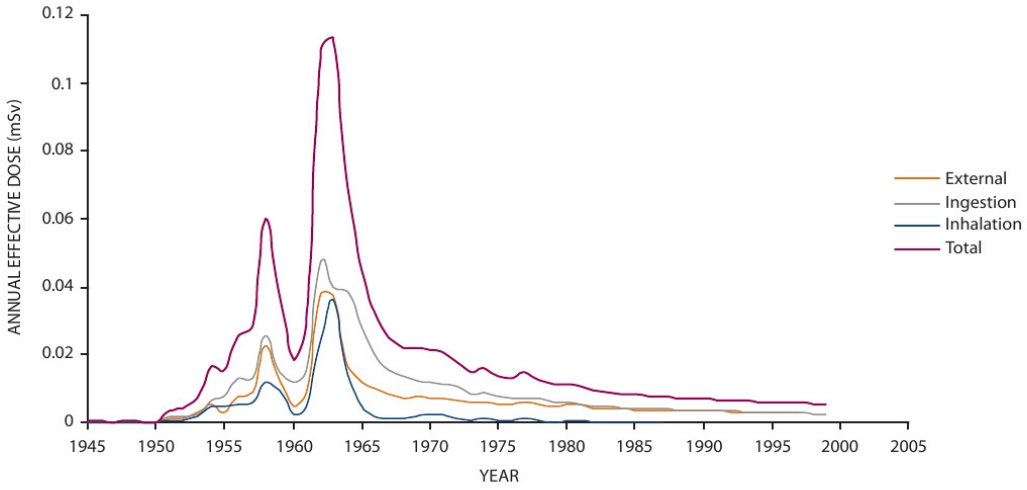
Obrázek 3 znázorňuje odhad vývoje globální roční průměrné efektivní dávky na hlavu způsobené radioaktivním spadem v závislosti na čase od 1945, roku zahájení jaderného testování. Hodnoty jsou stanoveny pro průměrnou hustotu ukládání radionuklidů váženou světovým obyvatelstvem. Přepočet pro specifickou oblast probíhá pomocí měření hustoty uložení ^{90}Sr v jednotlivých zeměpisných šířkách.

Z grafu je zřejmé, že tato průměrná roční dávka ozáření byla nejvyšší v roce 1963 (0,11 mSv průměrně pro svět, 0,13 mSv na severní polokouli a 0,06 mSv na jižní), což koresponduje s obdobím největší aktivity v oblasti jaderného testování [13]. Po zákazu provádění atmosférických testů následuje strmý pokles a křivka konverguje k hodnotě menší než 0.005mSv po roce 2000.

Průměrné roční efektivní dávky v současnosti jsou na severní polokouli asi o 10 % vyšší než na jižní hemisféře.

Díky radionuklidu ^{14}C s dlouhým poločasem rozpadu bude radioaktivita ze spadu vypuštěného během atmosférických jaderných testů ovlivňovat dávky z ozáření na světové obyvatelstvo dalších 10 000 let, i když hodnota ročních efektivních dávek nebude příliš vysoká.

Obrázek 3: Celosvětový průměr roční efektivní dávky ozáření na 1 obyvatele v důsledku jaderného testování v jednotlivých letech



Zdroj: Sources and Effects Ionizing Radition. UNSCEAR 2008 Report, Annex B – Exposures of Public and Workers from Various Sources of Radiation. Fig. XXVII, s. 397

Časový integrál křivky na Obrázku 3 (tj. plocha pod křivkou) představuje dávkový úvazek z ozáření z atmosférických pokusných výbuchů. Jeho hodnota 0,994 mSv do roku 2000, resp. 0,253 mSv v období 2000-2100 a 2,243 mSv po roce 2100 (až do vyčerpání radioaktivity všech radionuklidů uvolněných v atmosférických testech) je, spolu s příspěvky jednotlivých radionuklidů k celkovému dávkovému úvazku a způsobem, jakým k ozáření dochází, vyjádřena v Tabulce 5.

Celkový dávkový úvazek, obdržený za celé období působení záření z atmosférických pokusných výbuchů od počátku jaderného testování po příštích 10 tisíciletí, tedy činí 3,5 mSv, což je hodnota stejného řádu jako efektivní dávka z přírodních zdrojů za jediný rok.

Tabulka 5: Odhad dávkových úvazků (μSv) obdržených celosvětovou populací z globálního spadu radionuklidů

Radionuklid	Dávka obdržená před r. 2000				Dávka obdržená v období 2000-2100	Dávka obdržená po r. 2100
	Externím ozářením	Inhalací	Ingescí	Všemi způsoby	Všemi způsoby	Všemi způsoby
^{3}H	--	--	24	24	0,1	--
^{14}C	--	--	144	144	120	2230
^{54}Mn	19	0,1	--	19	--	--
^{55}Fe	--	0,01	6,6	6,6	--	--
^{89}Sr	--	2,6	1,9	4,5	--	--
^{90}Sr	--	9,2	97	106	8,6	0,02
^{91}Y	--	4,1	--	4,1	--	--
^{95}Zr	81	2,9	--	84	--	--
^{103}Ru	12	0,9	--	13	--	--
^{106}Ru	25	35	--	60	--	--
^{125}Sb	12	0,1	--	12	0,003	--
^{131}I	1,6	2,6	64	68	--	--
^{140}Ba	27	0,4	0,5	28	--	--
^{141}Ce	1,1	0,8	--	1,9	--	--
^{144}Ce	7,9	52	--	60	--	--
^{137}Cs	166	0,3	154	320	124*	13
^{239}Pu	--	20	--	20	--	--
^{240}Pu	--	13	--	13	--	--
^{241}Pu	--	5	--	5	--	--
Celkem	353	149	492	994	253	2243

* 114 μSv externím ozářením a 10 μSv interním ozářením

Zdroj: Sources and Effects Ionizing Radition. UNSCEAR 2008 Report, Annex B – Exposures of Public and Workers from Various Sources of Radiation. Tab. 36, s. 352

Při bližším zkoumání, založeném na Tabulce 5, získáme představu o dávkových úvazcích obdržených ze záření způsobeného jednotlivými radionuklidy, produkovanými při jaderném výbuchu v podobě radioaktivního spadu. Tato skutečnost má význam, uvážíme-li afinitu konkrétního radionuklidu k určitému typu tělesné tkáně, a tedy jeho tendenci a možnost způsobovat určitý druh rakovinného bujení (např. ^{131}I s afinitou k štítné žláze).

K průměrným ročním efektivním dávkám na Obrázku 3 přispívala obecně nejvíce externí iradiace, zpočátku díky radionuklidům s krátkým poločasem rozpadu, později přebral dominantní úlohu radionuklid ^{137}Cs. V dnešních dnech přispívají externí

ozáření (53 %) a ingesce (47 %) k ročním dávkám takřka stejným podílem. Dále v současnosti představuje 30 % celkové průměrné roční efektivní dávky záření z radionuklidu ^{14}C, čímž se stává nejvýznamnějším zdrojem ročních dávek ozáření z ingesce. Maximální roční efektivní dávka vyvolaná zářením ^{14}C byla 0,0077 mSv v roce 1964, od té doby klesá [13].

Dávkový úvazek z atmosférických testů obecně pochází nejvíce z externího ozáření (0,353 mSv do roku 2000, 36 %) a z interního ozáření ingescí spadových radionuklidů (0,492 mSv do roku 2000, 49 %). Na celkovém dávkovém úvazku (do vyčerpání veškeré radioaktivity) se pak největší měrou podílí radionuklidy ^{14}C, ^{137}Cs a ^{90}Sr. Cesta, kterou působí ozáření, je u ^{14}C výlučně a u ^{90}Sr především ingescí, u ^{137}Cs externí iradiací a ingescí. Díky ^{14}C se v příštích 10 000 letech stane způsob ozáření prostřednictvím ingesce jediným zdrojem pokračující expozice z jaderných testů.

Během období aktivního testování nejvíce přispívaly k externímu ozáření radionuklidy s krátkou dobou poločasu rozpadu, nejvýznamněji ^{95}Zr (spolu s ^{95}Nb jako produktem jeho rozpadové řady). Od roku 1966 se stal největším přispěvatelem k externímu ozáření ^{137}Cs, který je v současnosti již jediným zdrojem pokračujícího externího ozáření z radioaktivního spadu z atmosférických testů [14].

K expozici ingescí přispívá více radionuklidů, z nichž v průběhu aktivního testování byl nejvýznamnější ^{137}Cs a od roku 1967 se stal dominantním ^{90}Sr [14].

K ozáření z inhalace přispíval v minulosti nejvíce radionuklid ^{144}Ce, avšak koncentrace radionuklidů z atmosférických testů ve vzduchu působících cestou inhalace poklesla rapidně po roce 1980, kdy byly atmosférické testy ukončeny [14].

Radionuklid ^{14}C s velmi dlouhou dobou poločasu rozpadu vyzářil do roku 2000 prozatím jen 6 % svého vlastního celkového dávkového úvazku, který činí 2,5 mSv. Do roku 2100 to bude 10 %. Podíl celkového úvazku ^{14}C (do vypršení veškeré jeho reziduální kontaminace) k celkovému úvazku 3,5 mSv všech radionuklidů uvolněných v atmosférických testech představuje 70 %. K celkovému úvazku do roku 2100, kdy bude vyčerpána radioaktivita všech ostatních radionuklidů, přispěje 20 % [14].

Celková kolektivní efektivní dávka zaviněná ozářením původem z jaderného testování až do okamžiku vyčerpání radioaktivity všech radionuklidů v testech

vyprodukovaných je $3x10^7$ man Sv. Z tohoto množství bude celosvětovou populací obdrženo $7x10^6$ man Sv do roku 2200 (tj. asi jedna čtvrtina), zbytek, díky radionuklidu ^{14}C s dlouhým poločasem rozpadu, bude vyzářen po uplynutí cca 10 000 let[1].

V zmiňovaném globálním odhadu kolektivní efektivní dávky je pochopitelně zahrnut i příspěvek dávky, jíž byli vystaveni obyvatelé žijící v blízkosti testovacích základen. Příspěvek této lokální a regionální kolektivní dávky k celosvětové kolektivní dávce je však vzhledem k nízkému počtu takto zasažených jedinců velmi malý, čítaje 700 man Sv [12].

4.4.3 Srovnání dávek z atmosférických jaderných testů s ostatními zdroji záření

Lidský organismus je během svého života vystaven nebezpečnému ionizujícímu záření z různých zdrojů. Jsou jimi jednak přírodní radioaktivní pozadí (kosmické záření a radionuklidy přítomné v zemské kůře, ve vzduchu i v lidském těle) a na druhé straně ozáření, jehož vznik vyplývá z různých oborů lidské činnosti. Mezi zdroje vyvolané lidskou činností řadíme diagnostické a terapeutické zákroky v lékařství, přepravu radioaktivního materiálu, výrobu jaderné energie, radioaktivní záření pocházející z jaderných havárií a nehod a radiaci působící na specifickou skupinu obyvatelstva při výkonu určitých povolání. Do této skupiny je zahrnuta rovněž výroba a testování nukleárních zbraní, jež jsou předmětem této práce.

Pro zasazení do celkového rámce srovnejme nyní stručně příspěvek provedených pokusných atmosférických výbuchů k celkové dávce ozáření obyvatelstva s příspěvky ostatních vyjmenovaných zdrojů (viz Tabulka 6).

[1] Za předpokladu nárůstu světové populace z 3,2 mld. v době aktivně probíhajících jaderných testů na konstantních 10 mld. obyvatel po většinu času zbývajícího období.

Tabulka 6: Roční průměrné efektivní dávky z jednotlivých zdrojů ionizujícího záření

Zdroj záření	**Roční průměrná efektivní dávka (mSv)**	**Podíl (%)**	**Rozmezí individuálních dávek (mSv)**
Přírodní zdroje záření			
Inhalace (radonový plyn a jeho rozpadové produkty)	1,26	42	0,2-10
Externí terestriální	0,48	16	0,3-1
Vnitřní ozáření přírodními radionuklidy v těle (ingesce)	0,29	10	0,2-1
Kosmické záření	0,39	13	0,3-1
Celkem přírodní zdroje	**2,4**	**80**	**1-13**
Umělé zdroje záření			
Medicínská diagnostika	0,6	20	0 až několik desítek
Atmosférické jaderné testy	0,005	0,16	maximum 0,11 mSv v roce 1963
Profesní ozáření	0,005	0,16	0-20
Nehoda v Černobylu	0,002	0,07	maximum na severní polokouli 0,04 mSv v roce 1986
Výroba jaderné energie	0,0002	0,01	0,02 mSv pro obyvatele do 1 km od jaderného reaktoru
Celkem umělé zdroje	**0,6**	**20**	**závisí na vyspělosti lékařské péče, vykonávané profesi a vzdálenosti od místa nehod a pokusných výbuchů**

Zdroj: Sources and Effects Ionizing Radition. UNSCEAR 2008 Report, Tab. 1, s. 4

Jak je z Tabulky 6 patrné, tvoří přírodní zdroje ionizujícího záření (a zejména radon) 80 % příspěvku k roční efektivní dávce, které je jedinec vystaven. Pouze pětina tak připadá na zdroje ionizujícího záření vyvolané lidskou činností, z nichž největšího přispěvatele k roční efektivní dávce představuje záření užívané pro účely lékařské diagnostiky a terapie. Tento zdroj nabyl svého významu postupně se zaváděním moderních technologií (CT) a postupů léčby a vyšetření, ačkoli dodnes se jeho vliv značně odlišuje mezi jednotlivými zeměmi v závislosti na vyspělosti a úrovni poskytované medicínské péče.

Ani maximální hodnota 0,11 mSv průměrné roční efektivní dávky z atmosférických testů v roce 1963 by v současnosti nedosahovala největšího podílu mezi umělými zdroji záření.

Nebezpečí, které však v minulosti prováděné jaderné testování skýtá, spočívá v tom, že při něm, bylo uvolněno velké množství radioaktivních izotopů přímo do životního prostředí, což vyvolává významný nárůst kolektivních dávek ozáření, na rozdíl od např. medicínských a profesionálních expozic.

4.5 Pravděpodobnost a závislost účinků záření na lidský organismus na dávkách

Biologický účinek záření na lidský organismus je v prvé řadě závislý na velikosti absorbované dávky, tj. s dávkou roste. Jak již bylo stručně řečeno v první kapitole, stochastické účinky jsou zcela náhodné, individuální a nepředvídatelné a mají pravděpodobnostní charakter. Závažnost postižení a průběh vzniklého onemocnění nejsou závislé na výši dávky, na absorbované dávce záleží pouze pravděpodobnost výskytu nádorového nebo genetického poškození a tato pravděpodobnost roste s dávkou [11].

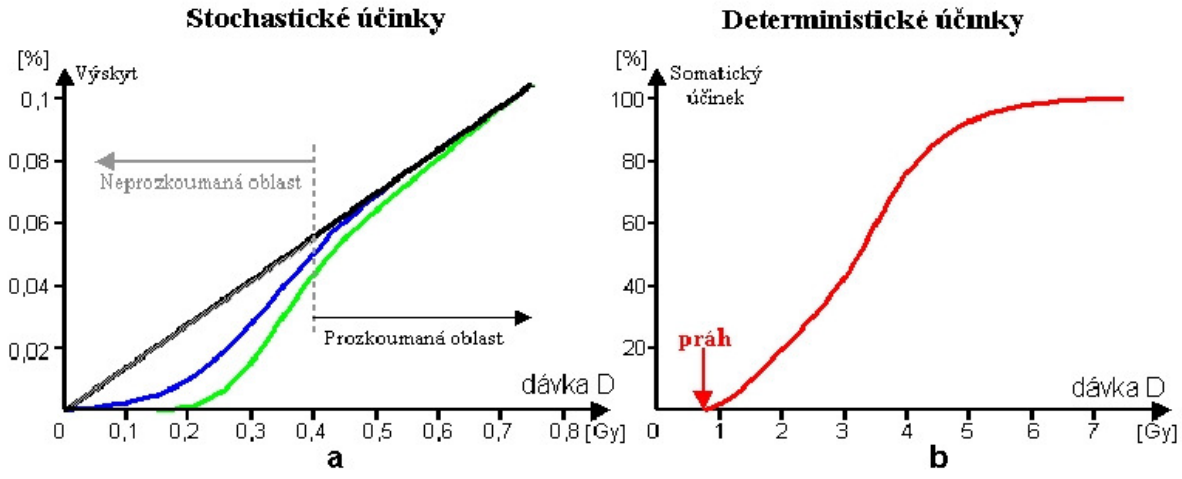
Jedná se přitom o chorobné stavy, které se i bez vlivu záření samovolně (bez zjevné příčiny) vyskytují v populaci. U konkrétního pacienta nelze odlišit radiačně indukované nádory a genetické změny od spontánně se objevivšího onemocnění, jejich klinický obraz je stejný (tj. neexistují žádné příznaky specifické pro nádory vyvolané v důsledku ionizujícího záření). Riziko vzniku rakovinového bujení vyvolaného ozářením je pouze přídavné k ostatním rizikům [11].

Stochastické účinky vykazují závislost na věku, ve kterém dojde u jedince k ozáření, přičemž při stejné dávce záření je jejich pravděpodobnost v obráceném poměru k věku ozářeného jedince.

Je to způsobeno na jedné straně faktem, že stochastické radiační účinky mají dlouhou dobu latence, pravděpodobnost jejich manifestace roste s časem od ozáření. Jednoduše řečeno, při ozáření organismu v mladším věku je pravděpodobně k dispozici více času na projev pozdních stochastických účinků. Při ozáření ve starším věku se stochastické účinky často již do konce života nestihnou uplatnit. Na straně druhé probíhá u dětí v důsledku růstu intenzivnější dělení buněk, což vede k vyšší radiosenzitivitě [11].

U stochastických účinků má pravděpodobnostní rozložení výskytu maligních transformací na efektivní dávce lineárně-kvadratický charakter. To znamená, že při nízkých dávkách (cca do 1 Sv) má křivka lineární tvar přímé úměry četností poškození (nádorových nebo genetických) na dávce (viz Obrázek 4, černá křivka) a při vyšších dávkách roste výskyt radiačně indukovaných malignit s druhou mocninou efektivní dávky. Kvadratickou závislost stochastických účinků v oblasti vyšších dávek lze ovšem jen obtížně prokázat vzhledem k tomu, že při vysokých dávkách převládnou účinky deterministické a téměř všechny buňky rychle hynou. Stochastické účinky jsou zároveň, na rozdíl od deterministických účinků, bezprahové [11].

Obrázek 4: Závislost biologického účinku na velikosti absorbované dávky záření
a) pravděpodobnost výskytu pro stochastické účinky
b) závažnost poškození pro deterministické účinky



Zdroj: ULLMANN, V. 5. Biologické účinky ionizujícího záření
http://astronuklfyzika.sweb.cz/RadiacniOchrana.htm

Novější radiobiologické studie ovšem zpochybňují linearitu průběhu závislosti výskytu stochastických účinků na dávce v oblasti nízkých dávek a implikují odlišný, nelineární (Obrázek 4, modrá křivka), nebo dokonce alternativní, nelineární prahový (Obrázek 4, zelená křivka) model [11].

Je třeba přiznat, že v oblasti nízkých dávek ozáření dosud chybí spolehlivé údaje. V intervalu nad cca 400 mGy je vztah mezi dávkou a účinkem prokázaný a statisticky významný. Směrem k nižším dávkám se však výsledky vlivem statistických fluktuací a nejistot rozmazávají, biologický účinek není statisticky prokazatelný, řádově roste potřeba velikosti statistického souboru jedinců a zvyšuje se vliv rušivého účinku existence přírodního radiačního pozadí, znesnadňujícího analýzu.

I přes výše zmiňované nedostatky budeme však pro účely této práce uvažovat jednoduchý „konzervativní model" závislosti lineární bezprahové (*linear-non-threshold model, LNT*), i když zřejmě nadhodnocuje rizika v oblasti malých dávek.

Při vysokých dávkách záření na organismus se projevují účinky deterministické, kdy počet poškozených molekul biologicky aktivních látek je již natolik významný, že je buňky ani organismus nejsou schopny opravit a buňky zanikají. Poškození tkáně je přímo úměrné dávce ozáření, není již náhodné, ale naopak předvídatelné. Deterministické účinky se klinicky projevují až po dosažení určité prahové dávky, jejíž hodnota cca 1 Gy na Obrázku 4 je pouze průměrná (celotělová), přičemž každá tkáň vykazuje jinou hodnotu prahové dávky, závislou na radiosenzitivitě buněk a funkční rezervě v tkáni [11].

Tato práce se vzhledem k omezenému rozsahu soustředí pouze na hodnocení pozdně stochastických účinků z atmosférických testů na zdraví obyvatelstva, jelikož deterministické účinky a jejich projevy v souvislosti s prováděním jaderných testů nabývaly v minulosti pouze charakteru prostorově a časově ohraničených událostí u vybraných souborů jedinců bez přesahu vlivu a konsekvencí na globální populaci. Charakteristika deterministických účinků je zde uvedena pro úplnost.

Mezi pozdní stochastické účinky radiačního záření řadíme indukované zhoubné nádory, vznikající jako následek mutací ústících ve ztrátu kontroly nad dělením buněk a v maligní transformaci postižených buněk, a genetické změny, projevující se postižením potomstva ozářených osob na základě mutací zárodečných buněk rodičů. V souladu s metodikou uvedenou v druhé kapitole se, opět vzhledem k limitovanému rozsahu práce, zaměříme pouze na hodnocení možnosti a pravděpodobnosti rozvoje rakovinových onemocnění v globální populaci, zapříčiněných v minulosti

uskutečňovanými atmosférickými výbuchy. Genetické změny budou ponechány stranou.

Na základě Life Span Study, využívající údaje z přeživších obětí atomových útoků v Nagasaki a Hirošimě, je pravděpodobnost vzniku rakoviny v průběhu života vyvolané expozicí vysokými dávkami $11x10^{-2}$ Sv^{-1}. Na základě tohoto zjištěného čísla proběhla snaha o odvození odpovídající pravděpodobnosti radiací vyvolané rakoviny, ovšem při vystavení nízkým dávkám ozáření. Byl ustaven redukční koeficient 2. Koeficient byl odhadnut i přes určitou míru nejistoty, jasné ovšem je, že nabývá pouze malé hodnoty.

Výsledná hodnota průměrného koeficientu rizika vzniku radiačně indukovaného maligního onemocnění při nízkých dávkách ozáření tedy vychází cca $5,5x10^{-2}$ Sv^{-1}, tj. pokud 100 osob obdrží dávku 1 Sv, lze očekávat, že to u 5 z nich vyvolá fatální zhoubný nádor. Tuto hodnotu uznává ICRP (*International Commission on Radiological Protection*) i UNSCEAR (*United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation*) a je celosvětově používána.

5 DISKUZE

Z Obrázku 3 a Tabulky 5 uvažujme úvazek efektivní dávky v letech 1960-2000 o velikosti 1 mSv. Při lineární závislosti stochastických účinků na dávce a za předpokladu, že jeden Sv působí incidenci 5,5 %, mělo by se podle výpočtu 0,001 Sv * 0,055 za uvedené období objevit v populaci aditivních 5,5 rakovinných onemocnění na 100 000 obyvatel, způsobených atmosférickým jaderným testováním.

Pokud vezmeme za průměrný počet obyvatel na Zemi mezi lety 1960 a 2000 hodnotu 4,9 mld. v polovině období, vychází celkem navýšení incidence všech rakovinných onemocnění v období od roku 1960 do roku 2000 teoreticky na 269 500 případů způsobených radiací pocházející z ionizujícího záření majícího původ v atmosférickém jaderném testování.

Pokud vezmeme v úvahu jednotlivé tkáňové váhové faktory vyjadřující poměr, v jakém se daná tkáň podílí na celkovém stochastickém riziku při celotělovém ozáření, je dále možné stanovit teoretickou statistickou incidenci pro jednotlivé druhy nádorových onemocnění vyvolaných pokusnými jadernými výbuchy.

Podle nejnovějších hodnot tkáňových faktorů, vydaných ve zprávě ICRP 103, lze tedy statisticky určit, kolik z oněch modelových 269 500 případů připadne na určitý druh rakoviny (viz Tabulka 7). Pro zjednodušení předpokládejme zastoupení stejné zastoupení obou pohlaví ve sledovaných populacích.

Následují grafy zachycující skutečnou incidenci rakovinných onemocnění v letech 1960-2002 v sedmi vybraných světových destinacích pro šest vybraných druhů rakoviny (viz Kapitola 3), doplněné o komentář. Předpokládáme, že dávky přicházející z přírodních zdrojů zůstávají v průběhu času konstantní, ačkoliv se jejich velikost (tj. míra incidence na počátku sledovaného období) v jednotlivých oblastech z důvodu rozdílných lokálních podmínek vzájemně liší.

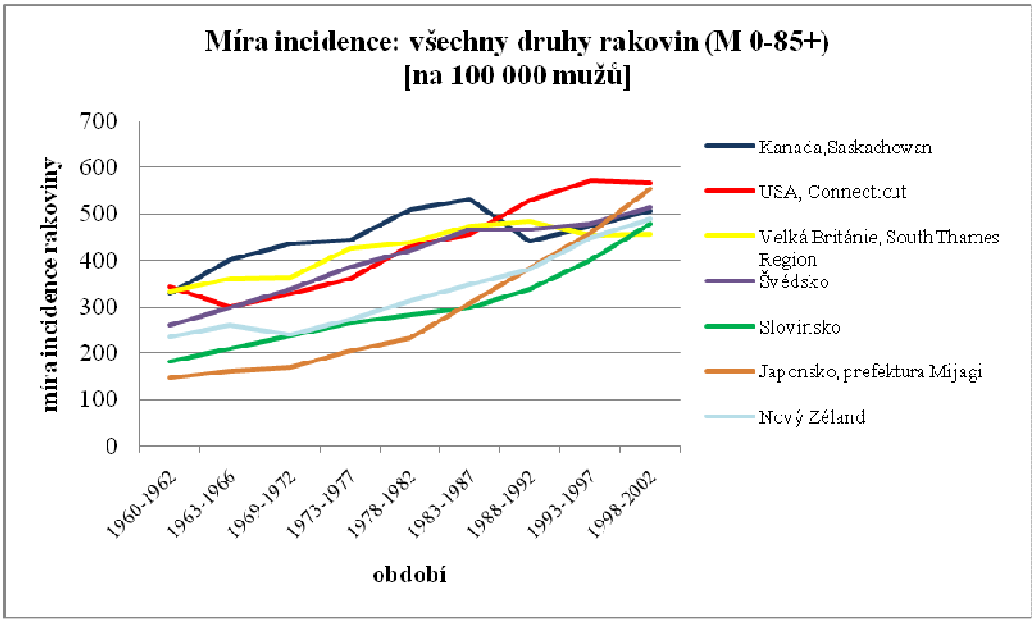
Tabulka 7: Předpokládaná celosvětová incidence konkrétních nádorových onemocnění v letech 1960 až 2000 způsobených atmosférickým jaderným testováním

Tkáň, orgán	**Tkáňový váhový faktor**	**Teoretická incidence**
Gonády (průměr muži a ženy)	0,08	21 560
Prsní žláza (průměr muži a ženy)	0,12	32 340
Červená kostní dřeň	0,12	32 340
Plíce	0,12	32 340
Štítná žláza	0,04	10 780
Povrch kostí	0,01	2 695
Tlusté střevo	0,12	32 340
Žaludek	0,12	32 340
Játra	0,04	10 780
Kůže	0,01	2 695
Močový měchýř	0,04	10 780
Jícen	0,04	10 780
Slinná žláza	0,01	2 695
Mozek	0,01	2 695
Ostatní tkáně* (součet)	0,12	32 340
Suma	**1**	**269 500**

**ostatní tkáně: nadledvinky, horní cesty dýchací, žlučník, srdce, ledviny, lymfatické uzliny, svalstvo, sliznice dutiny ústní, slinivka, prostata, tenké střevo, slezina, brzlík, děloha/hrdlo*

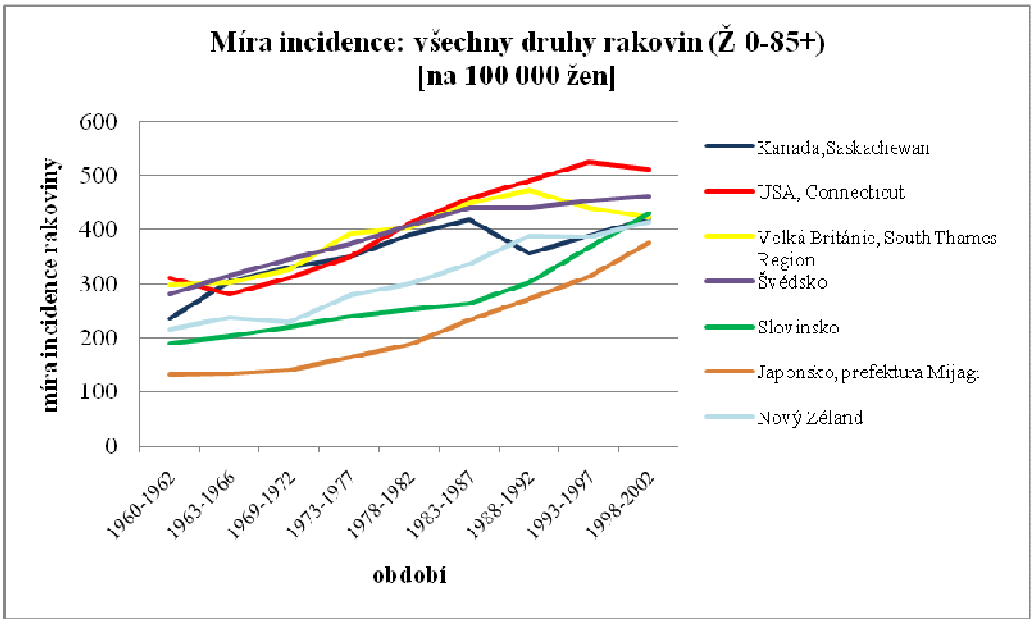
Zdroj: Vlastní výpočet na základě ICRP 103

Obrázek 5: Incidence všech druhů rakovin ve vybraných lokalitách 1960-2002, muži



Zdroj: vlastní výpočty na základě Cancer Incidence in Five Continents, Vol. I-IX

Obrázek 6: Incidence všech druhů rakovin ve vybraných lokalitách 1960-2002, ženy



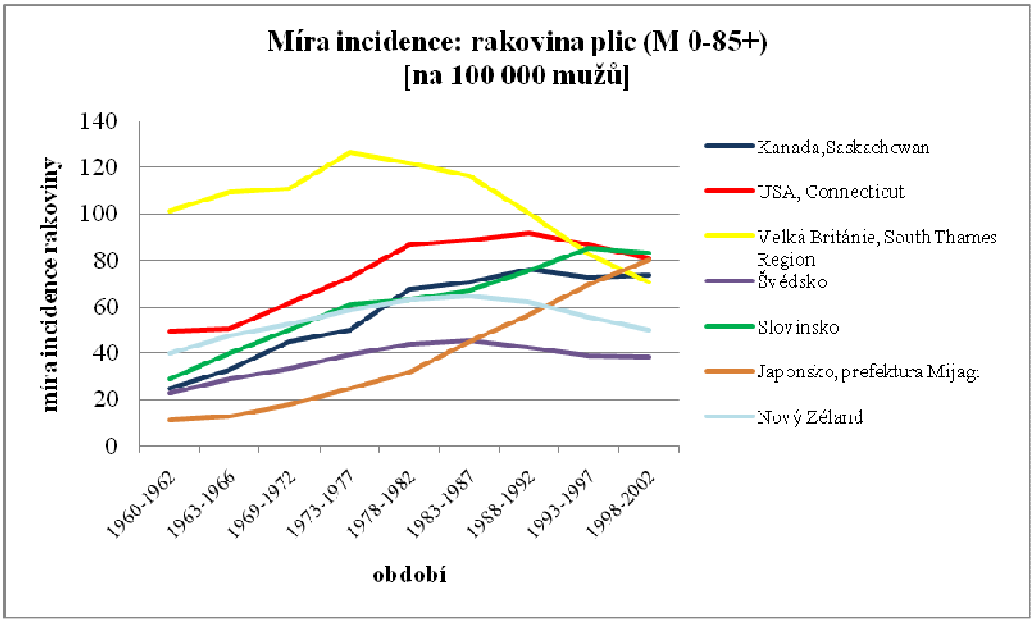
Zdroj: vlastní výpočty na základě Cancer Incidence in Five Continents, Vol. I-IX

Jak je z grafů patrné, incidence všech druhů rakoviny s časem až na výjimky stoupá. Tento nárůst je přičítán narůstajícímu (nejen radiologickému) znečištění životního prostředí, prodlužující se délce života a změně životního stylu. Incidence je také typicky větší u mužské populace než u populace ženské.

Pokud bychom uvažovali rovnoměrný příspěvek nádorových onemocnění způsobených jaderným testováním během 40 let, dostáváme se na hodnotu 0,138 incidencí na 100 000 obyvatel a rok (5,5 incidencí za 40 let na 100 000 obyvatel), což činí u nejnižších hodnot incidencí, které jsou v letech 1960-1962 k dispozici u japonských žen (132,3 incidencí na 100 000 žen), příspěvek 0,52 promile.

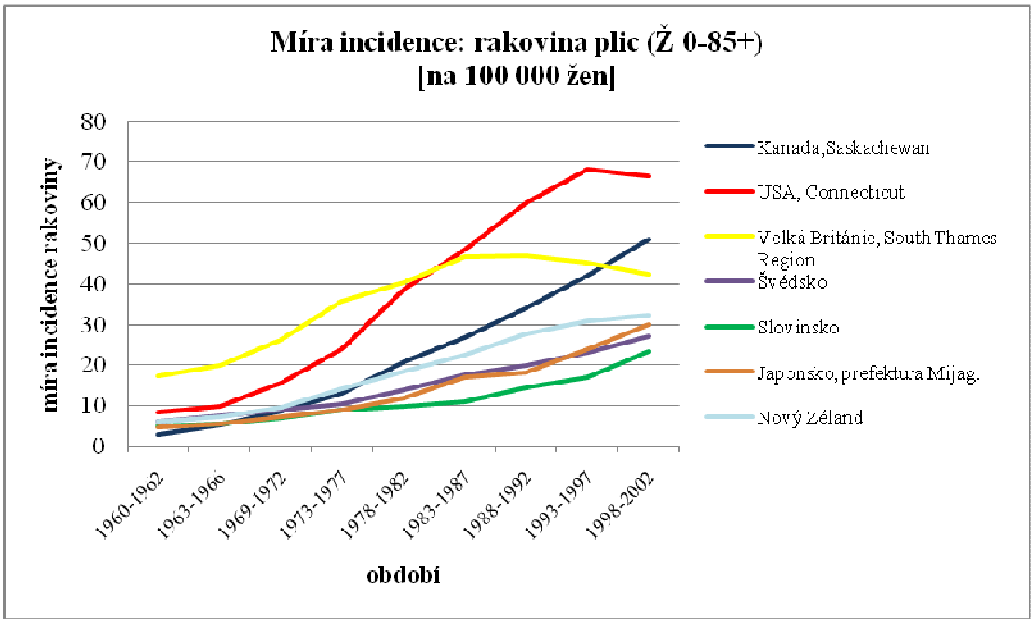
Pokud tento příspěvek porovnáme s nejvyšší hodnotou incidence u mužů v Connecticutu (570,2 incidencí na 100 000 mužů), vychází příspěvek nádorových onemocnění v této oblasti způsobených jadernými testy na 0,12 promile.

Obrázek 7: Incidence rakoviny plic ve vybraných lokalitách 1960-2002, muži



Zdroj: vlastní výpočty na základě Cancer Incidence in Five Continents, Vol. I-IX

Obrázek 8: Incidence rakoviny plic ve vybraných lokalitách 1960-2002, ženy



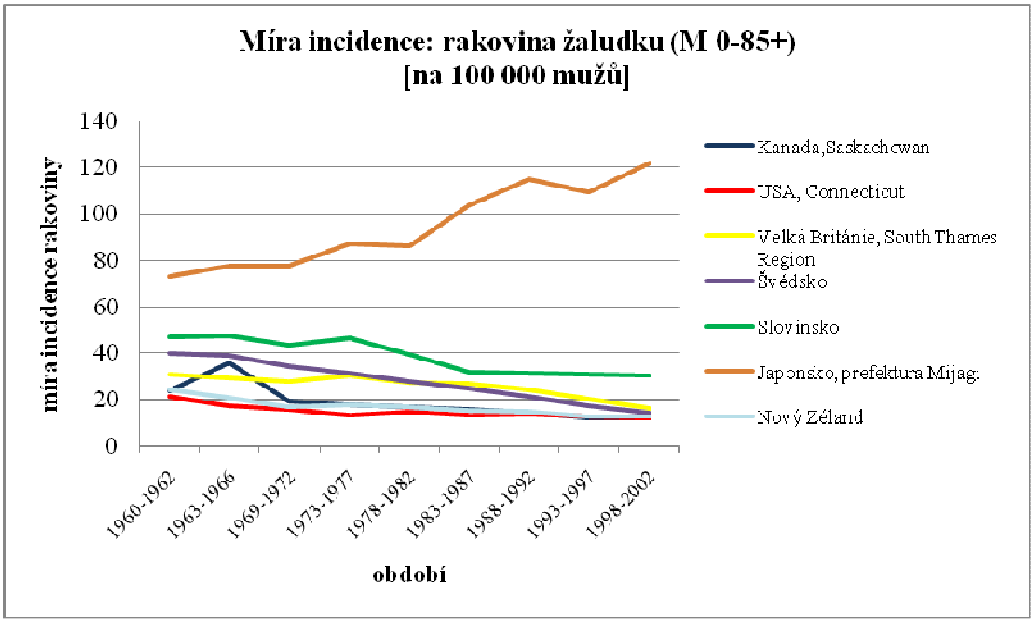
Zdroj: vlastní výpočty na základě Cancer Incidence in Five Continents, Vol. I-IX

Z grafů incidencí rakoviny plic je patrné, že hodnoty incidencí jsou větší u mužů (v britském regionu South Thames dokonce excesivně), ale kromě Japonska získává trend ustálený charakter, zatímco incidence rakoviny plic u žen je na vzestupu ve všech sledovaných regionech, kromě britského regionu South Thames.

Pokud budeme uvažovat rovnoměrný příspěvek rakovinných onemocnění plic způsobených jaderným testováním během 40 let, dostáváme se na hodnotu 0,017 incidencí na 100 000 obyvatel a rok, což činí u nejnižších hodnot incidencí, které jsou v letech 1960-1962 u kanadských žen na 2,9 incidencích na 100 000 žen, příspěvek 0,30 promile.

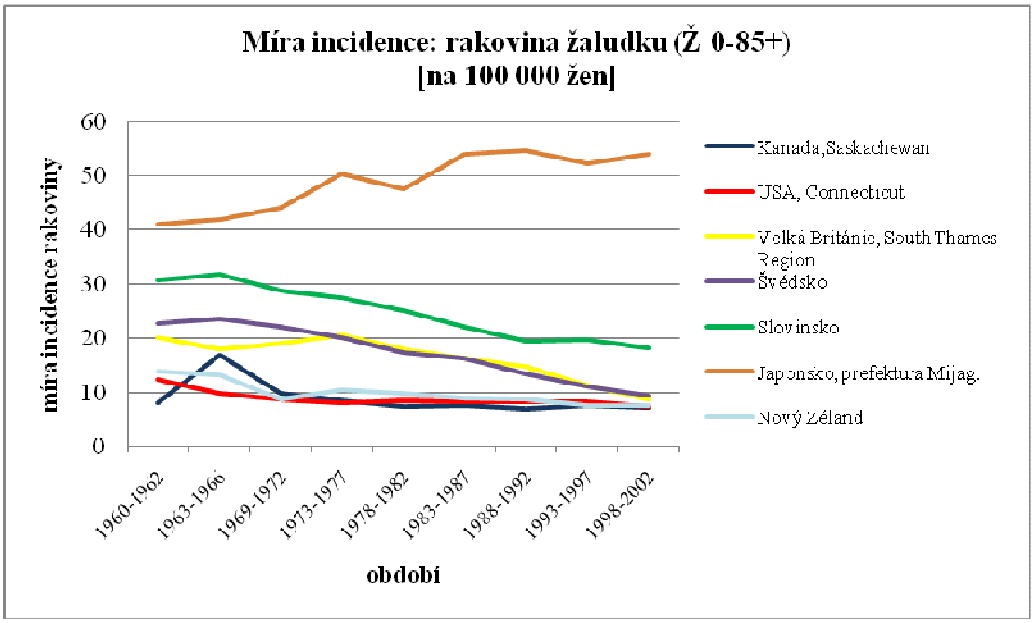
Pokud tento příspěvek porovnáme s nejvyšší hodnotou incidence u mužů v britském regionu South Thames, 126,3 incidencí na 100 000 mužů v letech 1973-1977, vychází příspěvek nádorových onemocnění způsobených jadernými testy v této oblasti na 0,07 promile.

Obrázek 9: Incidence rakoviny žaludku ve vybraných lokalitách 1960-2002, muži



Zdroj: vlastní výpočty na základě Cancer Incidence in Five Continents, Vol. I-IX

Obrázek 10: Incidence rakoviny žaludku ve vybraných lokalitách 1960-2002, ženy



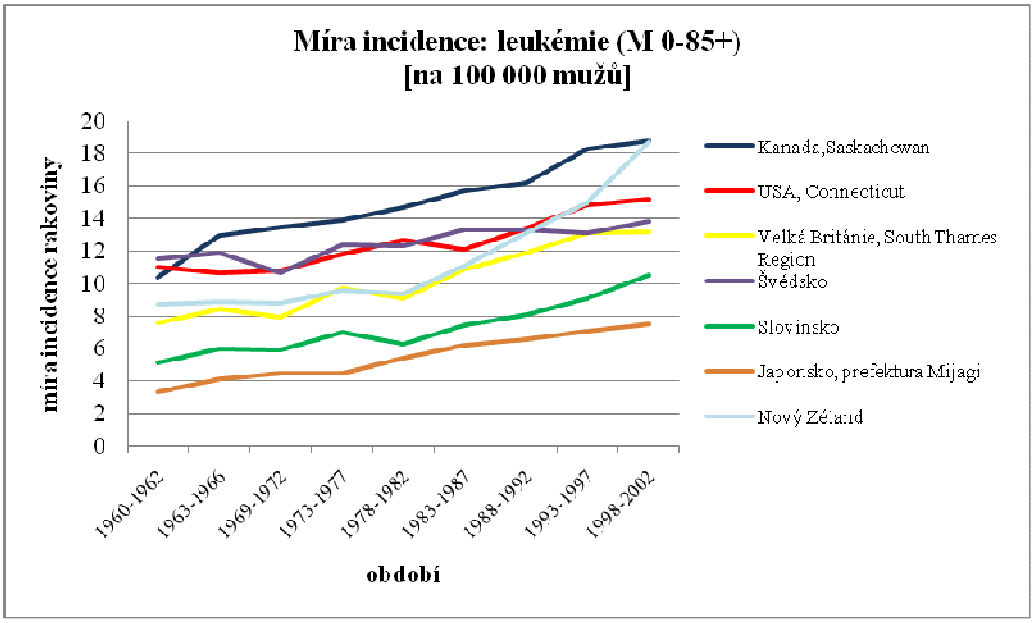
Zdroj: vlastní výpočty na základě Cancer Incidence in Five Continents, Vol. I-IX

Incidence rakoviny žaludku má oproti ostatním nádorovým onemocněním zcela unikátní průběh, její křivka incidence klesá. Vyjma japonské prefektury Mijagi, kde je incidence u obou pohlaví abundantní. Příčinou může být specifické složení stravy Japonců a vysoké procento infekcí bakterií *Helicobacter pylori* [5]. Dalším důvodem může být věkové složení japonské populace.

Pokud budeme uvažovat rovnoměrný příspěvek rakovinných onemocnění žaludku způsobených jaderným testováním během 40 let, dostáváme se na hodnotu 0,017 incidencí na 100 000 obyvatel a rok, což činí u nejnižších hodnot incidencí, které jsou v letech 1988-1992 u kanadských žen na 7,0 incidencích na 100 000 žen, příspěvek 1,18 promile.

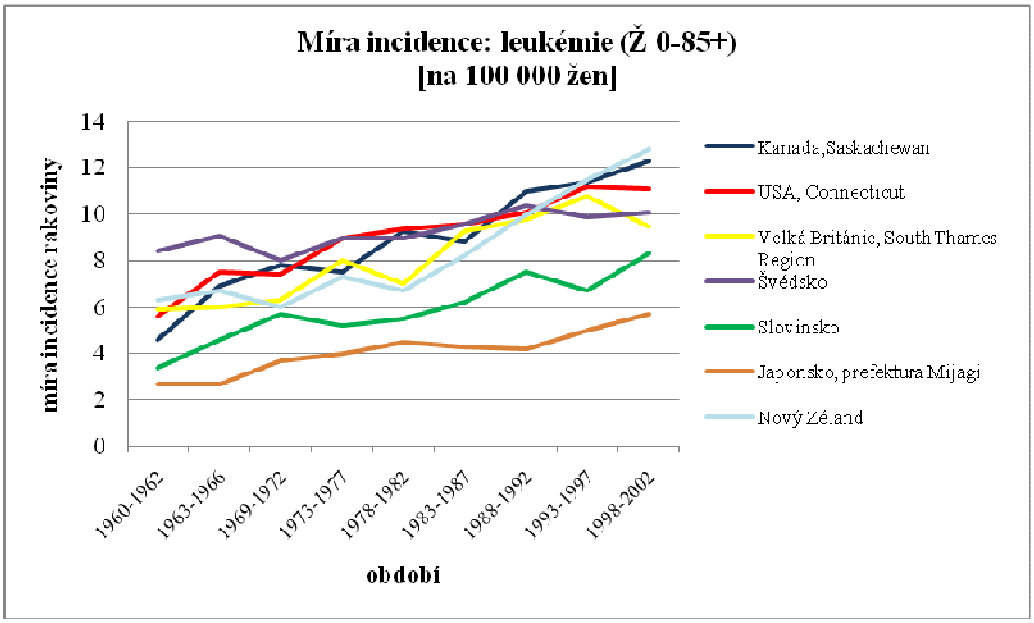
Pokud tento příspěvek porovnáme s nejvyšší hodnotou incidence u mužů v japonské prefektuře Mijagi, 122,1 incidencí na 100 000 mužů v letech 1998-2002, vychází příspěvek nádorových onemocnění způsobených jadernými testy v této oblasti na 0,07 promile.

Obrázek 11: Incidence leukémie ve vybraných lokalitách 1960-2002, muži



Zdroj: vlastní výpočty na základě Cancer Incidence in Five Continents, Vol. I-IX

Obrázek 12: Incidence leukémie ve vybraných lokalitách 1960-2002, ženy



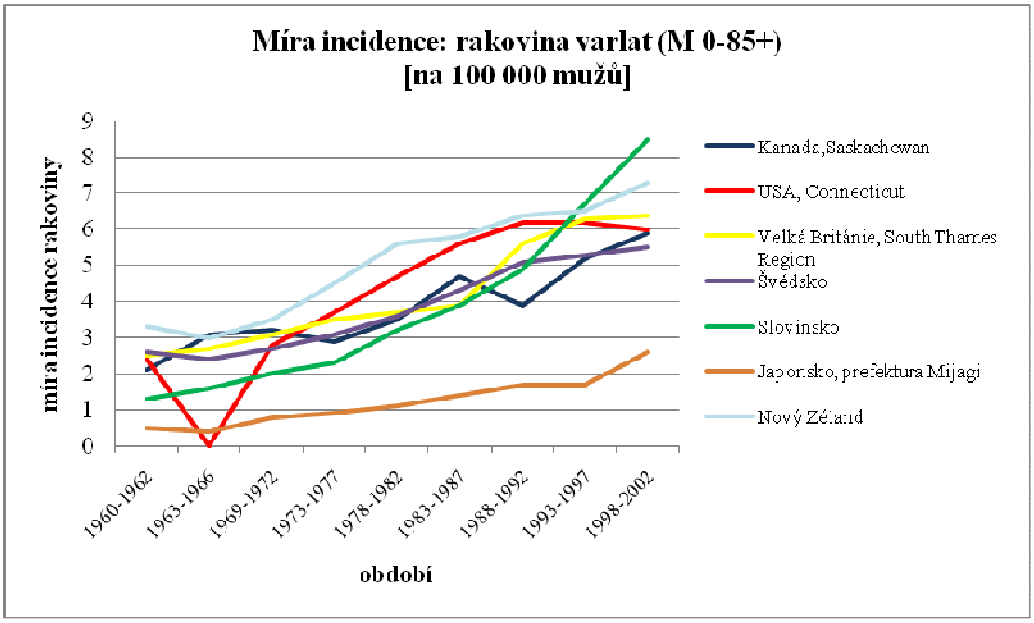
Zdroj: vlastní výpočty na základě Cancer Incidence in Five Continents, Vol. I-IX

Trend míra incidence leukémie obou pohlaví stoupá ve všech sledovaných skupinách. Opět se mužů vyskytují vyšší hodnoty než u žen.

Pokud budeme uvažovat rovnoměrný příspěvek onemocnění leukémií způsobených jaderným testováním během 40 let, dostáváme se na hodnotu 0,017 incidencí na 100 000 obyvatel a rok, což činí u nejnižších hodnot incidencí, které jsou v letech 1960-1966 u žen v japonské prefektuře Mijagi na 2,7 incidencích na 100 000 žen, příspěvek 3,05 promile.

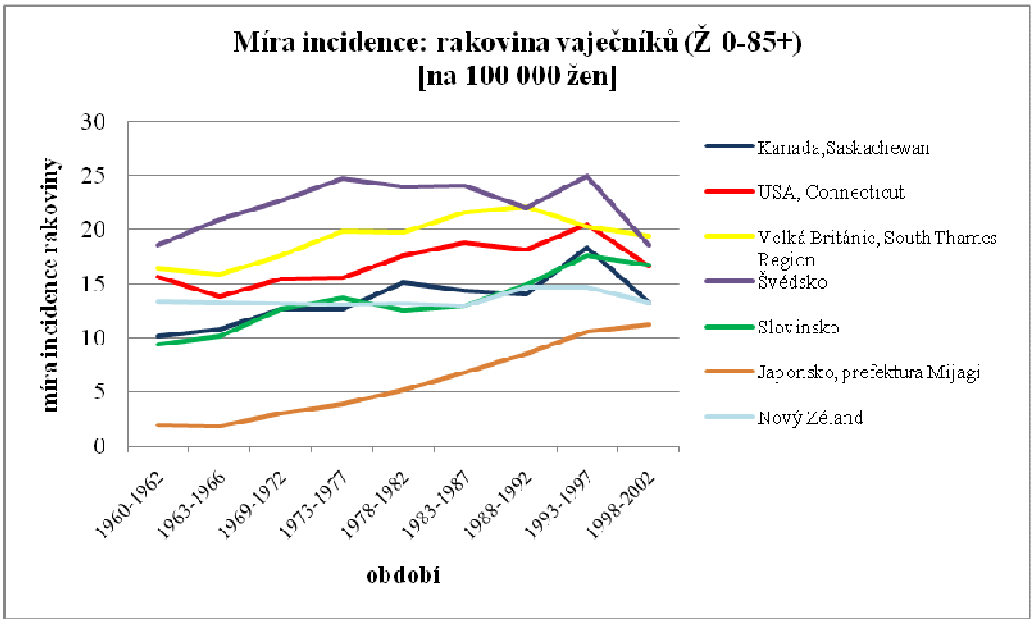
Pokud tento příspěvek porovnáme s nejvyšší hodnotou incidence u mužů v kanadské provincii Saskachewan, 18,8 incidencí na 100 000 mužů v letech 1998-2002, vychází příspěvek nádorových onemocnění způsobených jadernými testy v této oblasti na 0,44 promile.

Obrázek 13: Incidence rakoviny varlat ve vybraných lokalitách 1960-2002, muži



Zdroj: vlastní výpočty na základě Cancer Incidence in Five Continents, Vol. I-IX

Obrázek 14: Incidence rakoviny vaječníků ve vybraných lokalitách 1960-2002, ženy



Zdroj: vlastní výpočty na základě Cancer Incidence in Five Continents, Vol. I-IX

Pokud rakovina varlat u mužů vykazuje vzestupnou tendenci, tak u onkologických onemocnění vaječníků se zdá, že se nárůst zastavuje.

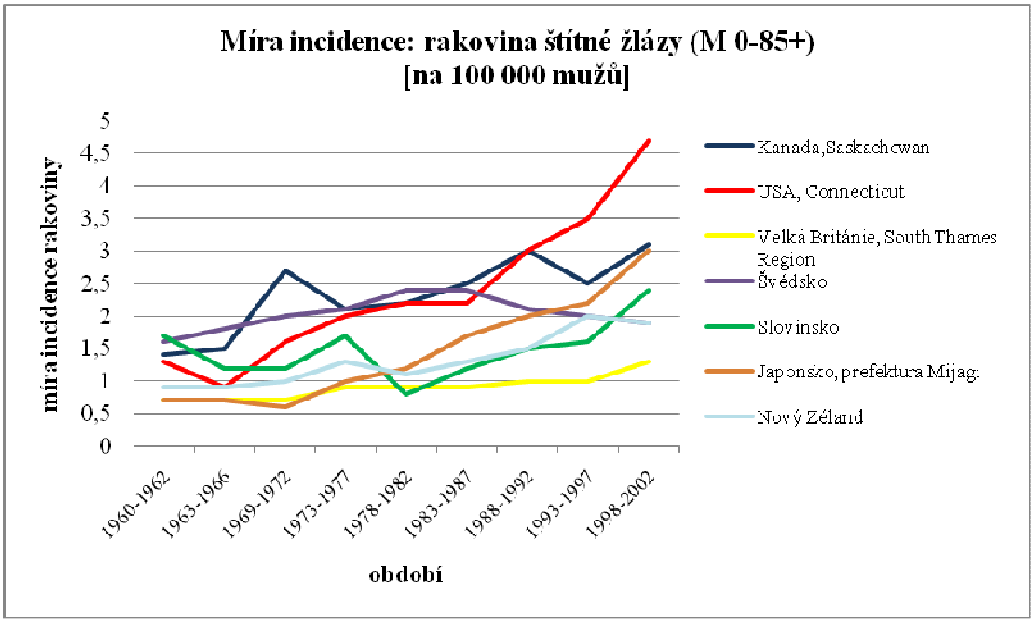
Pokud budeme uvažovat rovnoměrný příspěvek onemocnění rakovinou varlat způsobených jaderným testováním během 40 let, dostáváme se na hodnotu 0,011 incidencí na 100 000 obyvatel a rok, což činí u nejnižších hodnot incidencí, které jsou v letech 1963-1966 u mužů v japonské prefektuře Mijagi na 0,4 incidencích na 100 000 mužů, příspěvek 1,38 procenta. Nicméně tato hodnota je bezesporu ovlivněna extrémně nízkou incidencí tohoto druhu onkologického onemocnění v prefektuře Mijagi. Otázkou je také přesné určení tkáňového faktoru u tkáně varlat protože se udává průměr společně pro mužské a ženské pohlavní orgány, proto je třeba hodnotu 1,38 procenta brát s rezervou.

Pokud tento příspěvek porovnáme s nejvyšší hodnotou incidence u mužů ve Slovinsku 8,5 incidencí na 100 000 mužů v letech 1998-2002, vychází příspěvek nádorových onemocnění způsobených jadernými testy v této oblasti na 0,65 promile.

Pokud budeme uvažovat rovnoměrný příspěvek onemocnění rakovinou vaječníků způsobených jaderným testováním během 40 let, dostáváme se na hodnotu 0,011 incidencí na 100 000 obyvatel a rok, což činí u nejnižších hodnot incidencí, které jsou v letech 1963-1966 u žen v japonské prefektuře Mijagi na 1,9 incidencích na 100 000 žen, příspěvek 2,90 promile. Nicméně tato hodnota je bezesporu ovlivněna extrémně nízkou incidencí onkologických onemocnění gonád v prefektuře Mijagi.

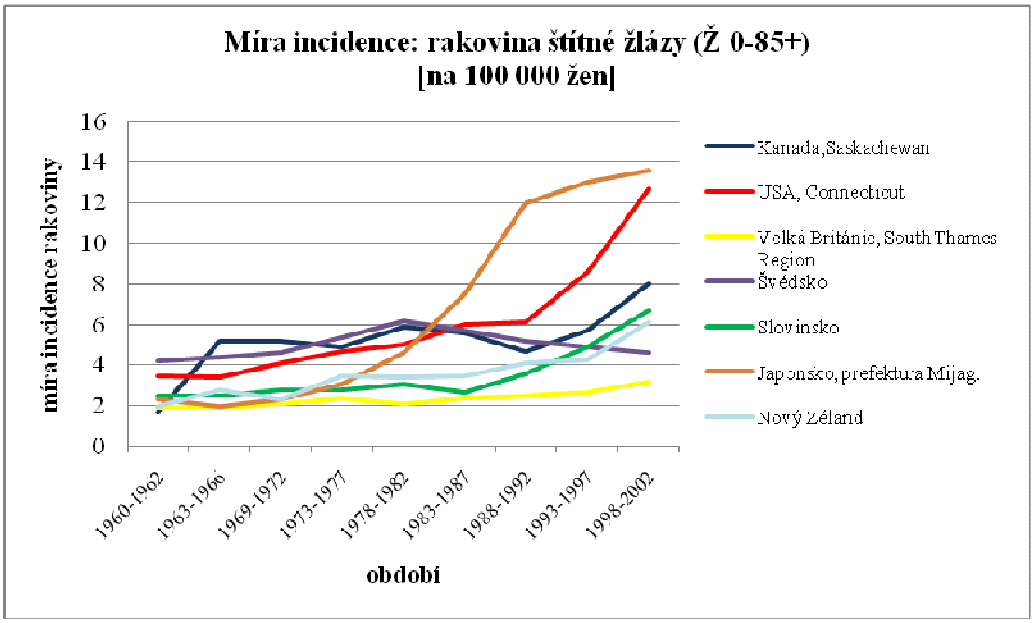
Pokud tento příspěvek porovnáme s nejvyšší hodnotou incidence u žen ve Švédsku 24,9 incidencí na 100 000 žen v letech 1973-1977, vychází příspěvek nádorových onemocnění způsobených jadernými testy v této oblasti na 0,22 promile.

Obrázek 15: Incidence rakoviny štítné žlázy ve vybraných lokalitách 1960-2002, muži



Zdroj: vlastní výpočty na základě Cancer Incidence in Five Continents, Vol. I-IX

Obrázek 16: Incidence rakoviny štítné žlázy ve vybraných lokalitách 1960-2002, ženy



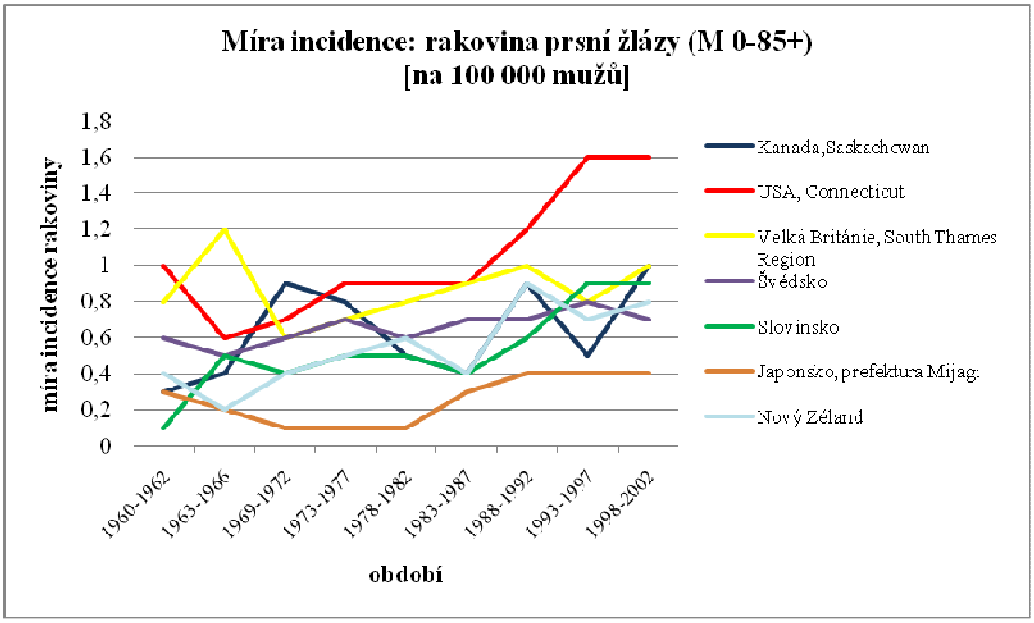
Zdroj: vlastní výpočty na základě Cancer Incidence in Five Continents, Vol. I-IX

Průběh míry incidence rakoviny štítné žlázy má několik specifik. Je to onkologické onemocnění, které má větší incidenci mezi ženami. Jeho průběh, kromě Japonské prefektury, je zhruba až do roku 1988 konstantní a poté začíná stoupat. Překvapující je zřejmá disproporce mezi tímto nádorovým onemocněním u japonských mužů a žen v prefektuře Mijagi a také nárůst incidence ve státě Connecticut v USA.

Pokud budeme uvažovat rovnoměrný příspěvek onemocnění rakovinou štítné žlázy způsobených jaderným testováním během 40 let, dostáváme se na hodnotu 0,006 incidencí na 100 000 obyvatel a rok, což činí u nejnižších hodnot incidencí, které jsou v letech 1969-1972 u mužů v japonské prefektuře Mijagi na 0,6 incidencích na 100 000 mužů, příspěvek 0,46 procenta.

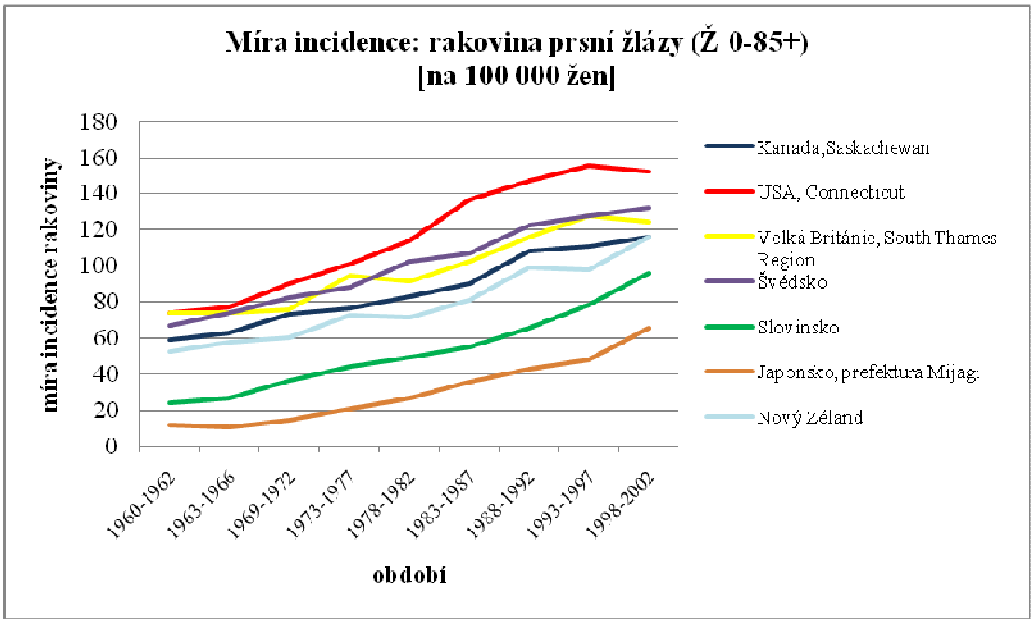
Pokud tento příspěvek porovnáme s nejvyšší hodnotou incidence u žen v japonské prefektuře Mijagi 13,6 incidencí na 100 000 žen v letech 1998-2002, vychází příspěvek nádorových onemocnění způsobených jadernými testy v této oblasti na 0,20 promile.

Obrázek 17: Incidence rakoviny prsní žlázy ve vybraných lokalitách 1960-2002, muži



Zdroj: vlastní výpočty na základě Cancer Incidence in Five Continents, Vol. I-IX

Obrázek 18: Incidence rakoviny prsní žlázy ve vybraných lokalitách 1960-2002, ženy



Zdroj: vlastní výpočty na základě Cancer Incidence in Five Continents, Vol. I-IX

Rakovina prsu je druhem onkologického onemocnění, jehož míra incidence vykazuje silnou vazbu na pohlaví. Zatímco u mužů se vyskytuje velice málo a jeho statistické hodnoty vykazují silné výkyvy, v ženské populaci je jednoznačně ze sledovaných tím onemocněním s nejvyšší incidencí.

Pokud budeme uvažovat rovnoměrný příspěvek onemocnění rakovinou prsní žlázy způsobených jaderným testováním během 40 let, dostáváme se na hodnotu 0,017 incidencí na 100 000 obyvatel a rok, což činí u nejnižších hodnot incidencí, které jsou v letech 1963-1966 u žen v japonské prefektuře Mijagi na 10,8 incidencích na 100 000 žen, příspěvek 0,76 promile.

Pokud tento příspěvek porovnáme s nejvyšší hodnotou incidence u žen ve státě Connecticut 155,6 incidencí na 100 000 žen v letech 1993-1997, vychází příspěvek nádorových onemocnění způsobených jadernými testy v této oblasti na 0,05 promile.

Z tohoto vyplývá, že jednotlivý statistický přírůstek k ročním incidencím je v podstatě zanedbatelný, pohybuje se v řádů promilí, a vliv jaderných testů na zdraví obyvatelstva je kvantifikovatelný pouze v dlouhých obdobích a na celosvětové úrovni.

6 ZÁVĚR

Stanovená hypotéza a), že jaderné testy mají statisticky významný vliv na zvýšení výskytu rakovinných onemocnění populace, se potvrdila, ovšem je třeba doplnit, že tento statistický vliv je patrný pouze v dlouhých časových periodách na celosvětovém vzorku obyvatelstva.

Při jaderném testování bylo do atmosféry uvolněno značné množství radionuklidů, které jsou dodnes aktivní, působí na životní prostředí a tím i na světovou populaci, přičemž aktivita izotopů s dlouhým poločasem rozpadu bude ovlivňovat zdraví obyvatelstva i v dalších staletích až tisíciletích. Incidence nádorových onemocnění je všeobecně na vzestupu a jaderné testování k tomu přispívá svou statistickou měrou.

Omezení atmosférických jaderných testů výrazně snížilo množství nových radionuklidů působících na obyvatelstvo. Výzkumem je stále zpřesňováno působení nízkých dávek na organismus.

Stanovená hypotéza b), že podzemní jaderné testy mají menší důsledky pro zdraví obyvatel a kvalitu životního prostředí než ostatní druhy jaderných testů, se taktéž potvrdila. Při podzemním testování nedochází, kromě případů špatného utěsnění nebo naddimenzování ráže, k vyvrhování radioaktivní izotopů do atmosféry, a proto jsou důsledky tohoto druhu testů maximálně lokalizovány a nemají významnější vliv na celosvětovou populaci.

Do budoucnosti zůstává pro světovou vědeckou obec jedním z hlavních cílů upřesnění působení nízkých dávek na rozvoj stochastických účinků. Další oblastí, která ještě čeká na podrobné prozkoumání, je výzkum neonkologických stochastických účinků, objevují se indicie dávající do souvislosti expozice ionizujícím zářením a chorobami srdce, iktem a onemocněními zažívacího a dýchacího ústrojí.

Výsledky zkoumání také ukazují vliv ionizujícího záření na imunitu, avšak data kvantifikující vliv radiace na rozvoj onemocnění způsobených snížením imunity z důvodů expozice ionizujícím zářením doposud nejsou průkazná.

7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] Atomic Archive com < http://www.atomicarchive.com/History/trinity/test.shtml > online [cit. 2011-04-20]

[2] Detekce ionizujícího záření Radioaktivita.cz < http://www.radioaktivita.cz/jednotky.html > online [cit. 2011-04-14]

[3] Federation of American Scientists < http://www.fas.org/nuke/guide/usa/nuclear/nv209nar.pdf > online [cit. 2011-04-10]

[4] HESS, WILMOT. *The Effects of High Altitude Explosions*. Washington D. C, 1964, 33 str. NASA Technical Note D-2402

[5] National Center for Biotechnology Information. INOUE, M., TSUGANE, S. *Epidemiology of Gastric Cancer in Japan* < http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1743301/pdf/v081p00419.pdf > online [cit. 2011-05-01]

[6] Nuclear Threat Initiative < http://nuclearthreatinitiative.org/db/china/testlist.htm > online [cit. 2011-04-15]

[7] PITSCHMANN, V. *Jaderné zbraně: nejvyšší forma zabíjení.* Praha: Naše vojsko, 2005, 392 str. ISBN: 80-206-0784-6

[8] Preparatory commision for the comprehensive nuclear-test-ban treaty organization < http://www.ctbto.org/ > online [cit. 2011-04-16]

[9] The Nuclear Wepons Archive < http://nuclearweaponarchive.org/Russia/Sovwpnprog.html > online [cit. 2011-04-11]

[10] The Nuclear Weapons Archive < http://nuclearweaponarchive.org/Uk/UKTesting.html > online [cit. 2011-04-10]

[11] ULLMANN, V. *5. Biologické účinky ionizujícího záření.* < http://astronuklfyzika.sweb.cz/JadRadFyzika6.htm > online [cit. 2011-04-10]

[12] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. *Sources and Effects of Ionizing Radiation, Vol I.* New York: United Nations, 1993 ISBN 92-1-142274-0. Annex B: Exposures from man-made sources of radiation (zdroj : http://www.unscear.org/unscear/en/publications/1993.html)

[13] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. *Sources and Effects of Ionizing Radiation, Vol I*. New York: United Nations, 2000 ISBN 978-92-1-142274-0. Annex C: Exposures to the public from man-made sources of radiation (zdroj: http://www.unscear.org/unscear/publications/2000_1.html)

[14] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. *Sources and Effects of Ionizing Radiation, Vol I*. New York: United Nations, 2008 ISBN 978-92-1-142274-0. Annex B: Exposures of the public and workers from various sources of radiation (zdroj: http://www.unscear.org/unscear/en/publications/2008_1.html)

[15] Wikipedia < http://en.wikipedia.org/wiki/596_%28nuclear_test%29 > online [cit. 2011-04-15]

[16] Wikipedia < http://en.wikipedia.org/wiki/France_and_weapons_of_mass_destruction > online [cit. 2011-04-13]

[17] Wikipedia < http://en.wikipedia.org/wiki/High_altitude_nuclear_explosion > online [cit. 2011-04-10]

[18] Wikipedia < http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_nuclear_tests > online [cit. 2011-04-25]

[19] Wikipedie < http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_Partial_Test_Ban_Treaty_signatories > online [cit. 2011-04-16]

[20] Wikipedia < http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_states_with_nuclear_weapons > online [cit. 2011-04-15]

[21] ZÖLZER, F., KUNA, P., NAVRÁTIL, L. *Mechanismy účinků ionizujícího záření.* České Budějovice 2007, 21 str. Doplňkové texty pro posluchače kombinované formy studia studijního programu „Ochrana obyvatelstva“

8 KLÍČOVÁ SLOVA

Jaderné testy

Ionizující záření

Radionuklid

Globální spad

Efektivní dávka

Úvazek dávky

Rakovinná incidence

Statistický vliv