

JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH

ZDRAVOTNĚ SOCIÁLNÍ FAKULTA

Mírové a teroristické použití Polonia-210

Bakalářská práce

Autor: Václav Matějka

Vedoucí práce: doc. Dr.rer.nat. Friedo Zölzer

Datum odevzdání: 5. května. 2011

Abstract

Peace and Terror Use of Polonium-210

The thesis describes and characterizes properties of Polonium -210. It deals with the past and present use of the radioisotope of Polonium -210 either in the hands of non-violent organizations or in the hands of terrorists. It considers the possibility of use of Polonium-210 as a terrorist weapon. The work highlights the case from November 2006, when the ex-spy and former agent of KGB, Alexander Litvinenko, was poisoned in London. Then Polonium-210 was used as a means of poisoning for the first time in history.

Further the work evaluates ways in which polonium (Po -210) might be abused and its accessibility to terrorist attacks. It also weighs possibilities to obtain Po-210 from commercially available products, and also a possibility to obtain it from a state-controlled nuclear reactor. The issue of internal contamination of a human, the process of internal radiation and the issue of detection in the environment is also described here.

The main objective of the thesis is to gather as much information available and then to process it into a coherent whole. The reader then obtains a comprehensive view of a complex issue of the radioisotope of Polonium -210.

Prohlášení:

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě fakultou - elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách, a to se zachováním 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 výsledku 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 Rokycanech 4. května 2011

.....
Václav Matějka

Poděkování:

Rád bych poděkoval doc. Dr.rer.nat. Friedovi Zölzerovi. za odborné vedení, pomoc a spolupráci při zpracování této bakalářské práce.

OBSAH

Úvod	7
1. SOUČASNÝ STAV	9
1.1 Seznámení s Po-210	9
<i>1.1.1 Historie</i>	<i>9</i>
<i>1.1.2 Obecná charakteristika</i>	<i>9</i>
<i>1.1.3 Chemické a fyzikální vlastnosti</i>	<i>11</i>
<i>1.1.4 Výskyt v přírodě</i>	<i>11</i>
<i>1.1.5 Výroba</i>	<i>13</i>
<i>1.1.6 Toxicita</i>	<i>13</i>
1.2 Použití	14
1.3 Problematika vnitřního ozáření Po-210	
<i>1.3.1 Vlastnosti záření alfa a jeho vliv na buňky</i>	<i>18</i>
<i>1.3.2 Vyjádření dávky z ozáření</i>	<i>18</i>
<i>1.3.3 Průběh vnitřního ozáření</i>	<i>20</i>
<i>1.3.4 Biokinetické modely</i>	<i>21</i>
<i>1.3.5 Odhad smrtelné dávky</i>	<i>23</i>
<i>1.3.6 Problém detekce</i>	<i>25</i>
1.4 Teroristické použití Po-210 (případ Litviněnko)	26
<i>1.4.1 Úvod</i>	<i>26</i>
<i>1.4.2 Život Alexandra Litviněnka</i>	<i>26</i>
<i>1.4.3 Smrt Alexandra Litviněnka</i>	<i>27</i>
<i>1.4.4 Poloniové stopy</i>	<i>29</i>
<i>1.4.5 Proč právě Po-210</i>	<i>30</i>
<i>1.4.6 Riziko pro veřejnost</i>	<i>31</i>
<i>1.4.7 Průběh nemoci</i>	<i>32</i>
2. CÍLE PRÁCE A HYPOTÉZA	33
3. METODIKA ZPRACOVÁNÍ	33

4. VÝSLEDKY	34
4.1 Možné zdroje Polonia-210	34
<i>4.1.1 Dostupnost Po-210 z reaktoru</i>	<i>34</i>
<i>4.1.2 Izolace z produktů s obsahem Po-210</i>	<i>35</i>
5. DISKUZE	41
5.1 Možnosti užití Polonia-210 jako nástroje teroristů	41
5.2 Problémy při tvorbě této bakalářské práce	42
6. ZÁVĚR	44
7. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	45
8. KLÍČOVÁ SLOVA	48

Úvod

Teroristické zneužití radioaktivních látek je v posledních letech velmi diskutovaným tématem. Během nedávné doby se objevilo několik teroristických skupin, které se pokoušely o výrobu zbraní s použitím radioaktivních látek. Jde především o hrozbu z látek Pu-239 a U-235, které se využívají k výrobě jaderné bomby. 23. listopadu 2006 zemřel bývalý agent KGB a FSB Alexandr Litviněnko na otravu Poloniem-210 a celým světem proletěly otázky, kolik je vlastně nebezpečných radioaktivních látek a kdo má přístup k takto vzácnému a zdánlivě nedostupnému izotopu. Polonium-210 se od té doby stalo předmětem mnoha novinářských článků i vědeckých studií. Po tomto případě vzniklo již mnoho diskuzí kolem možných způsobů získání Polonia-210 z Ruska nebo dokonce na objednávku z amerických internetových stránek. Většina odborníků se však shoduje na tom, že příprava tohoto jedu vyžaduje zdroje, jakými disponují pouze vlády. Látku lze totiž ekonomicky přijatelným způsobem připravit pouze v reaktoru.

Polonium-210 je emitör záření alfa. Běžné oblečení a pokožka jsou schopny člověka před vlivem tohoto záření do jisté míry ochránit. Nebezpečí poškození organismu vzniká až při vniknutí dovnitř těla. Alfa částice z Polonia-210, jež se nacházelo v Litviněnkově těle, byly pohlceny jeho svalstvem a kůží. Zvenčí se tedy vůbec nedaly použitými přístroji detekovat. Lékaři proto nedokázali stanovit druh otravy. Měli sice podezření na radiaci, ale když mu přejeli po těle jednoduchým čidlem, žádné významné ozáření nezaznamenali. Vzhledem ke zvráceně geniální volbě smrtelné látky to ovšem nebylo překvapivé. Způsobů intoxikace je několik. Jako nejjednodušší způsob intoxikace Poloniem se jeví perorální podání, například přimíchání do jídla. Další možnosti jsou například inhalace nebo vpich pod pokožku. Po intoxikaci nastává klasická nemoc z ozáření. Nevolnost, sucho v ústech, průjem, zvýšená teplota, špatné dýchání. Léčba intoxikace je prakticky neřešitelná protože Polonium nelze žádným způsobem odstranit z těla tak, aby dávka uvnitř těla přestala mít letální následky. Z hlediska jednoduchosti podání, nenápadnosti, a následků můžeme zařadit Po-210 mezi nejzákeřnější toxiny vůbec. Pro srovnání, jeho toxicita pro organismus je 250

tisíckrát větší než kyselina kyanovodíková. Smrtelná dávka pro 80 kg člověka se pohybuje okolo 1 mikrogramu.

Jak již bylo řečeno, Polonium-210 je velice vzácný izotop. Je členem uran-radiové řady, takže se běžně vyskytuje i v přírodě. Jeho zastoupení je však velmi nízké. Vyskytuje se zejména v půdě, a to v rozmezí 10 až 100 Bq/kg. Mírové využití nachází Polonium jako eliminátor statického náboje v průmyslu, například štětce s obsahem Polonia pro odstranění elektrostatického náboje ve fotografickém průmyslu. Díky svému vysokému měrnému tepelnému výkonu nachází Polonium-210 další využití jako zdroj v radiačních termoelektrických člancích. Zejména v naváděcích systémech a satelitech, bylo použito například i jako zdroj v Lunochodu. Dále se Po-210 používá ve vojenství. Ve slitině nebo směsi s Beryliem vytváří neutronový zdroj používaný hlavně v minulosti např. jako roznětka v jaderných zbraních.

1. SOUČASNÝ STAV

1. 1. Seznámení s Po-210

1. 1. 1 Historie

Polonium, jako elementární prvek, bylo objeveno roku 1898 Marií Skłodovskou-Curie a Pierem Curie. Název získal prvek po vlasti své objevitelky, tedy Polska. Polonium je členem uran-radiové řady. Bylo možné ho izolovat z Jáchymovského smolince (uraninit, oxid uraničitý). Koncentrace Polonia v takovéto uranové rudě se pohybuje okolo 0,1 mg na tunu. Prvek byl objeven díky své nepoměrně vyšší aktivitě, než mají ostatní radioaktivní prvky obsažené ve smolinci. Po izolování Uranu a Thoria měl smolinec stále vyšší radioaktivitu než oba tyto prvky společně. Manželé Curie byli tedy „donuceni“ k izolování dalšího radioaktivního prvku, Polonia. O několik let později bylo izolováno i Radium.¹

1. 1. 2 Obecná charakteristika

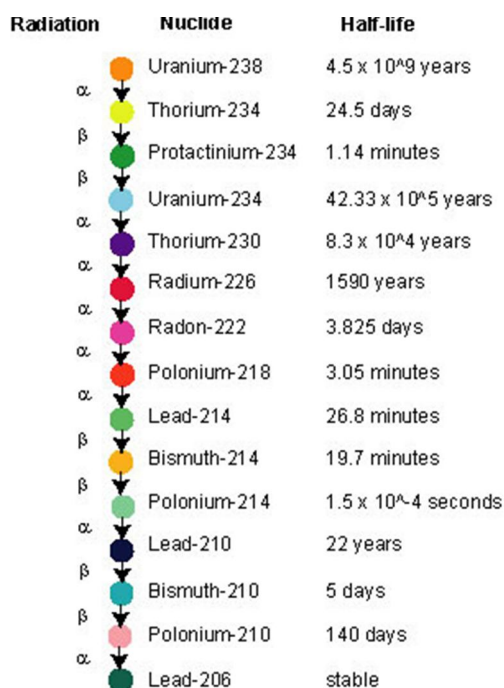
Je známo na 33 izotopů polonia. Všechny jsou radioaktivní. Mezi nejznámější patří právě Po-210 (poločas rozpadu 138.376 dní) dále pak Po-209 (poločas rozpadu 103 let) a Po-208 (poločas rozpadu 2.9 let). Jak již bylo řečeno Po-210 je z uran-radiové řady (viz obrázek č. 1). Je produktem rozpadu Bismutu-210 (poločas rozpadu 5.01 dní). Přeměnou Po-210 vzniká Pb-206, které je stabilní a dále se již nerozpadá. Po-210 se, díky relativně krátkému poločasu, vyznačuje mimořádně vysokou měrnou aktivitou. Jeden gram Po-210 má aktivitu $1,7 \times 10^{14}$ Bq (tj. přibližně 5 000 x větší než měrná aktivita Ra-226. Při srovnání s dalšími významnými nuklidy (tab. č. 1) je vidět, jak malá hmotnost prvku (resp. počet atomů) odpovídá jednotkové aktivitě 1 Bq. Po-210 je prakticky čistým zářičem alfa. Energie, vyzářená alfa částicí je 5,297 MeV. Při rozpadu vzniká i záření gama, které má energii 0,802 MeV. Díky vysoké měrné aktivitě a tomu, že se prakticky veškerá uvolněná energie z radioaktivní přeměny pohltí uvnitř

¹ Polonium. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 25. 10. 2010, last modified on 19.3.2011 [cit. 2011-03-19]. Dostupné z WWW: <<http://en.wikipedia.org/wiki/Polonium>>.

materiálu, má Po-210 velký měrný tepelný výkon (1 gram přibližně 140 W). Po-210 je těkavé a svítí modrým světlem což je způsobeno vysokou ionizací okolního vzduchu.²

Obrázek č. 1

Uran-radiová rozpadová řada



Tabulka č. 1²

Aktivita 1 Bq a jí odpovídající hmotnost prvku (izotopu) a počty atomů pro některé významné izotopy

Nuklid	m (g)	Počet atomů N
Po210	6.0E-15	1.7E+07
Th228	3.3E-14	8.7E+07
Pu241	2.4E-13	6.1E+08
Pu238	1.6E-12	3.9E+09
Am241	8.3E-12	2.1E+10
Pu240	1.2E-10	3.0E+11
Pu239	4.4E-10	1.1E+12
Th230	1.4E-09	3.6E+12
U233	2.8E-09	7.2E+12
U234	4.3E-09	1.1E+13
Pu242	7.0E-09	1.7E+13
Np237	4.0E-08	1.0E+14
U235	1.3E-05	3.2E+16
U238	8.0E-05	2.0E+17
Th232	2.5E-04	6.4E+17

² Kolektiv pracovníků SÚRO Praha. *Několik poznámek k problematice ozáření Po-210* [online]. Praha: SÚRO Praha, Prosinec 2006 [cit. 2011-03-19]. Dostupné z WWW: <http://www.suro.cz/cz/publikace/novinky/Nekolik_poznamek_k_problematice_ozareni_poloniem_210.pdf>.

1. 1. 3 Chemické a fyzikální vlastnosti polonia

Izotop Polonium-210 je polokov pevného skupenství s atomovým číslem 84. Barva je stříbřitě šedá. Chemickými vlastnostmi se nejvíce podobá bismutu a teluru. Hustota je 9.4 g/cm³ (zhruba jako stříbro). Teplota tání je 254 °C, varu 962 °C. Atomy jsou uspořádány do jednoduché kubické struktury se vzdáleností 335.2 pikometrů. Mezi výjimečnou vlastnost Polonia patří schopnost se „rozptýlit“ nebo „vypařit“. Atomy na okraji krystalické mřížky se díky slabší vazebné energii uvolňují do okolí. V případě, že je polonium volně a okolní prostředí má teplotu vyšší než 55 °C, 50% Polonia se vypaří během 45 hodin.³

1. 1. 4 Výskyt v přírodě

V půdě, horninách, stavebních materiálech se vyskytuje Po-210 v hmotnostní měrné aktivitě běžně v rozmezí 10 až 100 Bq/kg (podobně jako uran, radium apod.), to chemicky představuje hmotnostní koncentraci v řádu 10⁻¹⁶ - 10⁻¹⁵ (kg Po-210 na kg půdy). V atmosféře, kde Po-210 vzniká postupně přeměnou z radonu, se uvádí hodnoty objemové aktivity (0,1 až 2 mBq/m³). Z atmosféry se deponuje na povrch Země, díky tomu bývají vyšší hodnoty na rostlinách s velkou plochou listů. Známé jsou např. vyšší hodnoty Po-210 v tabáku (1 cigareta obsahuje cca 75 mBq, z toho v popelu cca 91 %, příjem kuřáka z vdechnutého kouře cca 7%, únik kouře do místnosti cca 2%). Vyšší výskyt Po-210 je také v lišejnících, tím i v masu sobů, odtud vyšší dávky např. u Laponců. Dále je znatelně vyšší výskyt Po-210 v mase mořských živočichů (tabulka č. 3). Průměrné hmotnostní aktivity Po-210 a dalších přírodních radionuklidů v běžných potravinách jsou v tabulce č. 2⁴, průměrný odvozený roční příjem aktivity Po-210 a dalších přírodních radionuklidů a z toho odvozený úvazek efektivní dávky je v tabulce č. 4. Běžně vylučované hodnoty v exkretech (moči a stolici - důležité pro měření a odhad vnitřní kontaminace) kolísají u jednotlivců podle skladby potravin i vlivem kouření. Uvádí se v moči jednotky až desítky mBq/den, ve stolici desítky až stovky mBq/den.⁴

³ ROESSLER, Gen. Health Physics News. In *Why Po-210?* [online], Únor 2007 [cit. 2011-03-19]. Dostupné z WWW: <http://www.hps.org/documents/polonium_210_story.pdf>.

⁴ Kolektiv pracovníků SÚRO Praha. *Několik poznámek k problematice ozáření Po-210* [online]. Praha: SÚRO Praha, Prosinec 2006 [cit. 2011-03-19]

Tabulka č. 2⁴ - Průměrné hmotnostní aktivity Po-210 a dalších přírodních radionuklidů v běžných potravinách v ČR. (mBq/kg).

	U238 - U234	Th230	Ra226	Pb210	Po210	Th232	Ra228	Th228	U 235
Mléčné produkty	1	0,5	5	40	60	0,3	5	0,3	0,05
Maso	2	2	15	80	60	1	10	1	0,05
Obiloviny	20	10	80	100	100	3	60	3	1
Ovoce	3	0,5	30	25	30	0,5	20	0,5	0,1
Ryby	30	-	100	200	2000	-	-	-	-

Tabulka č. 3⁴ – Průměrné hmotnostní aktivity Po-210 v mase mořských živočichů ve Velké Británii. (Bq/kg)

Treska	Platýs	Humr	Garnát	Krab	MLŽ (Mušle)
0.7-0.8	0.9-4.4	5	7	15-20	35-40

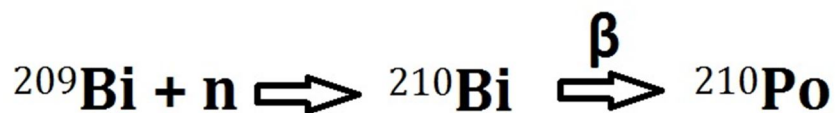
Tabulka č. 4⁴ - průměrný odvozený roční příjem aktivity Po-210 a dalších přírodních radionuklidů v ČR.

Radionuklid	Roční příjem [Bq]		Úvazek efektivní dávky [μSv]	
	ingesce	inhalace	ingesce	inhalace
U-238	5,7	0,007	0,22	0,056
U-234	5,7	0,007	0,24	0,066
Th-230	3	0,0036	0,53	0,05
Ra-226	22	0,0036	5,3	0,013
Pb-210	36	3,6	22	4
Po-210	63	0,36	66	1,2
Th232	1,7	0,007	0,3	0,18
Ra-228	15	0,007	9	0,019
Th-228	3	0,007	0,09	0,28
U-235	0,2	0,0004	0,009	0,003

1. 1. 5 Výroba

Polonium-210 se vyskytuje v uranových rudách. Je tedy možné ho chemickými metodami izolovat. Obsah Polonia v jedné tuně této rudy se však pohybuje okolo 0,1 mg. Izolace z uranových rud je velice zdlouhavá a vzhledem k získanému množství také neefektivní.

Mnohem efektivnější a využívanější metodou je výroba Polonia-210 v jaderném reaktoru bombardováním stabilního Bismuthu-209 neutrony. Z toho vzniká Bismuth-210, který má poločas rozpadu pět dní. Bismuth-210 se rozpadá s únikem záření beta na Polonium-210. Proces je popsán reakcí na obrázku. Tímto způsobem se na celém světě vyrobí asi 8 g za měsíc. Prakticky veškeré Polonium se vyrábí v Rusku. Rusko prodává Polonium americkým společnostem, které se zabývají výrobou štětců s antistatickým účinkem, kde se Polonium-210 využívá.⁵



1. 1. 6 Toxicita

Polonium-210 můžeme s jistotou zařadit mezi nejvíce toxické látky vůbec. Je však třeba zdůraznit, že střední smrtelná dávka pro člověka je pouze odhadovaná a není empiricky potvrzená. Případ akutní otravy Po-210 je v historii zaznamenán pouze u Alexandra Litviněnka, zde však byla použita dávka mnohonásobně převyšující odhadovanou smrtelnou dávku. V historii bylo Po-210 testováno na zvířatech, odtud také odhad dávky pochází. Mnoho publikací však uvádí lehce rozdílné údaje. Většina se však shoduje na střední smrtelné dávce 10-12 ng/kg. 80 kg člověka je tedy možné otrávit 1 mikrogramem. Tento údaj odpovídá ingesci. Při inhalaci může stačit dávka o něco menší. Problematické smrtelné dávky se ještě budeme zabývat níže, zejména

⁵ Health Physics Society News. In *Polonium-210 information sheet* [online], Květen 2010 [cit. 2011-03-19]. Dostupné z WWW: <<http://www.hps.org/documents/po210factsheet.pdf>>.

v kapitole 3.5. V tabulce č. 5⁶ je srovnání střední smrtelné dávky několika nejznámějších toxinů.⁶

Tabulka č. 5.⁶ Nejznámější toxiny.

Toxická látka	LD 50 (na 1 kilogram hmotnosti)
Botulotoxin	1 ng
Po-210	10 ng
Batrachotoxin	1-2 µg
Dioxin (TCDD)	20 µg
Jed taipana	25 µg
Tetrodotoxin	400 µg
Aflatoxin B1	500 mg
Chlorid rtuťnatý	1 mg
Kyanovodík (HCN)	1,5 mg
Strychnin	1-2 mg
Bílý fosfor	3 mg
Jed zmiže obecné	5 mg
Kyanid draselný (KCN)	5–10 mg
Oxid arsenitý (arsenik)	15-20 mg
Jedlá sůl	3g

1. 2. Použití

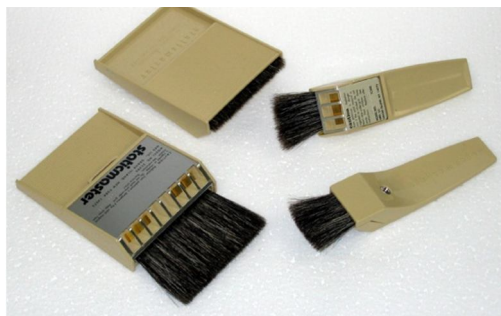
Přestože je Polonium-210 izotop s velice specifickými vlastnostmi, nenachází tak velké uplatnění, jak by se mohlo zdát. V současnosti je využíváno zejména na **eliminaci statického náboje** například v textilním nebo fotografickém průmyslu.

Hlavním producentem těchto eliminátorů statického náboje je americká firma Staticmaster, která vyrábí štětce (viz obrázek č. 2) s obsahem Polonia-210. Negativně nabitý povrch může být neutralizovaný kladně nabitými částicemi a naopak. Polonium-

⁶ Median lethal dose. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 13. 2. 2010, last modified on 16. 3. 2011 [cit. 2011-03-19]. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Median_lethal_dose>.

210 emituje alfa částice, což jsou kladně nabitá jádra hélia. Ty mají dostatek energie, aby ve vzduchu dolétly asi 3 cm. V průběhu letu dochází k interakci kladně nabitých jader hélia s molekulami vzduchu. Při interakci v molekule vzduchu dochází k ztrátě elektronu a stává se z ní pozitivně nabitý ion. Volné elektrony se váží na jiné molekuly vzduchu a vznikají z nich záporně nabité iony. Každá alfa částice, která je vyzářena vytvoří vždy jeden kladný a jeden záporný ion. Tím vzniká vyvážený antistatický efekt.

Obrázek č. 2 Antistatické štětce s obsahem Po-210



Firma Staticmaster vyrábí tyto štětce v různých velikostech a s různou aktivitou od 7,4 MBq do 18,5 MBq. Jedná se o velmi jednoduchou metodu k odstranění elektrostatického náboje a tím odstranění prachových částic z objektivů fotoaparátů, filmů atd. Polonium-210 je v tomto odvětví nahraditelné. Na odstranění prachu existují i jiné metody založené na elektrických generátorech opačného elektrického náboje.⁷

V historii se Polonium-210 používalo také jako **zdroj v termoelektrických článcích**. K tomuto využití pravděpodobně dochází i v současné době, nejsou však dostupné informace, které by to jednoznačně potvrzovaly. Termoelektrické články, také RTG (Radioizotopový termoelektrický generátor) jsou užívány jako dlouhodobé zdroje elektrického proudu. Například pro automatické monitorovací stanice v odlehlých oblastech a na moři pro potřeby meteorologie a oceánografie, ale především v kosmických aplikacích. Byly použity např. u prvních amerických navigačních družic

⁷ *TheodoreGray.com* [online]. c2003 [cit. 2011-03-19]. Facts, pictures and stories about element Polonium. Dostupné z WWW: <<http://www.theodoregray.com/periodictable/Elements/084/index.s7.html>>. *Company Seven* [online]. c2004 [cit. 2011-03-19]. Staticmaster Cleaning and Ionizing Brush. Dostupné z WWW: <<http://www.company7.com/staticmaster/products/staticmaster.html>>.

typu Transit, ve vědeckých stanicích ALSEP, umístěných na povrchu Měsíce posádkami lunárních expedic projektu Apollo. Jsou nenahraditelným zdrojem proudu pro kosmické sondy vyslané do velkých vzdáleností od Slunce, kde použití fotovoltaických baterií nepřichází v úvahu. Radioizotopový termoelektrický generátor je dlouhodobý a spolehlivý zdroj stejnosměrného elektrického proudu. Zdrojový izotop je nejčastěji ve formě tablety umístěn na středu termoelektrického generátoru. Radioaktivním rozpadem vzniká teplo, které je pak přeměněno na elektrickou energii.

Zejména v 60. a 70. letech se využívalo Polonium-210. Kilogram čistého polonia ve formě kostky má stěnu 48mm, aktivitu 166 PBq a emituje asi 140 kW. Častěji je však používán izotop Plutonia-238 ve formě oxidu plutoničitého PuO_2 zejména proto, že má přiměřeně dlouhý poločas rozpadu (87,7 roku), takže vydrží déle.⁸

Další využití nacházelo Polonium-210 jako **neutronový zdroj** v jaderných zbraních. Základem jaderné bomby je štěpný materiál (např. obohacený uran nebo plutonium) a neutronový iniciátor. Neutronový iniciátor je umístěn ve středu štěpného materiálu a ve správnou chvíli má za úkol zahájit řetězovou reakci. Zejména v prvních iniciátorech sestrojených ve 40. a 50. letech se využívalo směsi Polonia-210 s Berylliem-9. Tento iniciátor byl použit například na konci druhé světové války při útoku na japonské město Nagasaki. Při neutronové iniciaci je důležité, aby bylo emitováno alfa záření s velkou energií, přitom gama linie musí mít energii co nejmenší.⁹

V Nagasaki byla použita jaderná bomba s krycím názvem Fat man („tloušťák“). Iniciátor se směsí Polonium-Beryllium dostal krycí název Urchin („uličník“). „Uličník“ se nacházel v centru Plutonia a měl tvar koule o průměru 20 mm. Náplň tvořilo několik vrstev. Ve středu se nacházelo 740 GBq Polonia. Okolo Polonia byla vrstva Beryllia o průměru 8 mm zevnitř i vně pokrytá vrstvou Niklu a 0.1 mm vrstvou Zlata. Vnější

⁸ Radioisotope thermoelectric generator. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 10.10. 2010, last modified on 17. 3. 2011 [cit. 2011-03-19]. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Radioisotope_thermoelectric_generator>.

⁹ Neutron source. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 18. 2. 2007, last modified on 25. 11. 2010 [cit. 2011-03-19]. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Neutron_source>.

tvořila skořápka z Beryllia silná 6 mm. V ní se nacházelo 15 soustředných drážek ve tvaru klínu, které byly 2.09 mm hluboké a jejich stěny byly opět pokryty vrstvou Niklu a Zlata. V každé drážce bylo 1110 GBq Polonia. Celkové množství Polonia bylo asi 11 miligramů. Vrstvy Niklu a Zlata oddělovaly Polonium od Beryllia. Když vznikla nárazová vlna, vyvolaná obvykle klasickou výbušninou, tyto vrstvy praskly a došlo k neutronové iniciaci. Alfa částice produkované Poloniem narážely do atomů Beryllia. Ty pak emitovaly neutrony (1 neutron za 5-10 nanosekund) a došlo k řetězové reakci.

Použití Polonia pro neutronovou iniciaci bylo navrženo v roce 1944 Edwardem Condonem. Od roku 1945, bylo v Americe Polonium-210 kódově označováno „postum“. Později se však ukázalo, že jeho nevýhodou je relativně krátký poločas rozpadu a tedy i malá trvanlivost jaderné zbraně, v níž byl tento zdroj použit. První zbraně měly trvanlivost asi 4 měsíce. Později i 1 rok. To však nebylo stále dostačující a proto byly postupem času vynalezeny neutronové zdroje zakládající se na jiném principu.¹⁰

1.3 Problematika vnitřního ozáření Poloniem-210

Vnitřní kontaminace Poloniem-210 byla předmětem zájmu již od padesátých let. Ze šedesátých let existuje několik publikací, týkající se nejen distribuce Po-210 v organismu laboratorních zvířat, ale i studie, týkající se akutního radiačního syndromu z Po-210. Vzhledem k přítomnosti Polonia-210 v okolí jako běžného přírodního radionuklidu existuje mnoho studií, které počítají rozsah ozáření člověka např. v důsledku konzumace stravy s obsahem Polonia-210 nebo rozsah ozáření Poloniem-210 jako produktem rozpadu Radonu. Tyto dávky jsou však velmi nízké a průměrná efektivní dávka dosahuje hodnot okolo 70 μ Sv za rok. Případ, kdy kontaminace způsobila akutní nemoc z ozáření, do nedávné doby nebyl žádný. Až po otrávení

¹⁰ Modulated neutron initiator. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 22. 11. 2007, last modified on 6. 2. 2011 [cit. 2011-03-19]. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Modulated_neutron_initiator>.

ruského agenta Litviněnka vzniklo několik studií a publikací, které se zabývají problémem vnitřního ozáření v řádech jednotek Gy.¹¹

1. 3. 1 Vlastnosti záření alfa a jeho vliv na buňky

Před tím, než postoupíme k průběhu vnitřního ozáření, je nutné charakterizovat záření alfa. Toto záření je vysoko energetické, složené z jader helia. Vzniká hlavně přeměnou jader s vysokým nukleonovým číslem, jako je například právě Polonium, dále Radon, Radium, Uran a jiné. Podstatná vlastnost tohoto záření je, že v pevných látkách částice rychle ztrácí energii, a tak se zastaví na velmi krátké dráze. Ve vzduchu má alfa částice dolet dle energie, kterou nese, to je něco málo kolem 4 cm. V tkáni či vodném roztoku to je v řádech mikrometrů. Vnějšímu záření alfa je naše kůže dobře odolná, hlavně díky povrchové vrstvě odumřelých buněk. Důležité ze zdravotního hlediska je právě to, že alfa záření má oproti jiným zářením velice vysokou energii. V případě přítomnosti alfa zářiče v těle je okolní tkáň ozařována tím nejhorším způsobem. Záření obecně účinkuje na základní stavební jednotky všech živých tkání – na buňky. Může způsobit její smrt, případně změnit genetickou informaci uvnitř buňky. V případě vysoké dávky (několik Gy) způsobí záření tzv. mitotickou smrt buňky, k níž dochází v průběhu buněčného dělení - mitózy. Záření nezpůsobí přímou smrt, ale zamezí buňce dále se dělit. V případě, že dávka záření nedosáhne usmrcení buňky, nastávají změny genetické informace- mutace. Ty se pak při dělení mohou přenášet na další buněčné generace.¹²

1. 3. 2 Vyjádření dávky z ozáření

Základní jednotkou pro popis radioaktivní látky je becquerel (zn.Bq), která vyjadřuje aktivitu. Aktivitou rozumíme počet jader, který se rozpadne za jednotku času. V tomto případě 1 Bq zastupuje rozpad 1 atomového jádra za 1 sekundu. Pro určení absorbované dávky je dále nutné znát energii vyzařované částice. V případě Po-210 je

¹¹ HARRISON, John, et al. *Polonium-210 as a poison* [online]. UK : IOP Publishing, 2007 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z WWW: <<http://dspace.lrrl.org:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/701/Polonium-210%20as%20a%20poison.pdf?sequence=1>>.

¹² ROSINA Jozef; KOLÁŘOVÁ Hana; STANEK Jiří. Biofyzika pro studenty zdravotnických oborů. 1. vydání. Grada Publishing. Praha. 2006. 232 s. ISBN 80-247-1383-7

to asi 5,4 MeV. (1 eV je asi $1,602 \cdot 10^{-19}$ J). Z těchto údajů za určitých předpokladů možné v případě ozáření určit absorbovanou dávku, která se udává v jednotkách gray (zn. Gy). Jeden gray odpovídá energii záření jednoho joulu absorbované jedním kilogramem látky ($1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/Kg}$). Absorbovaná dávka v Gy však nevyjádří skutečné biologické účinky záření. Jednotlivá záření jsou z hlediska biologických účinků od sebe velice odlišná, a i když mohou tkáni předat stejnou energii, skutečný výsledek ozáření může být odlišný. Pro přirovnání je možné říci, že množství energie, které vás zasáhne ve formě krup, vás zraní více než stejná energie v podobě deště. Se zářením je to stejné. Tělo je více zraněno zářením alfa než beta nebo gama. Poměr biologické účinnosti záření je označován jako RBE (relative biological effectiveness) nebo také RBÚ (relativní biologická účinnost). Je to faktor, který vyjadřuje poměr biologické účinnosti jednotlivých druhů záření mezi sebou. Jako referenční druh záření se obvykle považuje rentgenové záření (gamma) s napětím 250 kV. Problém rozdílné účinnosti záření řeší veličina s názvem ekvivalentní dávka, která se měří v sieverttech (zn. Sv). Při výpočtu ekvivalentní dávky se kromě energie záření zahrnuje radiační váhový faktor, který udává, jak je daný druh záření biologicky účinný. Radiační váhový faktor pro alfa částice je 20 (alfa záření má 20x větší biologickou účinnost než rentgenové záření). Dávka uváděná v sieverttech tedy jako jediná dává představu o skutečné škodlivosti záření a zohledňuje i rozdílnou biologickou účinnost jednotlivých druhů záření. Při obdržené dávce záření však hraje roli další faktor a to je radiosenzitivita tkání. Záření totiž působí na jednotlivé tkáně odlišně. Senzitivita kostní dřeně je tak například více než desetkrát větší než senzitivita kůže nebo mozkové tkáně. Při vnitřním ozáření je tedy výpočet dávky velice složitý, protože je nutné počítat s biokinetikou radionuklidu (viz níže) a následně zhodnotit jednotlivé dávky v určitých orgánech. Tento problém řeší efektivní dávka jejíž jednotkou je také sievert. Efektivní dávka se vypočítá součtem vážených středních hodnot ekvivalentních dávek v různých tkáních lidského těla. Tato veličina zahrnuje i tkáňový váhový faktor, který vyjadřuje relativní příspěvek dané tkáně k celkové zdravotní újmě. Výhodou efektivní dávky je, že umožňuje vyjádřit radiační zátěž organismu jedinou číselnou hodnotou i při nerovnoměrném ozáření organismu (resp. jeho části). To umožňuje porovnávat různé způsoby ozáření organismu. Tkáňové váhové faktory se však používají zejména při pozorování

dlouhodobých účinků záření (karcinogeneze), v případě akutních účinků je nutné se zaměřit na dávku pro kritické orgány, zejména kostní dřeň. Při akutní nemoci z ozáření totiž smrt během několika týdnů vyvolá právě poškození kostní dřeně.¹³

1. 3. 3 Průběh vnitřního ozáření

Polonium-210 je téměř čistý alfa zářič. Zastoupení gama záření je zanedbatelné. Ohrožení ozářením je tedy možné pouze uvnitř těla. Jako brána vstupu připadá v úvahu inhalace, poraněním přes kůži nebo ingesce. Nejčastější a nejjednodušší bránou vstupu je ingesce. Jakmile je radionuklid přítomen v těle, jeho biokinetika je velmi složitá a k jejímu popisu je třeba zavést zjednodušující předpoklady. Kinetika radionuklidu je ovšem vždy určována jeho chemickou formou a fyzikálně chemickými vlastnostmi. Lidské tělo obsahuje velké množství prvků. Téměř všechny tyto prvky mají radioaktivní izotopy, které když se dostanou do těla tak sledují stejné biokinetické cesty jako jejich neradioaktivní izotopy (např. Fosfor, Jód, Draslík). Chování dalších radionuklidů, které nemají neradioaktivní analogy je složitější a je určeno afinitou k buněčným komponentám a transportnímu systému v těle. Biokinetikou radionuklidu se budeme ještě zabývat níže.

Vnitřní kontaminace Po-210 je stanovitelná prostřednictvím měření v moči nebo ve stolici (90% ve stolici, 10% v moči). Efektivní poločas pro člověka je udáván na 30 až 50 dní. Jako kritické orgány, tedy orgány s nejvyšší koncentrací jsou většinou udávány ledviny, slezina, játra a také kostní dřeň. Dále se může vázat na červené krvinky, v placentě, slzných a mléčných žlázách, mozkových plenách a střevní stěně. Ozáření organismu je velice neuniformní. V ledvinách je např. 30 násobně více Po-210 v ledvinových kanálcích než v ledvinové tkáni. Obsah Po-210 v jednotlivých orgánech je v tabulce č. 6.¹⁴

¹³ KLENER, Vladislav, et al. *Principy a praxe radiační ochrany*. Praha: Státní úřad pro jadernou bezpečnost, 2000. 520 s. ISBN 80-238-3703-6

¹⁴ HARRISON, John, et al. *Polonium-210 as a poison* [online]. UK : IOP Publishing, 2007 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z WWW: <<http://dspace.lrrri.org:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/701/Polonium-210%20as%20a%20poison.pdf?sequence=1>>.

Tabulka č. 6.¹⁵ Retence Po-210 v těle (%).

Játra	Ledviny	Kostní dřeň	Slezina	Krev	Svalstvo
30	7	10	5	13	17

Odhad dávky z vnitřního ozáření je složitější než odhad při externím ozáření. To je způsobeno hned několika důvody. Například dávky z vnitřního ozáření nelze přímo měřit. Také distribuce radionuklidu v těle je velmi nehomogenní a různé orgány jsou ozařovány různě. A dále dávky z vnitřního ozáření se realizují v delším časovém období. Zatímco v případě zevního ozáření obdrží jedinec dávku v definovaném čase, kdy se nachází v poli záření, dávka z radionuklidu, který se dostal do těla, se realizuje tak dlouho, dokud radionuklid z těla nezmizí biologickým procesem vylučování nebo radioaktivním rozpadem či kombinací obou procesů.

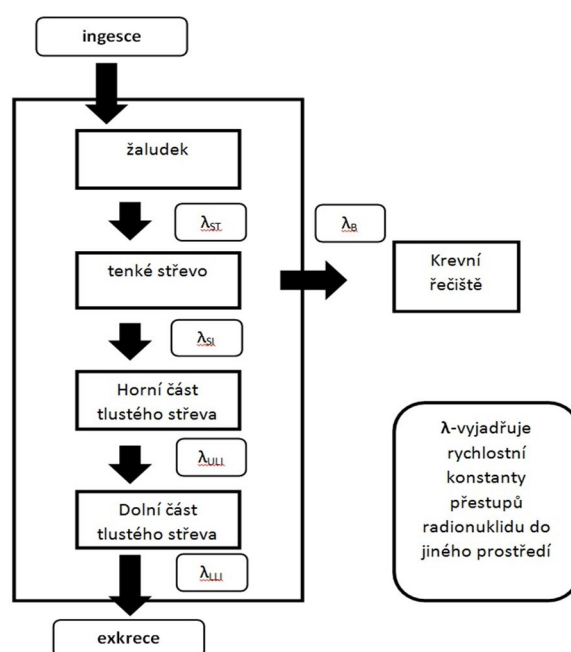
1. 3. 4 Biokinetické modely

Jak již bylo zmíněno výše, popis chování radionuklidu v organismu je velice složitý. Proto jsou zaváděny ICRP (International Commission on Radiological Protection) všeobecně uznávané biokinetické modely. Ty zaznamenaly rozvoj zejména v devadesátých letech, a to díky rozvoji výpočetní techniky, která umožňuje provést výpočet i pro velmi složité systémy na osobním počítači. Dříve byly používány modely ICRP 30 (Publikace č. 30 vydaná mezinárodní komisí pro radiologickou ochranu obsahující biokinetické modely), které jsou navzdory zastaralosti stále široce užívány. Novější modely podle ICRP 66, 67 a ICRP 70 jsou daleko přesnější a také mnohem složitější. Může se zde objevovat i více než 50 různých faktorů. Níže budou zmíněny některé základní vlastnosti biokinetických modelů podle ICRP 30. Novější modely jsou příliš složité a jejich popis je nad rámec této práce. Nejdůležitější jsou dva základní modely. Plicní model a model zažívacího traktu. Dále je používán také kostní model.

Plicní model podle ICRP 30 popisuje, jak je inhalovaný radionuklid v plicích deponován, což je pak použito k výpočtu dávky na plíce. Dále popisuje vstup radionuklidu absorpcí do krevního řečiště a mechanický transport do gastrointestinálního traktu.

Model zažívacího traktu podle ICRP 30 (obrázek č. 3) umožňuje stanovit retenci radionuklidu v GI traktu, čehož se pak používá k výpočtu ozáření GI traktu. Rovněž lze odvodit část požitého radionuklidu, která se absorbuje do krevního řečiště (popsáno koeficientem přenosu z trávicího ústrojí do krve). Model rozděluje zažívací trakt na žaludek, tenké střevo, horní část tlustého střeva a dolní část tlustého střeva. Střední doba pobytu radionuklidu v žaludku se předpokládá 1 hodina, přitom se nepředpokládá žádná absorpce do tělních tekutin. Střední doba pobytu v tenkém střevě je 4 hodiny. V této části se odehrává absorpce do krve. Pro horní část tlustého střeva se předpokládá střední doba pobytu 13 hodin, pro dolní část 24 hodin. Pro Po-210 je nejčastěji udáván koeficient přenosu z trávicího ústrojí do krve 0,1 (v některých publikacích je dokonce udán koeficient 0,5) Znamená to, že z GI traktu do krve se přenesou 10% (případně 50%) množství radionuklidu.¹⁵

Obrázek č. 3. Model zažívacího traktu podle ICRP 30.



¹⁵ KLENER, Vladislav, et al. *Principy a praxe radiační ochrany*. Praha: Státní úřad pro jadernou bezpečnost, 2000. 520 s. ISBN 80-238-3703-6

HARRISON, John, et al. *Polonium-210 as a poison* [online]. UK : IOP Publishing, 2007 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z WWW: <<http://dspace.lrrri.org:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/701/Polonium-210%20as%20a%20poison.pdf?sequence=1>>.

1. 3. 5 Odhad smrtelné dávky

Po zahrnutí všech výše uvedených faktorů a procesů můžeme přistoupit k odhadu smrtelné dávky Po-210. Hodnota smrtelné dávky se pohybuje v závislosti na způsobu podání, jako nejpravděpodobnější se jeví ingesce. Při ingesci je však nutné počítat s vstřebáním pouze 10 % Po-210 do těla, zbytek je vyloučen. Dále je rozdíl mezi smrtelnou dávkou, která způsobí smrt za 200 a více dnů, v důsledku selhání nějakého orgánu a dávkou, která způsobí akutní nemoc z ozáření a člověk zemře po 20 dnech na selhání kostní dřeně (hematopoetický syndrom).

Střední smrtelná dávka při celotělovém vnějším ozáření se obecně pohybuje okolo 4,5 Sv ($LD_{50} = 4,5$ Sv). Na základě konceptu efektivní dávky a dávkového koeficientu můžeme vypočítat smrtelnou dávku Po-210. Dávkový koeficient je v případě ingesce Po-210 0,51 μ Sv/Bq [Polonium. In *Wikipedia*, cit. 2011-04-27]. To znamená, že 1 Bq způsobí dávku ve výši 0,51 μ Sv. Při specifické aktivitě Po-210 166 TBq/g vychází střední smrtelná dávka na 53 ng, přičemž je zahrnut faktor vstřebávání z GI traktu do krve 0,5 [ICRP 67]. Faktor 0,5 se však používá pro zkoumání dlouhodobých účinků (karcinogeneze), pro akutní účinky je třeba zahrnout faktor 0,1 [R. SCOTT 2007]. Po přepočítání tedy získáme dávku asi 5 krát vyšší, tj. 0,25 μ g. Další problém se objevuje u váhových faktorů. Váhové faktory uváděný ICRP jsou, stejně jako faktor přenosu z GI traktu do krve, spíše pro dlouhodobé účinky. [R. SCOTT 2007]. Při akutním vlivu záření je tedy nutné přistoupit k úplně jinému způsobu výpočtu.¹⁶

Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.2 smrt je při akutní nemoci z ozáření vyvolána během několika týdnů poškozením kostní dřeně, tedy poruchou krvetvorby. Na základě experimentů na zvířatech je předpokládána střední smrtelná dávka z Polonia-210 na kostní dřeň 1,6 Gy - 4,8 Gy. V případě, že jde o akutní účinky záření, není alfa RBÚ 20 ale kolem 2 [R. SCOTT 2007]. Dále je na základě experimentu na zvířatech vypočítán dávkový koeficient pro kostní dřen 22 dnů po ingesci 0,0088 Gy/MBq. Zahrneme-li ještě faktor přenosu z GI traktu do krve 0,1 (pro akutní účinky), můžeme vypočítat střední smrtelnou dávku (LD_{50}) na 5,16 – 28,2 ng/kg. (0,36 – 1,97 μ g pro 70 kg

¹⁶ R. SCOTT, Bobby . HEALTH RISK EVALUATIONS FOR INGESTION EXPOSURE OF HUMANS TO POLONIUM-210. In [online]. University of Massachusetts : [s.n.], 2007 [cit. 2011-04-23]. Dostupné z WWW: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2477690/>>.

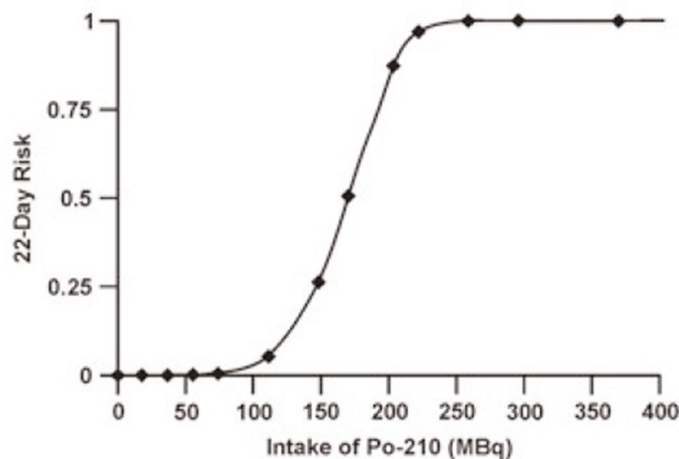
člověka)¹⁷. To je asi 5 krát (1,5 – 8 krát) vyšší než odhad na základě efektivní dávky podle ICRP, ale shoduje s odhadem dalších autorů, kteří se tímto výpočtem zabývali. Například Peter D. Zimmerman, nukleární fyzik a profesor přírodních věd a bezpečnosti na King's College v Londýně, spočítal střední smrtelnou dávku asi 1.1 µg. Hranice pro smrtelnou dávku pro 100 % (LD₁₀₀) se pak pohybuje v rozmezí 7 – 38,6 ng/kg (0,5 – 2,7 µg pro 70 kg člověka).¹⁸ [R. SCOTT 2007]

Tabulka č. 7. Odhadovaná toxicita Po-210 pro člověka na základě experimentech na zvířatech (MBq/Kg). 1MBq=6ng. [R. SCOTT 2007]

MBq/Kg	Pravděpodobnost úmrtí z deterministických účinků (%)	Předpokládaný zbývajíc čas (dny)	Poškození
>1	100	1 - 28	Masivní poškození ledvin a GI traktu. Hematopoetický záchvat. Rychlá ztráta krevních buněk.
0,4 - 1	100	50 - 250	Poškození ledvin a GI traktu. Poškození kostní dřeně. Pomalejší ztráta krevních buněk vedoucí k smrti.
0,03 - 0,3	1 - 100	300 - 500	Poškození orgánů. Smrt pravděpodobně v důsledku selhání některého orgánu.
0 - 0,02	< 1		Možný vznik rakovinného bujení. "Zkrácení života".

¹⁸ R. SCOTT, Bobby . HEALTH RISK EVALUATIONS FOR INGESTION EXPOSURE OF HUMANS TO POLONIUM-210. In [online]. University of Massachusetts : [s.n.], 2007 [cit. 2011-04-23]. Dostupné z WWW: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2477690/>>.

Graf č. 1. ¹⁷ Riziko smrti pro 70 kg člověka do 22 dnů v důsledku hematopoetického záchvatu v závislosti na množství požitého Po-210 (MBq). [R. SCOTT 2007].



1. 3. 6 Problém detekce

Po-210 je velice obtížně měřitelné. Energie alfa záření je 5,3 MeV, ale gama linie 0,803 MeV má velmi slabé zastoupení. Proto je zářič Po-210 velmi obtížně detekovatelný prostřednictvím gama záření a to bohužel i při velké aktivitě. Pro srovnání s podobným zářičem s Cs-137 je citlivost asi o pět řádů menší (minimální detekovatelná aktivita stotisíckrát větší). V případě, že se v prostředí bude nacházet zářič s Po-210, který by po ingesci způsobil ozáření dávkou v jednotkách Gy, běžné měřicí přístroje, které jsou založené na detekci gama, by zářič vůbec nezachytily. Pro analýzy jsou nutné metody založené na detekci alfa záření.¹⁹

¹⁹ Kolektiv pracovníků SÚRO Praha. *Několik poznámek k problematice ozáření Po-210* [online]. Praha: SÚRO Praha, Prosinec 2006 [cit. 2011-03-19]. Dostupné z WWW: <http://www.suro.cz/cz/publikace/novinky/Nekolik_poznamek_k_problematice_ozareni_poloniem_210.pdf>.

1. 4. Teroristické použití Polonia-210 (případ Litviněnko)

1. 4. 1 Úvod

V roce 2006 se stal poprvé radioizotop Polonia-210 nástrojem teroristů. Začátkem listopadu 2006 náhle onemocněl bývalý agent KGB Alexandr Litviněnko. S podezřením na otravu byl hospitalizován. Koncem listopadu Alexandr Litviněnko zemřel. Později byla diagnóza stanovena jako vnitřní ozáření koncentrovaným Poloniem-210. Jako prostředek otravy a navíc v takovém rozsahu bylo Polonium-210 použito v historii poprvé. Z důvodu politických souvislostí se tento incident stal mediálně proklamovanou událostí. Po zveřejnění způsobu otravy se ve společnosti začaly objevovat pocity nejistoty a strachu z dalších možných útoků s použitím Polonia-210 nebo jiného podobného radioizotopu. V důsledku toho vzniklo několik odborných publikací, které se zabývaly zhodnocením rizikovosti Po-210 jako teroristické zbraně a dále možnostmi získání tohoto radioizotopu teroristy.²⁰

1. 4. 2 Život Alexandra Litviněnka

Jak již bylo zmíněno, kauza Litviněnko se stala mediálně velice zajímavou zejména z politických důvodů. Alexandr Litviněnko se narodil 4. prosince 1962. Byl bývalý agent KGB a FSB. Byl ostrým kritikem prezidenta Putina, především kvůli jeho postoji k Čečensku. V roce 2000 emigroval do Velké Británie, kde získal azyl a v roce 2006 také britské občanství. Na začátku listopadu 2006 byl otráven a 23. listopadu na následky otravy zemřel.

V roce 1988 začal pracovat v kontrarozvědce KGB, od roku 1991 sloužil v centrále FSB. Za účinnou činnost při boji s organizovaným zločinem byl vyznamenán titulem veterána MUR (Kriminalistické oddělení moskevské milice). V roce 1997 byl přearozován do přísně tajné správy pro rozpracovávání zločineckých organizací FSB na funkci staršího operativního spolupracovníka a zástupce náčelníka 7. oddělení.

²⁰ ROESSLER, Gen. Health Physics News. In *Why Po-210?* [online], Únor 2007 [cit. 2011-03-19]. Dostupné z WWW: <http://www.hps.org/documents/polonium_210_story.pdf>.

Na tiskové konferenci v listopadu 1998 zveřejnil, že dostával rozkazy v rozporu se zákony. V březnu 1999 byl zatčen a umístěn ve vazební věznici Lefortovo. Soudní jednání skončilo osvobozením, ale hned poté byl v budově soudu zatčen FSB s jiným obviněním, které bylo nakonec uzavřeno, aniž by bylo zahájeno soudní řízení. Po propuštění z druhé vazby a po písemném závazku, že neopustí zemi, bylo proti němu zahájeno další šetření. Přes závazek brzy s pomocí předsedy Nadace občanských svobod Alexandra Goldfarba odjel z Ruska a v květnu 2001 obdržel politický azyl ve Velké Británii.

V knize „FSB blows up Russia“ napsané spolu s Jurijem Felštinským uvedl verzi, že teroristické atentáty v roce 1999 na obytné domy v Moskvě a Volgodoňsku byly připraveny a provedeny agenty FSB s úmyslem svést odpovědnost na Čečeny a získat tak záminku k obnovení čečenské války.²¹

1. 4. 3 Smrt Alexandra Litviněnka

1. listopadu 2006 Litviněnko náhle onemocněl a byl hospitalizován ve fakultní nemocnici v centru Londýna. Jako příčina nemoci byla později stanovena přítomnost velkého množství radionuklidu polonia-210. V rozhovorech Litviněnko prohlásil, že v den kdy onemocněl, se setkal s dvěma bývalými agenty KGB Dmitrijem Kovtunem a Andrejem Lugovojem. Ačkoli oba popřeli jakoukoli spojitost se schůzkou s Litviněnkem a jeho smrtí, podle informací od amerických vyšetřovacích služeb bylo zjištěno, že Kovtun zanechal stopy Polonia-210 v domě a ve voze, který používal v Hamburku. V den otravy dále Litviněnko obědval s Mario Scaramellou,. Cílem schůzky byly informace o pronikání KGB do italské politiky a dále informace o smrti Anny Politkovské, novinářky, zavražděné v jejím bytě v Moskvě v říjnu 2006. Poslední podezřelou osobou, s kterou se Litviněnko setkal, byl Boris Berezovsky, Litviněnkův přítel. Vdova po zemřelém Marina Litviněnková obvinila z vraždy Moskvu. Tvrdila, že vražda jejího manžela byla provedena na příkaz úřadů, a zároveň oznámila, že odmítá poskytnout jakékoli důkazy, neboť se obává, že by byly zneužity či zkresleny. Sam

²¹ Alexander Litvinenko. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 19. 11. 2006, last modified on 24. 1. 2011 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Alexander_Litvinenko>

Litviněnko před smrtí obvinil ze svojí vraždy Kreml s Vladimírem Putinem. Putin samozřejmě jeho tvrzení označil za absurdní. Po smrti Litviněnka začalo Rusko i Velká Británie s vyšetřováním. Později se částečně přidala i vyšetřovací služba USA.

Britská strana došla k osobě Andreje Lugovoje. Dne 26. ledna 2007, britské úřady oznámily, že policie vraždu Litviněnka vyřešila. Policie údajně objevila stopu polonia-210 v Millennium hotelu, kde se Litviněnko setkal s Dmitrijem Kovtunem a Andrejem Lugovojem. Kromě toho do médií unikla slova některého z vyšších úředníků, který řekl, že vyšetřovatelé označují vraždu Litviněnka jako „státem podporovaný atentát řízený ruskými bezpečnostními službami“. Ve stejný den média oznámila, že britská vláda připravuje žádost o vydání Andreje Lugovoje za účelem vyšetřování jeho účasti na vraždě Litviněnka. Až o čtyři měsíce později 28. května 2007 podalo státní zastupitelství Velké Británie oficiální výzvu k vydání ruského občana Andreje Lugovoje. Lugovoj však obvinění z vraždy odmítl a označil tvrzení proti němu jako politicky motivované.

Ruská strana označila za viníka Borise Berezovského. Stopy Polonia-210 byly skutečně nalezeny i u něj v kanceláři. Ruská strana tedy požadovala povolení k vyšetřování této radioaktivní stopy, Britové však povolení nevydali a dokonce zakázali ruským úřadům výslech Berezovského a dalších několika podezřelých.

O Litviněnkově smrti však existuje více teorií než jen z Britských a Ruských vyšetřovacích služeb. Své příznivce si získala i teorie o pašování Polonium-210 pro použití například ve spouštích jaderných zbraní. Litviněnko spolu s Dmitrijem Kovtunem a Andrejem Lugovojem údajně pašovali Polonium-210 a díky neopatrnému způsobu převážení se Poloniem Litviněnko otrávil. Tato teorie má však mnoho odpůrců zejména z důvodu, že zacházení s Poloniem by muselo být až příliš neopatrné a ingesce omylem je velice nepravděpodobná.

Poslední teorií je dosud neznámý příslušník ruské informační služby, veřejností a médií označován jako „Vladislav“. Boris Berezovsky totiž později policii řekl, že Litviněnko se zmínil o muži, s kterým se setkal před schůzkou s Kovtunem a Lugovojem. Tento muž byl údajně později objeven i na záznamech z kamer v hotelu Millenium. Tato teorie vyšla později jako jedna z pravděpodobných. Vladislav údajně Litviněnkovi vhodil Polonium do čaje. Dále je pravděpodobné, že Vladislav přiletěl do

Londýna společně s Lugovojem. To by vysvětlovalo stopy Polonia-210 v autě, které Lugovoj používal v Hamburku. Vladislava se nikdy vypátrat nepodařilo, je však velice pravděpodobné, že pracoval pro ruské tajné služby.²²

1. 4. 4 Poloniové „stopy“

Jak již bylo v této práci zmíněno, Polonium-210 je velice obtížně detekovatelné zejména z důvodu slabého zastoupení emise gama záření. Avšak Britským službám se po otravě Litviněnka dařilo Polonium „vystopovat“ velice rychle a přesně. A dokonce s přesným určením času, kdy se Polonium na daném místě objevilo. To znamená, že ve vlastnictví Britů bylo zařízení na přesnou detekci alfa záření a to i při velice nízkých koncentracích. Je velice pravděpodobné, že vrah volil jako prostředek otravy Polonium-210 zejména z důvodu špatné detekce a doufal, že stopy, které radioizotop zanechá, nebude možné tak jednoduše vypátrat. Je tedy možné, že o citlivé technologii založené na detekci alfa záření pravděpodobně nevěděl.

Stopy Polonia-210, které se podařilo vypátrat, byly celkem tři. První zanechal Litviněnko. Druhou Lugovoj s Kovtunem. A třetí Mario Scaramella. Vzory a úrovně radioaktivity naznačily, že Polonium-210 požil pouze Litviněnko, zatímco Lugovoj s Kovtunem zanechávali stopu typickou pro přímý kontakt s Poloniem.

Podle oficiální verze Litviněnko požil Polonium-210 1. listopadu kolem 17. hodiny v hotelu Millenium na Grosvenor Square. V autobuse, kterým do hotelu přijel, se nenašly stopy žádné. Naopak velké množství bylo zjištěno přímo v hotelu. Konkrétně ve čtvrtém patře v celé jedné místnosti a zvláště potom v jednom šálku od čaje. Po návštěvě hotelu Millenium, se Litviněnko zastavil v kanceláři Borise Berezovského, kde použil fax, na němž byla radioaktivita později také zjištěna. Asi v 18 hodin Litviněnka vyzvedlo taxi a dovezlo ho domů. Auto, v němž Litviněnko jel, muselo být pro příliš vysokou kontaminaci později odstaveno. Vše, čeho se následující dny dotýkal, bylo kontaminováno. Jeho rodina se dokonce do domu nemohla vrátit následujících šest měsíců. Jeho manželka byla pozitivně testována na přítomnost Polonia-210 v těle, avšak nezanechávala po sobě další stopy. Tato skutečnost dovedla vyšetřovatele

²² Alexander Litvinenko assassination theories. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 3. 4. 2008, last modified on 29. 12. 2010 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Alexander_Litvinenko_assassination_theories>.

k jednoznačnému závěru, že osoby, které se setkaly s Litviněnkem, nebyly dostatečně kontaminovány, aby po sobě zanechávaly druhotné stopy. Stopa Lugovoj s Kovtunem a dále Mario Scaramelly tedy nepocházela z kontaktu s Litviněnkem, ale pravděpodobně z přímého styku s Poloniem-210. Tuto teorii potvrzuje i fakt, že stopy zanechané po nich jsou výraznější, než stopa po Litviněnkovi.

Lugovoj s Kovtunem se kromě 1. listopadu setkali s Litviněnkem i dříve a to 16. října. Ke schůzce došlo ve stejném hotelu a baru, pouze u jiného stolu. V baru byly kromě poloniových stop z 1. listopadu nalezeny i stopy starší. Stáří původu těchto stop bylo s minimální odchylkou stanoveno právě na datum 16. října. Z toho vyplývá, že Lugovoj s Kovtunem měli Polonium s sebou i při první schůzce. Vyšetřovatelé tento fakt zhodnotili jako „neúspěšný pokus o otravu“ nebo jako „zkoušku“.

Lugovoj dále zanechal stopy ze dne 31. října v kanceláři Berezovského, kterého pravděpodobně ten den navštívil. Poloniové stopy, zanechané pravděpodobně Kovtunem a Lugovojem, byly také nalezeny v dopravních letadlech, která byla využívána pro lety Moskva-Londýn. Nejprve se objevila tři kontaminovaná letadla. Později však byly, vzhledem k velkému strachu veřejnosti prozkoumány další stovky letadel. British Airways později zveřejnila seznam s 221 lety kontaminovaných letadel zahrnující 33 000 cestujících. Všem potenciálně zasaženým se doporučilo kontaktovat Ministerstvo zdravotnictví.²³

1. 4. 5 Proč právě Polonium-210

Když pomineme velice složitou cestu k získání dostatečného množství Polonia k vyvolání smrtelných účinků, je tato látka prakticky dokonalý nástroj smrti. Mnoho odborníků se shoduje, že ať už Litviněnka otrávil kdokoli, jed si vybral dokonale. Co se týká poměru množství k účinku, těžko bychom hledali konkurenci. Detekce v běžných případech je prakticky nemožná. Avšak v případě konkrétního podezření detekovat lze. Pravděpodobně největší chybu, kterou Litviněnkův vrah udělal, bylo nezodpovědné

²³ Alexander Litvinenko poisoning. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 4. 12. 2006, last modified on 18. 3. 2011 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Alexander_Litvinenko_poisoning>.

zacházení a způsob přechovávání Polonia. Neuvedl si, jaké znečištění může způsobit pouhé pootevření lahvičky s Poloniem. Bývalý agent KGB Oleg Gordievsky, který také emigroval do Británie, prohlásil, že vrahové neměli tušení o stopách, které za sebou Polonium zanechává a už vůbec, že existuje technologie na jejich odhalení. Většina odborníků napříč celým světem se shoduje, že volba Polonia jako prostředku vraždy Litviněnka byla geniální. Také z důvodu pomalejšího nástupu smrtících účinků měli pachatelé dostatek času zmizet. Existují však názory, které tvrdí, že pomalý proces otravy byl zvolen záměrně z důvodu trýznění oběti. Závěrem lze říci, že volba pro Polonium byla správná. Neboť otrava byla provedena úspěšně a pachatel nebyl nikdy dopaden. Zůstává jen otázka, jak a kde pachatel Polonium získal.²⁴

1. 4. 6 Riziko pro veřejnost

Vyšetřování poloniových stop později odhalilo řadu kontaminovaných lokalit, včetně částí několika hotelů, restaurací, kanceláří a dopravy. Bylo nutné zahájit rozsáhlý program sledování potenciálně ohrožených osob. Nalézt se musely osoby, které byly v kontaktu s Litviněnkem, nebo které se nacházely na nějakém z kontaminovaných míst. Jako metoda vyšetření bylo zvoleno měření úrovně Polonia-210 v moči. Health Protection Agency (agentura pro ochranu zdraví) stanovila limit ve výši 30 mBq/d. Bylo vyšetřeno 753 lidí, z toho 500 za první měsíc. Z nich 139 bylo nad limit. U 36 vzorků se dávky pohybovaly v rozmezí 1 až 6 mSv. U 17 více než 6 mSv, přičemž nejvyšší byl kolem 100mSv. Mnoho z hostů hotelu Millenium bylo ze zahraničí, celkově bylo zjištěno až 664 osob z 52 zemí. Ze 176 získaných zahraničních vzorků se objevilo 13 nad limit. Z nich 8 obdrželo dávku méně než 1 mSv a zbylých 5 v rozmezí 1 až 6 mSv.²⁵

²⁴ *Slate.com* [online]. 2007 [cit. 2011-03-20]. Who killed Alexander Litvinenko. Dostupné z WWW: <<http://www.slate.com/id/2167972/entry/2167974/>>.

²⁵ BAILEY, M. R., et al. *Individual Monitoring Conducted by the Health Protection Agency in the London Polonium-210 Incident* [online]. London : AHealth Protection Agency, 2007 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z WWW: <http://www.hpa.org.uk/web/HPAwebFile/HPAweb_C/1274089667322>.

1. 4. 7 Průběh nemoci

1. listopadu byl Litviněnko otráven. 3. listopadu byl přijat do nemocnice Barnet General Hospital a později, 17. listopadu byl převezen do University College Hospital. 19. listopadu lékaři oznámili podezření na otravu thalliem. 23. listopadu po 21. hodině Litviněnko zemřel. Až den po jeho smrti byla zjištěna skutečná příčina náhlého onemocnění. Health Protection Agency oznámila, že v Litviněnkově těle je množství radioaktivního Polonia-210, které odpovídá několikanásobku smrtelné dávky. Jako střední smrtelná dávka pro dospělého člověka se uvádí 1 mikrogram Polonia-210. Následná měření a výpočty odhalily, že koncentrace v těle Litviněnka odpovídá podání asi 10 mikrogramů. Od otrávení do smrti uplynulo 23 dní. I když by lékaři přišli na Polonium-210 z počátku nemoci, s největší pravděpodobností by nebyli schopni smrt odvrátit. Účinná léčba proti vnitřnímu ozáření totiž neexistuje. Průběh nemoci byl velmi nepříjemný z důvodu silných bolestí a krvácení do GI traktu. Jediné co mohli lékaři dělat, bylo tyto bolesti tlumit.²⁶

²⁶ Alexander Litvinenko poisoning. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 4. 12. 2006, last modified on 18. 3. 2011 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Alexander_Litvinenko_poisoning>.

2. CÍLE PRÁCE A HYPOTÉZA

Hlavním úkolem této práce je získat co nejvíce dostupných informací o problematice radioizotopu Polonia-210 a následně je zpracovat do logického celku.

Jako hlavní byly stanoveny následující cíle:

1. Zpracovat bývalé i současné mírové a teroristické použití Po-210.
2. Zhodnotit možnost užití radioizotopu Polonia-210 jako nástroje teroristů.
3. Zjistit a zhodnotit dostupnost Po-210 pro teroristické skupiny.

Na počátku zpracovávání této práce byla stanovena základní hypotéza:

„Je možné izolovat dostatek Polonia-210 k ohrožení života z komerčně dostupných zdrojů.“

3. METODIKA ZPRACOVÁNÍ

Stěžejní metodikou tvorby této bakalářské práce je zpracování literární rešerše na základě dostupných informací z odborné literatury, příspěvků z odborných časopisů a publikací vědeckých ústavů. Jako převažující zdroj zpracovávaných informací je zde jednoznačně internetová síť. Sběr informací touto cestou jsem zvolil zejména proto, že v české literatuře není zatím této tématice věnována dostatečná pozornost. Ani na internetové síti se v českém jazyce nenachází dostatek informací k vytvoření potřebného náhledu na problematiku Polonia-210. Zcela převažujícím zdrojem jsou tedy zahraniční internetové stránky a publikace jednotlivých vědeckých pracovníků nebo vědeckých ústavů. Veškeré informace načerpané z internetové sítě jsem se snažil vybírat zodpovědně a s maximálním ohledem na důvěryhodnost zdroje. Výsledná práce by tedy měla obsahovat pouze pravdivé a platné informace.

4. VÝSLEDKY

Po zpracování kapitoly č. I. - Současný stav jsem se na základě dostupných informací pokusil zhodnotit dostupnost Polonia-210 pro teroristické skupiny.

4. 1. Možné zdroje Polonia-210

Způsoby jak získat Po-210 jsou celkem tři. Jednak je možné izolovat Po-210 z uranové rudy. Tento způsob je však velmi neefektivní a můžeme ho proto vyloučit. Dalším možným způsobem je ozařováním Bismuthu-209 neutrony. Toho lze docílit pouze v jaderném reaktoru. A třetím způsobem je izolovat Po-210 z některého komerčního produktu s jeho obsahem. Tento způsob je také velmi složitý, ale není možné ho zcela vyloučit.

4. 1. 1 Dostupnost Po-210 z reaktoru

97 procent veškeré světové výroby Po-210 se odehrává v Rusku v reaktoru Ozersk typu LWGR (Light-Water-cooled Graphite-moderated Reactor), který se nachází asi 700 km jihovýchodně od Moskvy u řeky Volhy. Ročně se zde vyrobí kolem 85 gramů čistého Polonia-210. Veškeré vyrobené množství pak putuje prostřednictvím jednoho autorizovaného dodavatele do americké společnosti. Veškerý pohyb je řízen striktními předpisy. Při vyšetřování původu Po-210 k otravě Litviněnka Ruská strana odmítla jakékoli pochybení. Reaktorů, v kterých je možné Po-210 vyrobit je na světě mnoho. Všechny tyto reaktory jsou však ve vlastnictví státu, případně se nacházejí na půdách vysokých škol a spadají pod nejpřísnější pravidla. Jakákoliv operace s takovým reaktorem vyžaduje souhlas mnoha lidí. Případná „černá“ výroba Po-210 je tedy velice nepravděpodobná. V případě, že by se někomu podařilo nelegálně Po-210 vyrobit dříve či později by tato skutečnost vyšla na povrch.

Odcizení části Po-210 teroristy při převozu je vzhledem k malému převáženému množství (řádově gramy) a přísným předpisům technicky krajně nepravděpodobné. Vzhledem k tomu, že se nikde na světě nepřihlásila žádná organizace, které by se Po-

Po-210 ztratilo je zřejmé, že výroba nebo zisk Po-210 určeného pro otravu Litviněnka, musela být zastřešena státem. Na tom se shoduje i většina odborníků.

Dále mnoho odborníků tvrdí, že Britské vyšetřovací služby nakonec odhalily skutečné místo původu Po-210. Ze vzorků, kterých se na místě vraždy Litviněnka našlo mnoho, je totiž možné zjistit poměrně přesný čas výroby. Toho lze dosáhnout měřením poměru obsahu stabilního Pb-206 a ještě nepřeměněného Po-210. Odborníci také uvádí, že podle analýzy nečistot vzorku lze určit i reaktor původu. Tato teorie má mezi vědeckou společností široké zastoupení. A je velice pravděpodobné, že Britské vyšetřovací služby toto skutečně odhalily. Pravděpodobně z diplomatických důvodů nebyly tyto informace nikdy zveřejněny.²⁷

4. 1. 2 Izolace z produktů s obsahem Po-210

Více než 95 procent celé světové produkce Po-210 je spotřebováno jedinou americkou společností, která se zabývá výrobou štětců pro eliminaci statického náboje (viz kapitola č. 2). Zbýlých pět procent je využíváno ve výzkumu a rovněž americkou společností, která se zabývá prodejem vědeckého vybavení pro střední a vysoké školy.

Štětce pro eliminaci statického náboje se zdají být jednoznačně nejlépe dostupným zdrojem Po-210 pro kohokoli na světě. Jejich výrobou se od roku 1969 zabývá firma NRD Staticmaster sídlící v New Yorku. Vyráběny jsou dva typy štětců. První je široký asi 7,5 cm a má aktivitu 18,5 MBq Druhý má šířku 2,5 cm a aktivitu 7,4 MBq. Za smrtelnou dávku je označováno asi 185 MBq při ingesci. K otravě je tedy potřeba izolovat Po-210 minimálně z deseti 7,5 cm štětců. Vzhledem k tomu, že aktivita Po-210 poklesne za 138 dní o polovinu, nabízí společnost do těchto štětců vyměnitelné náplně (obrázky č. 5. a 6.). Cena těchto náplní je 60 dolarů za náplň s aktivitou 7,4 MBq a 90 dolarů s aktivitou 18,5 MBq. Budeme-li tedy předpokládat, že

²⁷ Alexander Litvinenko poisoning. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 4. 12. 2006, last modified on 18. 3. 2011 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Alexander_Litvinenko_poisoning>.

Health Physics Society News. In *Polonium-210 information sheet* [online], Květen 2010 [cit. 2011-03-19]. Dostupné z WWW: <<http://www.hps.org/documents/po210factsheet.pdf>>.

se nám podaří izolovat sto procent Po-210, smrtelnou dávku získáme již za 900 dolarů.²⁸

Obrázek č. 4. Antistatické štětce. Nalevo s aktivitou 18,5 MBq. Napravo s aktivitou 7,4 MBq.



Obrázek č. 5. Vyměnitelná náplň pro štětec 7,4 MBq, obsahující jeden zlatý plátek.



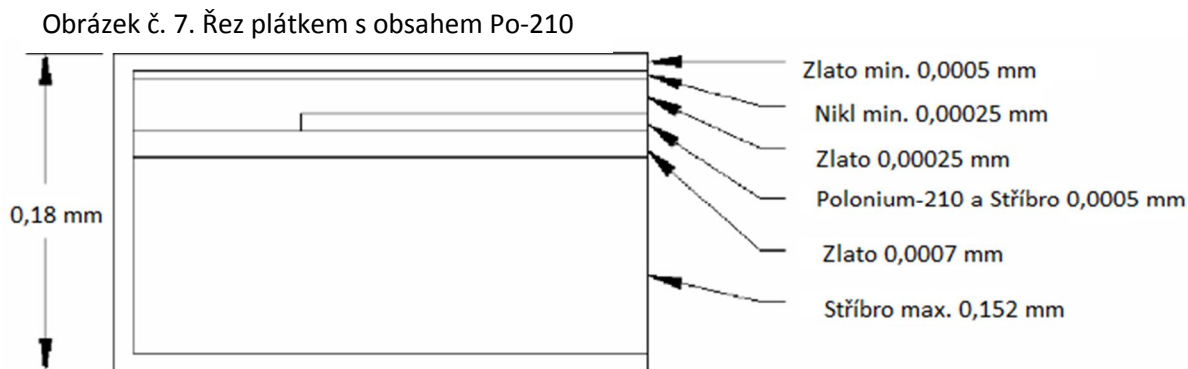
²⁸ Nrdstaticcontrol.com [online]. 2008 [cit. 2011-03-20]. NRD Static Control Ionizers. Dostupné z WWW: <<http://www.nrdstaticcontrol.com/>>.

Company Seven [online]. c2004 [cit. 2011-03-19]. Staticmaster Cleaning and Ionizing Brush. Dostupné z WWW: <<http://www.company7.com/staticmaster/products/staticmaster.html>>.

Obrázek č. 6. Vyměnitelná náplň pro štětec
18,5 MBq, obsahující dva zlaté plátky.



Při bližším pohledu na obrázky č. 5 a 6 si můžeme všimnout, že uvnitř náplní jsou „zlaté“ plátky. Právě tyto plátky jsou zdrojem antistatického účinku celého štětce a jsou také jedinými částmi s obsahem Po-210. Rozměry těchto plátek jsou cca 20 mm na 6 mm. Tloušťka je pouhých 0,18 mm. Polonium-210 je zde z důvodu bezpečnosti obaleno několika vrstvami jiných kovů (obrázek č. 7). Výrobce těchto plátek se zaručuje stoprocentní zárukou bezpečnosti při jakémkoli kontaktu s člověkem včetně požití. Při srovnání s jinými běžnými výrobky v domácnostech patří tedy tyto štětce mezi naprosto bezrizikové.²⁹



Zůstává jen otázka, zda by bylo možné plátek například „rozdrtit“. Získaná drť by pak teoreticky mohla mít život ohrožující účinky v případě požití. Odborníci se shodují na tom, že způsob jak izolovat čisté Po-210 z takového plátku existuje.

²⁹ *Nrdstaticcontrol.com* [online]. 2008 [cit. 2011-03-20]. NRD Alpha Ionization: Innovative Solutions for Static Control. Dostupné z WWW: <<http://www.nrdstaticcontrol.com/NRDAlphonization.html>>.

Vzhledem k tomu, že množství Po-210 je zde velice málo (na jeden plátek je udávána aktivita 7,4 - 9,25 MBq což odpovídá hmotnosti 50 ng čistého Po-210) vyžaduje si celý způsob nejmodernější analytické a separační metody na velice drahých přístrojích a i tak není výsledek zaručen [Peter D. Zimmerman]. Přístrojů, s kterými by bylo teoreticky možné Po-210 izolovat je pouze několik na světě a přístup k nim podléhá přísným pravidlům. Podle oficiální publikace vydané USNRC United States Nuclear Regulatory Commission je izolace Po-210 z těchto plátek nemožná.

Existují i další produkty k eliminaci statického náboje s obsahem Po-210. Během poslední doby se mezi výrobky firmy NRD Staticmaster objevily „antistatické rozprašovače“ určené k odstranění statického náboje ze vzduchu do vzdálenosti několika desítek cm až jednoho metru. Tato funkce je založena na proudění vzduchu přes ionizující jednotku s obsahem Po-210. Vzduch je v ionizující jednotce obohacen o určité ionty, které pak po kontaktu s okolním vzduchem napomáhají neutralizaci statického náboje. Náplně s obsahem Po-210 můžeme vidět na obrázku č 8 a 9. Využití nachází tyto „rozprašovače“ stejně jako antistatické štětce zejména ve fotografickém a elektrotechnickém průmyslu. Mezi další produkty patří i tzv. bodové ionizátory (obrázek č. 10), které mají za úkol eliminovat statický náboj do vzdálenosti několika cm. Díky svým malým rozměrům (30mm v průměru, 9mm šířka) je možné je umístit do hůře přístupných míst, například uvnitř elektrických zařízení pro zpracovávání fotografií nebo v optice. Takto mohou eliminovat statický náboj v zařízení delší dobu.

Obrázek č. 9. Náplň do antistatického „rozprašovače“ o aktivitě 1480 MBq.



Obrázek č. 8. Náplň do antistatického „rozprašovače“ o aktivitě 370 MBq.



Obrázek č. 10. Bodový ionizátor o aktivitě 185 MBq.



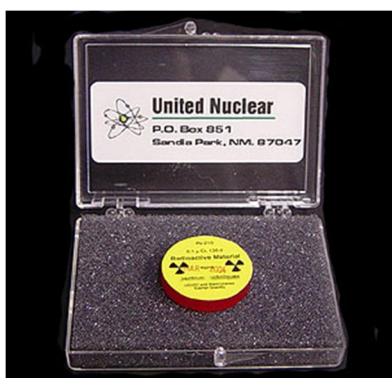
Všechny tyto produkty mají podstatně vyšší obsah Po-210 než antistatické štětce. Produkt na obrázku č. 9 dokonce 1480 MBq což odpovídá osminásobku smrtelné dávky. Díky vyšší aktivitě také podléhají přísnějším pravidlům a některé je možné si pouze pronajmout na určitou dobu. Společnost uvádí, že Po-210 je zde opět uchováváno ve vrstvách vzácných kovů, takže riziko pro člověka je nulové. Separace Po-210 je zde stejná jako u antistatických štětců, velice složitá a za použití nejmodernějšího vědeckého vybavení.³⁰

Jak již bylo zmíněno, výrobky pro eliminaci statického náboje zastupují 95 procent veškeré produkce Po-210. Zbylých 5 procent je spotřebováváno firmou United Nuclear zabývající se prodejem vědeckého vybavení. U této firmy je možné si objednat zdroje alfa, beta i gama záření pro laboratorní pokusy. Jako zástupce alfa záření je zde právě Polonium-210. Hned po otravě Litviněnka bylo publikováno několik článků odkazujících na snadnou dostupnost Po-210 na internetu. Tyto články vzbudily mezi lidmi částečnou paniku, později se však ukázalo, že vše byla jen médii nafouknutá bublina. Aktivita prodáváného Po-210 byla totiž 3,7 KBq, což odpovídá jedné padesátitisícině smrtelné dávky. Vzhledem k tomu, že jeden vzorek Po-210 stojí 79 dolarů, vrah by musel zakoupit množství vzorků téměř za 4 miliony dolarů. Firma United Nuclear uvádí, že ročně se průměrně prodá kolem deseti takových vzorků. Na internetových stránkách je možno zakoupit celkem dva vzorky. Jednak poloniovou „jehlu“ (obrázek

³⁰ *Nrdstaticcontrol.com* [online]. 2008 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z WWW: <<http://www.nrdstaticcontrol.com/>>

č. 12.) s aktivitou 0,37 KBq určenou pro laboratorní pokusy. A Dále poloniový disk (obrázek č. 11) s aktivitou 3,7 KBq určený také pro pokusy a dále pro kalibraci měřicích přístrojů.³¹

Obrázek č. 11. Poloniový disk.
Aktivita 3,7 KBq.



Obrázek č. 12. Poloniová jehla. Aktivita 0,37 KBq.



³¹ *Unitednuclear.com* [online]. 2011 [cit. 2011-03-20]. Individual Isotope Disk Source Alpha. Dostupné z WWW: <http://unitednuclear.com/index.php?main_page=product_info&cPath=2_5&products_id=470>.

Unitednuclear.com [online]. 2011 [cit. 2011-03-20]. Polonium-210 Needle Source. Dostupné z WWW: <http://unitednuclear.com/index.php?main_page=product_info&cPath=2_5&products_id=715>.

Polonium. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 25. 10. 2010, last modified on 19.3.2011 [cit. 2011-03-19]. Dostupné z WWW: <<http://en.wikipedia.org/wiki/Polonium>>.

5. DISKUZE

5. 1 Možnosti užití Polonia-210 jako nástroje teroristů

V historii se objevuje několik případů užití radioaktivních prvků jako prostředků teroristických útoků. Největší hrozba nastává v případě, že se teroristické skupině podaří získat jadernou zbraň. Pomineme-li tuto možnost, přichází v úvahu kontaminace určitého prostředí za cílem otrávit zde žijící obyvatelstvo. Způsobů, jak prostředí kontaminovat je více. Je zde možnost znečištění pitné vody nebo vodních toků a dále znečištění ovzduší některým disperzním zařízením. Mezi takové zařízení patří například „špinavá bomba“ neboli radiačně disperzní zařízení (RDD - radiological dispersal device). Principem je rozptýlení radioaktivního prvku do ovzduší pomocí klasické výbušniny. Tento způsob zamoření radioaktivní látkou vyvolal v nedávné době strach veřejnosti. Následně se několik vědeckých skupin z USA pokusilo o vytvoření takové zbraně. Došli však k závěru, že rozsah rozšíření radiace je mizivý. Pro teroristické skupiny je v tomto případě efektivnější použití chemických popřípadě biologických zbraní. Největší hrozbou špinavé bomby je psychologický efekt, vyvolaný u neinformované veřejnosti. Polonium-210 se tedy v případě teroristického útoku jeví jako nevýhodné. Dostupnost množství, které by bylo potřebné k efektivnímu rozptýlu do prostředí, je prakticky nulová. Připustíme-li vůbec možnost zisku Po-210 teroristickou skupinou pak toto množství pravděpodobně nebude přesahovat smrtelnou dávku pro jednotlivce. Reálnou hrozbu pro veřejnost může Polonium-210 představovat pouze jako zbraň ve vlastnictví státu.³²

³² ACTON, James M.; RODGERS, Brooke; ZIMMERMAN, Peter D. Beyond the Dirty Bomb: Re-thinking Radiological Terror. In [online]. King's College London : [s.n.], 2007 [cit. 2011-04-28]. Dostupné z WWW: <<http://www.kcl.ac.uk/content/1/c6/02/78/41/49-310Zimmerman.pdf>>.

5. 2 Problémy při tvorbě této bakalářské práce

Jedním z největších problémů při psaní této práce byl nedostatek zdrojů v českém jazyce. V ČR není tomuto problému věnována příliš velká pozornost. Zdroje, které by bylo možné využít při psaní kvalifikační práce na toto téma, nejsou v češtině skoro žádné. V psané podobě se mi nepodařilo získat žádný zdroj, který by se podrobněji zabýval problematikou Po-210. V elektronické podobě jsou na internetové síti dostupné články týkající se zejména případu otravy Alexandra Litviněnka. Tyto články jsou však z velké většiny psány médii a udávané informace jsou často mylné nebo záměrně nepřesné. Bylo tedy nutné čerpat ze zahraničních zdrojů v elektronické podobě a to zejména z USA a Velké Británie, kde je Po-210 věnována daleko větší pozornost. Na internetové síti jsou zdroje informací nejčastěji v anglickém jazyce v dostačujícím množství. Kromě mediálních článků se jedná zejména o ročenky a publikace vědeckých institutů, popřípadě články jednotlivých odborníků. Bylo tedy možné získat ověřené a pravdivé informace nebo alespoň získané informace srovnávat s odbornými články.

Dalším problémem při získávání informací byla často nepřesnost určitých údajů napříč různými publikacemi a články. Jednalo se zejména o číselné hodnoty. Pro upřesnění, například většina vědeckých publikací udává faktor vstřebávání Po-210 z GI traktu do krve 0,1 (viz kapitola č 3.4). Jsou však i některé publikace [ICRP 2006], které udávají faktor 0,5. Tyto publikace jsou však zaměřeny na zkoumání dlouhodobých stochastických účinků, zatímco faktor 0,1 je udáván při akutní otravě. Dále různé publikace [HARRISON, John, et al. *Polonium-210 as a poison*], [R. SCOTT, Bobby. *Health risk evaluations for ingestion exposure of humans to Polonium-210*] udávají lehce odchylné hodnoty u retence Po-210 v orgánech. Tyto hodnoty se však neliší příliš výrazně a vzhledem k tomu, že empiricky byla retence Po-210 zkoumána pouze u zvířat a hodnoty u člověka jsou pouze odhadem na základě výpočtu, nepřisuzuji tomuto problému nejvyšší váhu.

Největším problémem, zapříčiněným různými údaji v různých publikacích, byla při psaní této práce nejednotnost výše letální dávky pro usmrcení jednoho člověka.

Napříč publikacemi se tato hodnota lišila až o dva řády. Nejčastěji byla udávána hodnota mezi 0,8 – 1 μg (150 – 180 MBq) při ingesci pro usmrcení dospělého muže. Možné je však nalézt i hodnotu 80 ng (15 MBq) a v jedné publikaci [HARRISON, John, et al. *Polonium-210 as a poison*] dokonce i 5 – 15 μg (1 – 3 GBq). Různorodost těchto hodnot zapříčiňuje zejména rozdíl mezi „minimální“ smrtelnou dávkou, která způsobí smrt např. za 500 dní v důsledku poškození ledvin nebo rakovinného bujení a dávkou, která způsobí smrt za 20 dní, jako tomu bylo u Litviněnka. Po ingesci většího množství Po-210 je totiž vyvolána akutní nemoc z ozáření a člověk umírá po 22 dnech v důsledku poškození kostní dřeně. Dále je třeba říci, že v historii nebyla možnost pozorovat účinky Po-210 na lidech a testy průběhu intoxikace probíhaly pouze u zvířat. K akutní otravě u člověka došlo pouze jednou a to v případě A. Litviněnka. Veškeré hodnoty jsou tedy udávány na základě výpočtů a předpokladů a empiricky nebyly nikdy potvrzeny.

6. ZÁVĚR

Vzhledem k stále častějším teroristickým útokům je veřejnost nucena provádět preventivní opatření k zamezení takových útoků popřípadě k minimalizování jejich následků. Jednou z preventivních činností je i průzkum a zhodnocení některých nebezpečných látek, které by se mohli dostat do rukou teroristů. Takovou látkou může být i Po-210. Zejména z tohoto důvodu byla na začátku zpracování této práce stanovena hypotéza: „Je možné izolovat dostatek Polonia-210 k ohrožení života z komerčně dostupných zdrojů.“

Tato hypotéza byla později vyvrácena. Dávka Po-210 se smrtelnými účinky se pro běžného člověka pohybuje zhruba okolo 1 mikrogramu [R. SCOTT 2007]. V případě použití Po-210 k ohrožení života je tedy nutné izolovat minimálně 1 µg. Jediné komerčně dostupné zdroje s „dostatečným“ obsahem Po-210 jsou produkty pro eliminaci statického náboje (kapitola 5.1). Těchto produktů je několik druhů. Nejširší veřejnosti jsou dostupné antistatické štětce s nízkým obsahem Po-210, asi 18 MBq (110 ng). Produkty s vyšším obsahem Po-210, jako jsou antistatické rozprašovače s aktivitou až 1500 MBq (9 µg) jsou určeny do pronájmu a to pouze po předložení licence. Ve všech těchto produktech je Po-210 společně s několika vrstvami vzácných kovů a pro člověka nevzniká žádné nebezpečí. Izolovat samotné Po-210 je téměř nemožné. Bylo by zapotřebí velice drahých a moderních chemických přístrojů a i tak by byl tento proces velice složitý a výsledek by nebyl zajištěn. Z těchto důvodů byla stanovená hypotéza vyvrácena. Z komerčně dostupných produktů tedy není možné získat dostatek Po-210 k ohrožení života.

Potenciální hrozbu může Polonium-210 představovat v rukách státu například při možném válečném konfliktu nebo jako tomu pravděpodobně bylo v případě A. Litviněnka. I tak se však Po-210 jeví jako nevhodná zbraň, neboť jeho výroba si vyžaduje vysoké náklady. Z ekonomických důvodů je v takovém případě vhodnější využít zbraně chemické nebo biologické.

Z hlediska ochrany obyvatel lze tedy říci, že i přes svoji vysokou toxicitu Po-210 nepředstavuje hrozbu, se kterou je nutné se nadále podrobněji zabývat.

7. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

Odborná literatura, publikace vědeckých ústavů:

1. ACTON, James M.; RODGERS, Brooke; ZIMMERMAN, Peter D. Beyond the Dirty Bomb: Re-thinking Radiological Terror. In [online]. King's College London : [s.n.], 2007 [cit. 2011-04-28]. Dostupné z WWW: <<http://www.kcl.ac.uk/content/1/c6/02/78/41/49-310Zimmerman.pdf>>.
2. BAILEY, M. R., et al. *Individual Monitoring Conducted by the Health Protection Agency in the London Polonium-210 Incident* [online]. London: Health Protection Agency, 2007 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z WWW: <http://www.hpa.org.uk/web/HPAwebFile/HPAweb_C/1274089667322>.
3. HARRISON, John, et al. *Polonium-210 as a poison* [online]. UK : IOP Publishing, 2007 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z WWW: <<http://dspace.lrii.org:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/701/Polonium-210%20as%20a%20poison.pdf?sequence=1>>.
4. Health Physics Society News. In *Polonium-210 information sheet* [online], Květen 2010 [cit. 2011-03-19]. Dostupné z WWW: <<http://www.hps.org/documents/po210factsheet.pdf>>.
5. KLENER, Vladislav, et al. *Principy a praxe radiační ochrany*. Praha: Státní úřad pro jadernou bezpečnost, 2000. 520 s. ISBN 80-238-3703-6
6. Kolektiv pracovníků SÚRO Praha. *Několik poznámek k problematice ozáření Po-210* [online]. Praha: SÚRO Praha, Prosinec 2006 [cit. 2011-03-19]. Dostupné z WWW: <http://www.suro.cz/cz/publikace/novinky/Nekolik_poznamek_k_problematice_ozareni_poloniem_210.pdf>.
7. ROESSLER, Gen. Health Physics News. In *Why Po-210?* [online], Únor 2007 [cit. 2011-03-19]. Dostupné z WWW: <http://www.hps.org/documents/polonium_210_story.pdf>.
8. ROSINA Jozef; KOLÁŘOVÁ Hana; STANEK Jiří. *Biofyzika pro studenty zdravotnických oborů*. 1. vydání. Grada Publishing. Praha. 2006. 232 s. ISBN 80-247-1383-7

9. R. SCOTT, Bobby . *Health risk evaluations for ingestion exposure of humans to Polonium-210*. In [online]. University of Massachusetts : [s.n.], 2007 [cit. 2011-04-23]. Dostupné z WWW:
<<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2477690/>>.

Internetové zdroje:

10. Alexander Litvinenko. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 19. 11. 2006, last modified on 24. 1. 2011 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z WWW:
<http://en.wikipedia.org/wiki/Alexander_Litvinenko>
11. Alexander Litvinenko assassination theories. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 3. 4. 2008, last modified on 29. 12. 2010 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z WWW:
<http://en.wikipedia.org/wiki/Alexander_Litvinenko_assassination_theories>.
12. Alexander Litvinenko poisoning. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 4. 12. 2006, last modified on 18. 3. 2011 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z WWW:
<http://en.wikipedia.org/wiki/Alexander_Litvinenko_poisoning>.
13. *Company Seven* [online]. c2004 [cit. 2011-03-19]. Staticmaster Cleaning and Ionizing Brush. Dostupné z WWW:
<<http://www.company7.com/staticmaster/products/staticmaster.html>>.
14. Median lethal dose. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 13. 2. 2010, last modified on 16. 3. 2011 [cit. 2011-03-19]. Dostupné z WWW:
<http://en.wikipedia.org/wiki/Median_lethal_dose>.
15. Modulated neutron initiator. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 22. 11. 2007, last modified on 6. 2. 2011 [cit. 2011-03-19]. Dostupné z WWW:
<http://en.wikipedia.org/wiki/Modulated_neutron_initiator>.

16. Neutron source. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 18. 2. 2007, last modified on 25. 11. 2010 [cit. 2011-03-19]. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Neutron_source>.
17. *Nrdstaticcontrol.com* [online]. 2008 [cit. 2011-03-20]. NRD Alpha Ionization: Innovative Solutions for Static Control. Dostupné z WWW: <<http://www.nrdstaticcontrol.com/NRDAlphaIonization.html>>.
18. *Nrdstaticcontrol.com* [online]. 2008 [cit. 2011-03-20]. NRD Static Control Ionizers. Dostupné z WWW: <<http://www.nrdstaticcontrol.com/>>.
19. Polonium. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 25. 10. 2010, last modified on 19.3.2011 [cit. 2011-03-19]. Dostupné z WWW: <<http://en.wikipedia.org/wiki/Polonium>>.
20. Radioisotope thermoelectric generator. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 10.10. 2010, last modified on 17. 3. 2011 [cit. 2011-03-19]. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Radioisotope_thermoelectric_generator>.
21. *Slate.com* [online]. 2007 [cit. 2011-03-20]. Who killed Alexander Litvinenko. Dostupné z WWW: <<http://www.slate.com/id/2167972/entry/2167974/>>.
22. *TheodoreGray.com* [online]. c2003 [cit. 2011-03-19]. Facts, pictures and stories about element Polonium. Dostupné z WWW: <<http://www.theodoregray.com/periodictable/Elements/084/index.s7.html>>.
23. *Unitednuclear.com* [online]. 2011 [cit. 2011-03-20]. Individual Isotope Disk Source Alpha. Dostupné z WWW:<http://unitednuclear.com/index.php?main_page=product_info&cPath=2_5&products_id=470>.
24. *Unitednuclear.com* [online]. 2011 [cit. 2011-03-20]. Polonium-210 Needle Source. Dostupné z WWW:<http://unitednuclear.com/index.php?main_page=product_info&cPath=2_5&products_id=715>.

8. KLÍČOVÁ SLOVA

Polonium-210; zdroje Po-210 ; případ Litviněnko; statické eliminátory (antistatické štětce);

Key words:

Polonium-210; Po-210 sources; Litvinenko case; static eliminators (antistatic brushes)

