

Ochrana obyvatelstva před účinky ionizujícího záření

Bc. Miloš Řehák

Diplomová práce
2009



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Institut bezpečnostních technologií
akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Miloš ŘEHÁK**
Studijní program: **N 2808 Chemie a technologie materiálů**
Studijní obor: **Řízení technologických rizik**

Téma práce: **Ochrana obyvatelstva před účinky ionizujícího záření**

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte literární rešerši na dané téma.
2. Získejte materiál pro experimenty.
3. Zpracujte a následně vyhodnoťte tyto experimenty.

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Vladimír Mrkvička, Ph.D.**

Ústav chemie

Datum zadání diplomové práce: **20. února 2009**

Termín odevzdání diplomové práce: **18. května 2009**

Ve Zlíně dne 9. března 2009



doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.
děkan



prof. PhDr. Vladimír Šefčík, CSc.
ředitel ústavu

OCHRANA OBYVATELSTVA PŘED ÚČINKY IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ

Abstrakt:

Tato diplomová práce je věnována zejména možnostem ochrany osob před účinky ionizujícího záření. Jsou zde popsány zdroje ionizujícího záření, druhy ionizujícího záření a interakce ionizujícího záření s hmotou. Dále je pozornost věnována samotným metodám ochrany osob před účinky ionizujícího záření. A to jak pracovníkům se zdroji ionizujícího záření, tak ozařovaným osobám například při diagnostickém nebo léčebném ozáření v medicíně. V závěru práce se zabývám měřením radiace, která je emitována z uhlí a uhelného prachu.

Klíčová slova: Zdroje ionizujícího záření, Principy ochrany před účinky ionizujícího záření, Radiační havárie, Ukrytí, Evakuace

PROTECT THE POPULATION AGAINST EFFECTS OF IONIZING RADIATION

Abstract:

This thesis is dedicated in particular the possibility to protect persons from the effects of ionizing radiation. There are described sources of ionizing radiation, sources of ionizing radiation and ionizing radiation interactions with matter. In addition, attention is drawn to the actual methods of protection of individuals against the effects of ionizing radiation. And as workers with sources of ionizing radiation and ozařovaným persons, for example, in diagnostic or therapeutic radiation in medicine. At the end of the work dealing with the measurement of radiation that is emitted from coal and coal dust.

Keywords: Sources of ionising radiation, Principles of protection against ionising radiation, Radiation accident, Concealment, Evacuation

Prohlašuji, že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků, je-li to uvedeno na základě licenční smlouvy, budu uveden jako spoluautor.

Ve Zlíně

.....
Podpis diplomanta

Poděkování: na tomto místě bych chtěl poděkovat své rodině za jejich podporu v době mého studia. Také bych chtěl poděkovat vedoucímu práce panu Ing. Vladimíru Mrkvičkovi, Ph.D. za trpělivost, energii a čas, který mi při realizaci této práce věnoval a také za cenné podněty a připomínky.

OBSAH

TEORETICKÁ ČÁST.....	8
1. Úvod	11
2. Ionizující záření.....	12
2.1 Co je to ionizující záření?	12
2.2 Zdroje ionizujícího záření	12
2.2.1 Umělé zdroje ionizujícího záření	12
2.2.2 Přírodní zdroje ionizujícího záření	14
2.3 Druhy ionizujícího záření	16
2.4 Interakce záření při průchodu hmotou	21
2.4.1 Interakce přímo ionizujícího záření (nabitých částic).....	21
2.4.2 Interakce nepřímo ionizujícího záření	23
2.5 Účinky ionizujícího záření.....	25
2.5.1 Fáze účinku ionizujícího záření na organismus.....	25
2.5.2 Závislost biologického účinku na dávce	26
2.6 Stínění ionizujícího záření	27
2.6.1 Stínění záření gama.....	28
2.6.2 Stínění záření beta.....	28
2.6.3 Stínění záření alfa	29
2.6.4 Stínění neutronového záření	29
2.7 Detekce ionizujícího záření	29
2.7.1 Základní jednotky pro měření radiace	30
2.7.2 Rozdělení detektorů podle principu detekce.....	30
2.7.3 Rozdělení detektorů podle komplexnosti měřené informace	31
3. Ochrana obyvatelstva před účinky ionizujícího záření.....	38
3.1 Historický vývoj ochrany obyvatelstva	38
3.2 Základní legislativa týkající se ochrany obyvatelstva	39
3.3 Základní možnosti ochrany před ionizujícím zářením	40
3.4 Radiační monitorování a osobní dozimetrie	42
3.5 Systém limitování dávek.....	43

4. Ochrana proti ionizujícímu záření v jednotlivých oblastech použití.....	45
4.1. Ochrana v radiodiagnostice	45
4.1.1 Ochrana pracovníků na oddělení radiodiagnostiky	46
4.1.2 Ochrana pacientů na oddělení radiodiagnostiky	48
4.2 Ochrana v nukleární medicíně	51
4.2.1 Ochrana pracovníků na oddělení nukleární medicíny	51
4.2.2 Ochrana pacientů na oddělení nukleární medicíny	52
4.3 Ochrana v radioterapii	54
4.3.1 Ochrana pracovníků na oddělení radioterapie	54
4.3.2 Ochrana pacientů na oddělení radioterapie.....	54
4.4 Ochrana před ionizujícím zářením v jaderných elektrárnách a jejich okolí	55
4.4.1 Ochrana pracovníků v jaderných elektrárnách	55
4.4.2 Ochrana obyvatel v okolí jaderných elektráren	56
4.5 Ochrana před ionizujícím zářením v průmyslové defektoskopii	57
4.6 Ochrana před ionizujícím zářením z radionuklidových měřidel	57
4.7 Ochrana proti ionizujícímu záření při těžbě a zpracování uranu	58
4.7.1 Ochrana pracovníků při těžbě a zpracování uranu.....	59
4.7.2 Ochrana obyvatel v okolí těžby a zpracování uranu.....	59
5. Ukrytí obyvatelstva před účinky ionizujícího záření při vzniku radiační havárie	60
5.1 Doporučení pro ochranu před ionizujícím zářením doma	60
5.2 Doporučení pro ochranu před ionizujícím zářením v zaměstnání	61
5.3 Doporučení pro ochranu před ionizujícím zářením venku	61
5.4 Co dělat při styku s radioaktivní látkou	61
5.5 Jak se chovat při nezbytném opuštění úkrytu	61
5.6 Jodová profylaxe.....	61
6. Evakuace obyvatelstva při vzniku radiační havárie.....	62
6.1 Příprava k evakuaci.....	62
6.2 Samo-evakuace	63
6.4 Doporučení po vyhlášení evakuace	63

PRAKTICKÁ ČÁST.....	63
7. Cíle práce a hypotézy.....	66
8. Metodika.....	67
9. Výsledky.....	68
9.1. Měření prašnosti	68
9.2. Chemická analýza uhlénoho prachu	70
9.3. Měření radiace	70
9.4. Stanovení obsahu stroncia	70
10. Diskuse.....	77
11. Závěr.....	79
12. Použitá literatura.....	80
13. Seznam obrázků.....	82
14. Seznam tabulek.....	83
15. Přílohy.....	84

I. TEORETICKÁ ČÁST

1. Úvod

Počátek využívání ionizujícího záření sahá do konce 19. století. Roku 1895 objevil německý fyzik Wilhelm Conrad Röntgen paprsky záření X. Toto ionizující záření bylo pojmenováno po svém objeviteli. Od této události se začalo ionizující záření hojně využívat a bylo provedeno mnoho nových objevů v této oblasti.

Ionizující záření se používá v mnoha oblastech lidského působení. Počínaje medicínou, ať léčbou nebo diagnostikou, přes využití v energetice, fyzice, průmyslu nebo v zemědělství.

Vývoj ovšem nezůstal jen u využití ionizujícího záření. Ruku v ruce se vyvíjela také radiační ochrana. Zdokonalily se prostředky určené pro ochranu jednotlivce, ať jde o pracovníky se zdroji ionizujícího záření nebo například o pacienty. S rostoucími znalostmi o vlastnostech ionizujícího záření dochází k rozvoji a úpravám legislativního rámce v oblasti ochrany před ionizujícím zářením. Zpřísnily se zákony a normy pro nakládání se zdroji ionizujícího záření. Vznikly organizace a kontrolní orgány, které se zabývají ochranou před ionizujícím zářením.

Někteří lidé mají stále z ionizujícího záření strach až fobii. Je to strach z něčeho, co nemohou postřehnout jakýmkoliv smyslem, ale co může být velice nebezpečné. Proto je velice důležité, aby lidé měli alespoň základní znalosti o tom co to vlastně ionizující záření je, jak působí na člověka a jaké jsou možnosti ochrany.

Ionizující záření může mít původ v mnoha zdrojích. Jedním z nich může být také uhelný prach, který způsobuje povrchovou a vnitřní kontaminaci. Tato problematika není příliš diskutována, a to zejména v místech výskytu zdrojů této noxy. To byl také jeden z důvodů, proč jsem si toto téma zvolil jako diplomovou práci.

2. Ionizující záření

2.1 Co je to ionizující záření?

Ionizujícím zářením nazýváme takové záření, jehož kvanta mají natolik vysokou energii, že jsou schopna vyrážet elektrony z atomového obalu a tím látku ionizovat. Je to tok hmotných částic nebo fotonů elektromagnetického záření, které mají schopnost ionizovat atomy prostředí nebo excitovat jejich jádra. Vzniká jako průvodní jev jaderných procesů při nichž se dostává atom do excitovaného stavu a stává se energeticky nestabilním, do stabilního stavu se dostane vyzářením ionizujícího záření. Tento proces je podstatou radioaktivní přeměny. Vlastnosti ionizujícího záření jsou určeny zdrojem, který toto záření emituje.

2.2 Zdroje ionizujícího záření

Zdroje ionizujícího záření můžeme rozdělit na dva druhy. Jsou to umělé zdroje ionizujícího záření a přírodní zdroje ionizujícího záření.

2.2.1 Umělé zdroje ionizujícího záření

Mezi tyto zdroje patří takové zdroje, které vytvořil člověk. Jsou to například umělé radionuklidy, urychlovače, rentgenky, jaderné reaktory.

Při přeměnách radionuklidů se uvolňuje ionizující záření různého druhu. Při přeměnách jádra atomů některých radionuklidů jsou emitovány částice α – heliová jádra sestávající ze dvou protonů a dvou neutronů. Částice β jsou emitovány při přeměnách protonů a neutronů v jádře a mají buď záporný náboj (elektrony) nebo kladný náboj (pozitrony). Zářiče β jsou například ^{32}P , ^{131}I , ^{90}Y , ^{89}Sr , a nacházejí uplatnění v léčbě nádorových a dalších onemocnění v nukleární medicíně. Záření γ , které má elektromagnetické vlastnosti, vzniká při přechodu nukleonů v atomovém jádře z vyšších energetických hladin na nižší. Zářiče γ jsou například ^{67}Ga , $^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{111}In . Tyto radionuklidy jsou používány jako otevřené zářiče k diagnostice v nukleární medicíně. Radionuklidy ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{192}Ir jsou také γ zářiče, avšak tyto se používají ve formě uzavřených zářičů v radioterapii.

Urychlovače můžeme rozdělit podle tvaru dráhy urychlované nabitě částice se na lineární a kruhové. Označení lineární urychlovač je podle toho, že elektrony jsou v něm urychlovány elektromagnetickou vlnou po přímkové dráze. K druhému druhu náleží betatron, v němž se elektrony urychlují po kruhové dráze uvnitř trubice prstencového tvaru. Dalším kruhovým urychlovačem je cyklotron, který slouží k získávání svazků nabitých částic o vysoké energii – protonů, deutronů. Vložení kovového terčíku do svazku nabitých částic urychlených v cyklotronu lze získat neutrony s vysokou energií. Urychlovače elektronů mohou sloužit také jako zdroje intenzivního brzdného rentgenového záření s energií podstatně vyšší než mohou poskytnout rentgenky.

Dalším příkladem umělého zdroje ionizujícího záření jsou jaderné reaktory v nichž probíhá řízené štěpení jader. Jsou mohutným zdrojem neutronů a záření gama. Podle toho, zda se jádra štěpí rychlými nebo tepelnými neutrony se jaderné reaktory nazývají rychlé nebo tepelné. Tyto druhé jsou ve světě nejrozšířenější zejména k výrobě elektrické energie v jaderných elektrárnách. Štěpným materiálem je především ^{238}U nebo ^{235}U a Pu. V principu při štěpení vznikají rychlé neutrony a ty je nutno pro štěpení dalšího jádra v těchto typech reaktorů zpomalit neboli zmoderovat. Podle použitého moderátoru zejména rozeznáváme reaktory lehkovodní, těžkovodní, grafitové. Lehkovodní reaktory, jako tlakové nebo varné, jsou v jaderných elektrárnách používány nejčastěji. V jaderných reaktorech, zejména výzkumných, se také vyrábějí radionuklidy pro použití v lékařství a dalších oborech.

Princip rentgenky je následující. V rentgence jsou emitovány elektrony z katody na kterou je přivedeno vysoké napětí. Tyto elektrony jsou urychlovány k terčíku na anodě. V tomto terčíku je dopadem elektronů buzeno elektromagnetické záření nazývané rentgenové. Rentgenové záření se dále dělí na záření brzdné a charakteristické. Brzdné rentgenovo záření vzniká při prudké změně rychlosti pohybu elektronu v elektromagnetickém poli atomů anody. Brzdné rentgenovo záření má spojité spektrum. Charakteristické rentgenovo záření je emitováno při přechodu elektronu v materiálu anody z excitovaného stavu na nižší energetickou hladinu – energie fotonu je rovna energetickému rozdílu mezi hladinami.

Spektrum charakteristického rentgenova záření je čárové (tvořeno liniemi). Rentgenky jsou jediným zdrojem záření pro radiodiagnostiku, ve kterých se využívá hlavně brzdného záření; jen mamografické vyšetření je založeno na charakteristickém záření.

2.2.2 Přírodní zdroje ionizujícího záření

K přírodním zdrojům ionizujícího záření náleží přírodní radionuklidy vyskytující se v přírodě a kosmické záření.

Přírodní radionuklidy se podle původu rozdělují do tří skupin: radionuklidy primordiální, kosmogenní a radionuklidy vznikající sekundárně z původních radionuklidů tvořících přeměnové řady.

Mezi primordiální radionuklidy patří například ^{40}K , ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th , ^{87}Rb . Tyto radionuklidy vznikly v raných stádiích vesmíru a díky velmi dlouhému poločasu přeměny, většímu než 108 let, se dosud vyskytují na Zemi v nezanedbatelném množství.

Druhou skupinu přírodních radionuklidů tvoří kosmogenní radionuklidy. Tyto vznikají průběžně v jaderných reakcích při interakci kosmického záření se stabilními prvky zejména ve vnějším obalu Země. Je to například ^{14}C , ^3H , ^7Be , ^{22}Na .

Z radionuklidů vznikajících v přeměnových řadách je nejvýznamnější ^{226}Ra (je v řadě počínající ^{238}U) a z něho vznikající plyn ^{222}Rn .

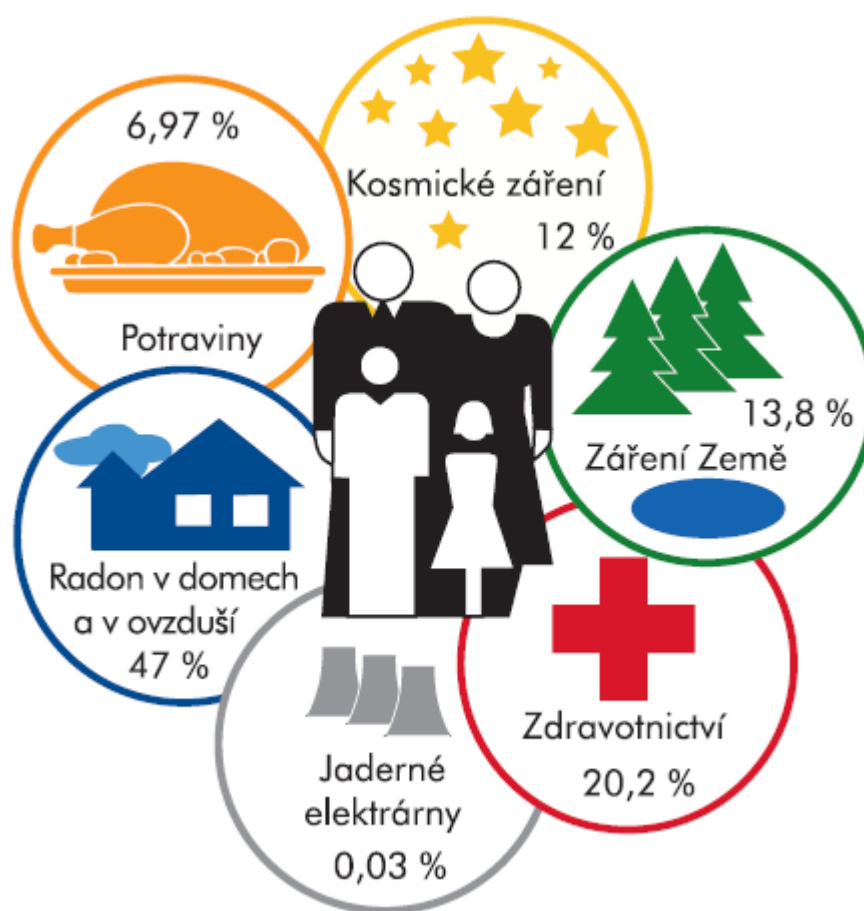
Dalším přírodním zdrojem ionizujícího záření je kosmické záření. Rozlišujeme tři složky kosmického záření: galaktické záření, sluneční záření a záření radiačních (van Allenových) pásů Země.

Galaktické kosmické záření pochází z hlubokých oblastí vesmíru a skládá se z protonů (85 %), jader helia (11 %), těžších jader prakticky všech prvků soustavy (1 %) a elektronů (3 %).

Sluneční kosmické záření pochází především ze slunečních erupcí. Je tvořeno z 99% protony, těžší nabitě částice představují méně než 0,1 % celkové fluence.

Radiační (van Allenovy) pásy jsou tvořeny protony a elektrony zachycenými magnetickým polem Země v určitých vzdálenostech od jejího povrchu; vnější pás je ve vzdálenosti 20 000 kilometrů, vnitřní ve vzdálenosti 3 000 kilometrů.

Po vstupu do atmosféry interagují částice kosmického záření s přítomnými atomy a molekulami. K zemskému povrchu pronikají hlavně částice vznikající interakcemi zejména primárních fotonů (sekundární složka kosmického záření). K dávkovému ekvivalentu člověka na zemském povrchu přispívají nejvíce muony, s rostoucí nadmořskou výškou roste příspěvek elektronů, ve vzdálenostech větších než desítky kilometrů nejvíce dominují protony. Na radiační zátěži člověka v obvyklých výškách letů letadel se podílí polovinou neutrony a polovinou nabitě částice.



Obr. 1. Příspěvky různých zdrojů k ozáření člověka. Celkem 2 - 3 mSv na obyvatele ročně.⁽¹⁷⁾

Tab. 1. Průměrná roční, celosvětová efektivní dávka v roce 2000 z přírodních a umělých zdrojů záření (mSv).⁽¹⁸⁾

Zdroje ozáření	Dávka (mSv)
Přírodní pozadí (celkově, všechny zdroje)	2,4
Inhalace (především radon)	1,2
Gamma záření z půdy	0,5
Kosmické záření	0,4
Lékařské vyšetření	0,4
Atmosferické jaderné testy	0,005
Ingesce	0,3
Havárie v Černobylu	0,002
Výroba v jaderných elektrárnách	0,002

2.3 Druhy ionizujícího záření

Ionizační účinky jsou společnou vlastností všech druhů ionizujícího záření. Konkrétní mechanismy interakce záření s hmotou jsou však pro každý druh záření specifické. Z tohoto hlediska se ionizující záření rozděluje na dvě skupiny.

✓ Záření přímo ionizující - je to záření, jehož kvanta nesou elektrický náboj a proto přímo vyřazují či vytrhávají elektrickými silami elektrony z atomů. Patří sem záření α , β^- a β^+ , protonové záření p^+ .

✓ Záření nepřímo ionizující - jeho kvanta nejsou elektricky nabitá; svou kinetickou energii předávají v látce nejprve nabitým částicím (většinou elektronům) a ty teprve přímými účinky na atomy látku ionizují. Do této skupiny patří především záření rentgenové a záření γ , dále též záření neutronové.

Ionizující záření můžeme dále dělit na korpuskulární a na vlnové.

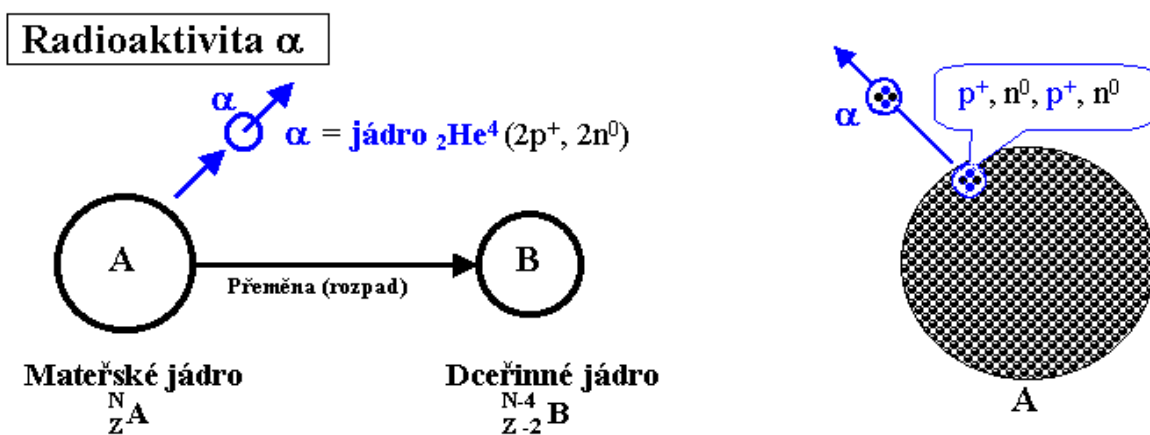
✓ Záření korpuskulární - kvanta tohoto záření mají nenulovou klidovou hmotnost. Jedná se o proud hmotných částic pohybujících se rychlostí menší než rychlost světla,

keré si zachovávají svou existenci i po zastavení pohybu. Patří sem záření α , β^- , β^+ , protonové záření p^+ , neutronové záření n^0 , neutrinové záření a řada dalších druhů záření vznikajícího při vysokoenergetických srážkách elementárních částic (m-mezonové a p-mezonové záření).

✓ Záření vlnové - kvanta tohoto záření nemají klidovou hmotnost. Jsou to kvanta vlnění, pohybující se rychlostí světla; pokud je zabrzdíme, odevzdají veškerou svou energii a zaniknou. Do této skupiny patří pouze elektromagnetické záření jehož kvanta jsou fotony.

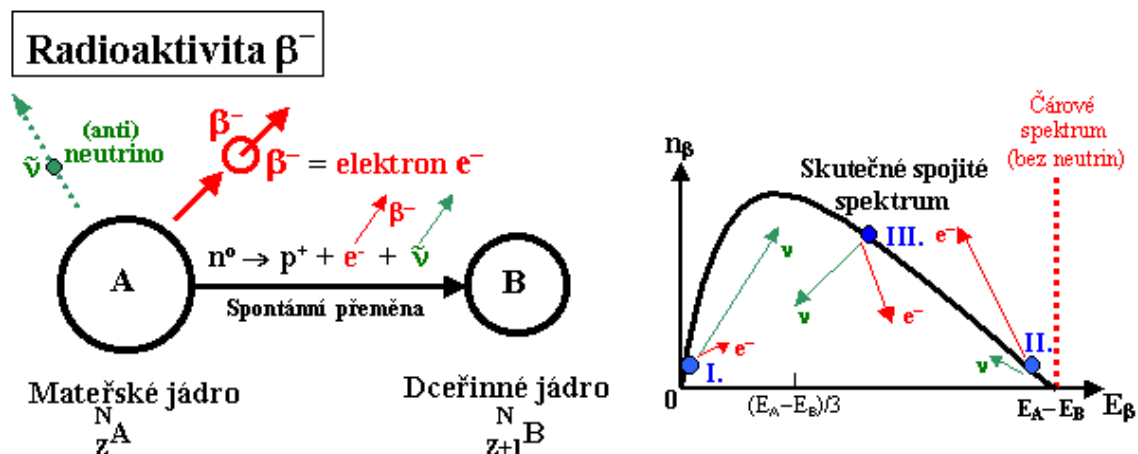
Další rozdělení ionizujícího záření může být na záření alfa, beta, gama, rentgenové záření a neutronové záření.

Záření α se můžeme pozorovat pouze u nejtěžších jader v oblasti uranu a transuranů. Při rozpadu je vyzařována částice α , což je jádro helia ${}^4\text{He}_2$. Tato těžká částice α se dvěma kladnými elementárními náboji silně ionizuje látku. Tím se ale rychle brzdí a má proto v látkovém prostředí velmi krátký dolet. Díky této své malé pronikavosti jej nelze využít k diagnostice ani k terapii. Využívá se jen sporadicky v některých detekčních přístrojích. Částice alfa mají čárové spektrum.



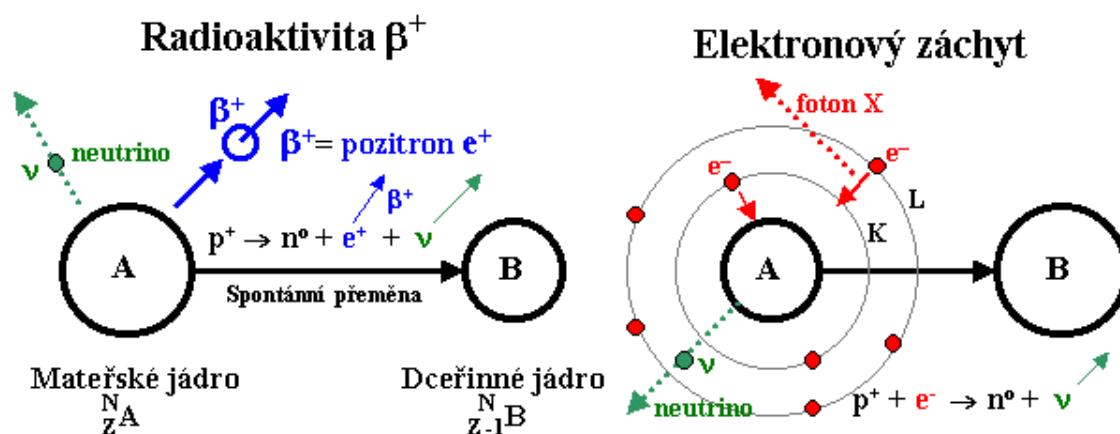
Obr. 2. Základní schéma radioaktivity α .⁽¹⁴⁾

Záření β je nejčastější druh záření. Toto záření můžeme rozdělit na β^- a β^+ . Při záření β^- z jádra vylétá částice β^- , což je elektron, který vznikl v jádře přeměnou neutronu na proton, elektron a neutrino. Takto vzniklé záření β^- svými elektrickými účinky ionizuje látku, tím se brzdí a v látkovém prostředí má poměrně krátký dolet. Ve tkáni je to přibližně 3 – 4 mm. Spektrum částic β^- je spojité.



Obr. 3. Základní schéma radioaktivity β^- .⁽¹⁴⁾

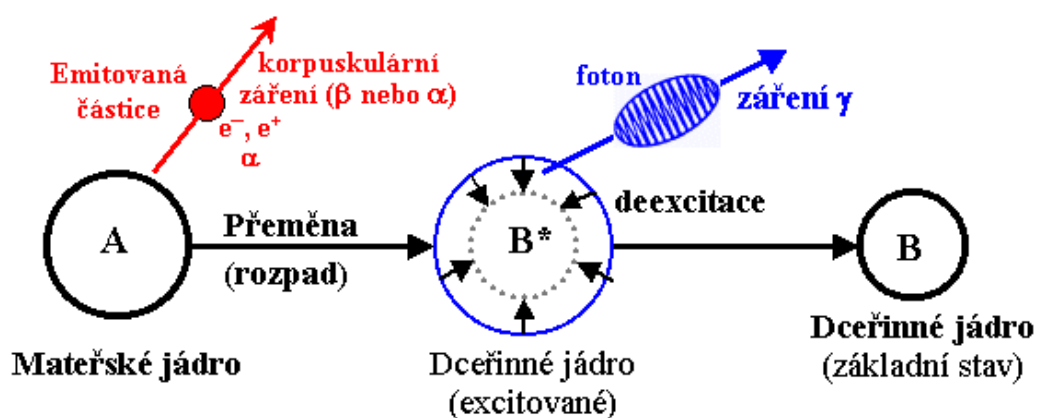
Při záření β^+ z jádra vylétá částice β^+ , což je antičástice k elektronu, pozitron. Tato částice vznikla v jádře při přeměně protonu na neutron, pozitron a neutrino. Ionizační účinky záření β^+ a dolet ve tkáni jsou podobné jako u záření β^- , avšak s tím rozdílem, že po zabrzdění dochází k anihilaci pozitronu s elektronem a vznikají dva fotony o vysoké energii 511 keV, které vylétají z místa vzniku v opačných směrech pod úhlem 180° . Tohoto se využívá v pozitronové emisní tomografii (PET). Spektrum částic β^+ je spojité.



Obr. 4. Základní schéma radioaktivity β^+ a elektronový záchyt. ⁽¹⁴⁾

Záření gama je vysokoenergetické elektromagnetické záření vznikající deexcitací vzbuzených hladin atomového jádra. Jedná se o deexcitaci vzbuzených hladin dceřinného jádra vzniklého po radioaktivní přeměně. Při tomto ději vzniká v atomovém jádře tvrdé elektromagnetické záření, které se nazývá gama záření. Spektrum záření γ je spojité. Fotony tohoto záření nemají žádný elektrický náboj, což znamená, že nevyvolávají přímou ionizaci. Vyvolávají ionizaci nepřímou, a to interakcí s látkou pomocí fotoefektu, Comptonova rozptylu nebo vznikem elektron – pozitronových párů. Díky těmto interakcím vznikají rychlé elektrony, které již ionizují přímo. Většina radionuklidů jsou zářiče smíšené - buď $\alpha + \gamma$ nebo $\beta + \gamma$. Jen některé zářiče jsou čisté α či čisté β . Čisté zářiče γ však v přírodě neexistují!

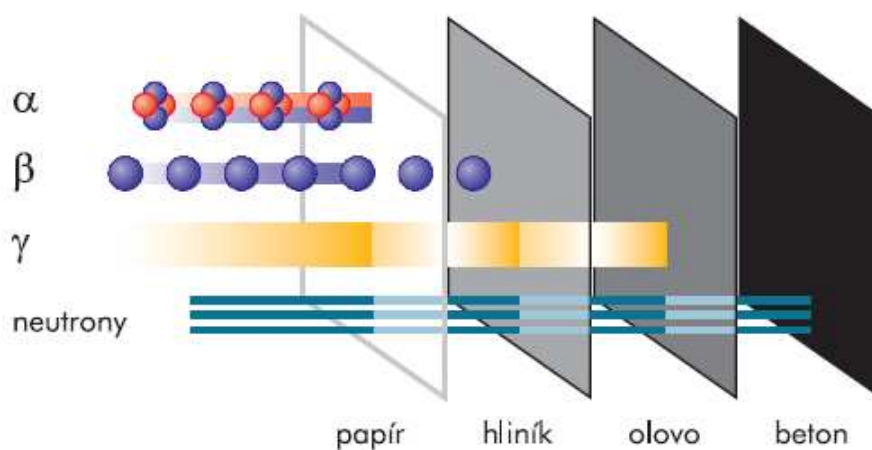
Ovšem v případě metastabilní vzbuzené hladiny dceřinného jádra lze tato jádra ze směsi odseparovat a uměle tak vyrobit čistý zářič γ . Příkladem je radionuklid ^{99m}Tc , který vzniká při rozpadu ^{99}Mo . Dalším takovýmto prvkem je ^{81m}Kr , který se získává z ^{81}Rb . Na použití ^{99m}Tc je založena současná nukleární medicína.



Obr. 5. Základní schéma radioaktivní přeměny γ a následná deexcitace. ⁽¹⁴⁾

Dalším druhem ionizujícího záření je rentgenové (X) záření. Je to relativně tvrdé záření. Stejně jako záření gama má i rentgenovo záření elektromagnetický charakter. Vzniká jako charakteristické záření přeskokem elektronů na nižší energetickou hladinu v atomovém obalu nebo jako brzdné záření v rentgence. Rentgenova záření je hojně využíváno v radiodiagnostice a v radioterapii.

Dalším typem ionizujícího záření je neutronové záření, které vzniká kupříkladu v jaderných reaktorech. Protonové záření vzniká v urychlovačích, nebo při vzniku jader s velkým nadbytkem protonů, která při svém rozpadu vysílají protony. Je také složkou kosmického záření.



Obr. 6. Průnik záření vybranými druhy materiálů. ⁽¹⁷⁾

2.4 Interakce záření při průchodu hmotou

U všech druhů záření se setkáváme s případy průchodu záření bez interakce. To znamená, že kvantum záření může volně proletět mezi atomy látky. Tento případ nastává častěji pro tvrdé záření prolétající látkou s nižší hustotou. Při průletu různých druhů ionizujícího záření látkou dochází obecně k interakcím kvant záření s obalovými elektrony a s atomovými jádry. Mohou se přitom uplatnit všechny tři interakce, které zde připadají v úvahu - silná, slabá a elektromagnetická interakce.

Silné interakce mohou vyvolávat jednak rozptyl způsobený jadernými silami, jednak jaderné reakce, při vysokých energiích a také interakce elementárních částic za vzniku nových částic a antičástic, jako jsou například elektrony a pozitrony.

Slabé interakce se při průchodu běžných druhů ionizujícího záření látkou projevují jen zcela výjimečně a okrajově. Svůj význam mají u záření neutronového a vysokoenergetického kosmického záření či záření z urychlovačů.

Elektromagnetické interakce u nabitých částic způsobují Coulombovský rozptyl, ionizace a excitace atomů i jader a dále radiační procesy jako je brzdné záření. Pro kvanta záření gama a záření X způsobují elektromagnetické interakce fotoefekt, Comptonův rozptyl, tvorbu elektron-pozitronových párů a jejich anihilaci. Pro všechny tyto typy procesů je charakteristické, že interakcí elektrických nábojů s elektromagnetickým polem, v němž se náboje nacházejí, vznikají kvanta záření - fotony, podle své energie a původu většinou fotony rentgenového nebo gama-záření. Elektromagnetické interakce jsou nejčastějšími a nejdůležitějšími procesy při průchodu většiny typů záření v praxi. Využívají se také nejčastěji při detekci ionizujícího záření. Všechny tyto interakce a procesy vedou k tomu, že při průletu kvant ionizujícího záření látkou dochází ke ztrátám energie, k brzdění těchto částic a nakonec, pokud je látkové prostředí dostatečně velké, i k zastavení.

2.4.1 Interakce přímo ionizujícího záření (nabitých částic)

Nabitá částice při průchodu látkou ztrácí svou kinetickou energii převážně elektrickou interakcí s elektrony v atomech. Je-li předaná relativně malá energie elektronu v atomovém obalu, stačí to pouze k vyzdvižení elektronu na vyšší

energetickou hladinu. Tento proces se nazývá excitace atomů. Excitovaný stav atomu není stálý, proto vzápětí přeskočí elektron zpět na původní hladinu. Tento proces se nazývá deexcitace, přičemž rozdíl energií se vyzáří ve formě fotonu elektromagnetického záření. Při excitaci elektronů na vnějších slupkách je emitováno viditelné světlo, při excitaci elektronů na středních slupkách je vyzářeno UV záření a při excitaci na vnitřních slupkách fotony charakteristického rentgenového záření.

Obdrží-li elektron dostatečné množství energie na to, aby se zcela uvolnil z vazby mateřského atomu, pak dojde k jeho odtržení a vzdálení. Tento proces je nazýván ionizace atomu. Při ionizaci dochází k rozdělení na záporný elektron a kladný iont.

Ionizaci můžeme rozdělit na primární a sekundární. Primární ionizace je počet iontových párů vytvořených vyražením elektronů primární částicí. Některé elektrony vyražené při ionizaci mají tolik energie, že mohou samy dále po své dráze ionizovat, v takovém případě se jedná o sekundární ionizaci.

Záření α je proud rychle letících héliových jader ${}^4\text{He}_2$. Toto záření má ze všech běžných kvant největší hmotnost a též největší elektrický náboj.

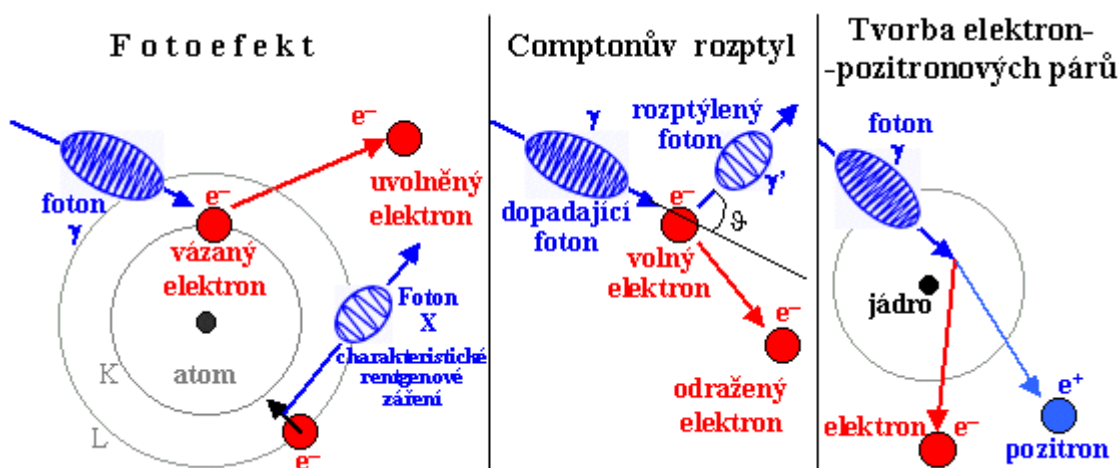
Při průchodu záření α prostředím vytvářejí tyto částice při srážkách s atomy kladné ionty tím, že z elektronového obalu atomů vyrážejí elektrony a tím dochází k ionizaci. Vzhledem k tomu, že částice alfa ztrácejí při ionizacích velmi rychle svoji energii, jejich dosah v prostředí je velmi krátký. V plynech je to řádově několik centimetrů, ve tkáni mikrometry až desítky mikrometrů.

Částice β^- při průchodu prostředím ztrácejí svoji energii při ionizacích atomů a dále v důsledku brzděného záření. Jelikož elektrony jsou ve srovnání se zářením alfa relativně malé a lehké, jsou rozptylovány s malými ztrátami energie a jejich dráha může být značně klikatá. Zabrzdí se, v závislosti na své energii, a to v hloubce do 1 – 4mm v látce hustoty vody, v těžkých kovech pak nedoletí hlouběji než do přibližně 0,1mm. Střední dolet závisí na energii záření a na hustotě a protonovém čísle látky se kterou elektron interaguje. Na atomovém čísle absorbující látky závisí energie vzniklého brzděného záření – u látek s vyšší hustotou jsou výrazně vyšší než u látek s nižší hustotou.

Vnikne-li do látky částice β^+ bude zpočátku podobně jako β^- při svém průletu kolem atomů vytrhávat elektrony z atomů. Při tomto ději, díky své stejně malé hmotnosti jako elektron, se může také pohybovat po klikaté trajektorii, odrážet se mezi atomy, které bude ionizovat a přitom ztrácet svou energii. K zabrzdění dojde v závislosti na jeho energii, a to také v hloubce přibližně 1 - 4mm pokud se bude jednat o látku mající hustotu vody. Po zabrzdění je však osud pozitronu diametrálně odlišný než u elektronu. Při setkání pozitronu s elektronem dojde k vzájemné anihilaci elektronu a pozitronu, při níž oba zaniknou a přemění se na dvě kvanta tvrdého záření γ o energiích 511keV, které se emitují z místa anihilace pod úhlem 180° .

2.4.2 Interakce nepřímo ionizujícího záření

Fotony záření γ a X-záření nemají elektrický náboj, což znamená, že nemohou přímými elektrickými silami ionizovat atomy. Foton je kvantem rychle kmitajícího elektrického a magnetického pole, takže když se dostane elektron do blízkosti tohoto pole, může obdržet elektromagnetickou energii a být fotonem urychlen. Interakce záření gama a X s látkou, vedoucí k ionizačním účinkům, může probíhat třemi různými způsoby a to fotoefektem, Comptonovým rozptylem a tvorbou elektron – pozitronových párů.



Obr. 7. Tři způsoby interakce záření γ s látkou. ⁽¹⁴⁾

Podstatou fotoefektu je, že se foton záření srazí s elektronem v atomovém obalu, tomu předá veškerou svou energii a zanikne. Energie fotonu se při tomto ději spotřebuje na uvolnění elektronu z atomového obalu a zároveň na kinetickou energii vyraženého elektronu. Elektron který získal tuto energii je uvolněn z vazby v atomu a vyletí s kinetickou energií danou rozdílem energie záření a vazbové energie elektronu v atomu. Další chování tohoto elektronu je stejné jako u záření β . To znamená že se bude pohybovat a odrážet mezi atomy, ionizovat je až se nakonec zabrzdí. Na místo uvolněné po elektronu, který vyletěl fotoefektem, následně přeskočí z vyšší energetické slupky v atomovém obalu elektron. Při tomto ději dojde k vyzáření charakteristického rentgenového záření. Energetický rozdíl vazbové energie na vyšší a nižší slupce se vyzáří ve formě fotonu elektromagnetického záření. Fotoefekt nastává nejčastěji u záření gama s nižšími energiemi a v látkách s velkým protonovým číslem.

Při Comptonově rozptylu se jedná o interakci fotonů γ se slabě vázanými elektrony na vnějších slupkách atomů. Foton γ předá část své energie volnému elektronu a uvede jej do pohybu. Rozptýlený foton pak s nižší energií pokračuje v pohybu v odlišném směru. Comptonův rozptyl se může několikrát opakovat, až foton buď opustí látku, nebo ztratí natolik energie, že zaniká fotoefektem na některé z elektronových hladin atomů. Comptonův rozptyl je převládajícím typem interakce záření gama středních energií s látkami o malém protonovém čísle (voda, tkáň).

Pokud do látky vstoupí foton záření γ o energii vyšší než 1,022 MeV, pak se při svém průletu kolem atomového jádra může foton gama přeměnit na dvojici částic elektron - pozitron. Z této dvojice zůstává v látce jako trvalá částice jen elektron. Pozitron anihiluje po zabrzdění s některým z dalších elektronů za vzniku dvou fotonů záření gama o energiích 511 keV. Proces tvorby elektron - pozitronových párů se nejvíce uplatňuje při vysokých energiích záření gama a u látek s vysokým atomovým číslem.

Pokud je jádro součástí atomu, není vždy podmínkou, že se všechny fotony záření gama vzniklé v jádře skutečně vyzáří. Může dojít k procesům zabraňujícím uvolnění části fotonů záření gama při deexcitaci vzbuzených jaderných hladin. Při tomto ději se může foton γ , emitovaný při deexcitaci vzbuzené jaderné hladiny, srazit s obalovým elektronem vlastního atomu, který přebere veškerou jeho energii čímž dojde

k fotoefektu. Foton gama zanikne a místo něj vyletí elektron uvolněný díky přijaté energii. Tento jev se nazývá vnitřní konverze záření gama a příslušné elektrony se nazývají konverzní elektrony. Vnitřní konverzi může podlehnout i charakteristické Rentgenovo záření, takto emitované konverzní elektrony se pak nazývají Augerovy elektrony.

Pod nepřímo ionizující záření patří také neutronové záření. Pod tímto pojmem se rozumí proud pohybujících se neutronů. Ve vakuu se neutrony pohybují volně a bez odporu, avšak jejich dolet není neomezený.

Volné neutrony se spontánně rozpadají radioaktivitou β^- a to s poločasem přibližně 12minut na protony, elektrony a antineutrino. Vzhledem k tomu, že neutrony nemají elektrický náboj, při průchodu látkou samy neionizují. Ionizaci prostředí tudíž způsobují až sekundární částice, které vznikají při interakci neutronů s jádry atomů. Neutrony po vstupu do látky reagují téměř jen s atomovými jádry.

2.5 Účinky ionizujícího záření

2.5.1 Fáze účinku ionizujícího záření na organismus

„Proces účinku ionizujícího záření na živou tkáň probíhá ve čtyřech význačných etapách lišících se svou rychlostí a druhem probíhajících procesů.

✓ Fyzikální stádium - Při interakci kvanta ionizujícího záření s hmotou je energie záření předávána elektronům v atomech za vzniku ionizace a excitace.

Tento primární proces je velmi rychlý (prakticky okamžitý, rychlost kvant je rovna nebo blízká rychlosti světla), trvá jen cca 10^{-16} - 10^{-14} sekundy.

✓ Fyzikálně-chemické stádium - Zde nastávají sekundární fyzikálně-chemické procesy interakce iontů s molekulami, při nichž dochází k disociaci molekul a vzniku volných radikálů (např. z vody H_2O vznikají vodíkové kationty H^+ a hydroxylové anionty OH^- a nestabilní produkty schopné oxidace H_2O_2 , HO_2). I tento proces je velmi rychlý, netrvá déle než 10^{-14} - 10^{-10} sec.

✓ Chemické stádium - Vzniklé ionty, radikály, excitované atomy a další produkty reagují s biologicky důležitými organickými molekulami ("atakují" molekuly DNA, RNA, enzymů, proteinů) a mění jejich složení a funkci. Typickou poruchou na molekulární úrovni jsou zlomy vláknů v molekule DNA - buď zlom jen jednoho vlákna cukro-fosfátového řetězce, nebo úplný zlom dvojvlákna DNA. Dále mohou vznikat poškození purinových a pyrimidinových bazí, atypické vazbové "můstky" (*cross-linky*) uvnitř dvouvlákna DNA, lokální denaturace a další chemické změny. Jednotlivé "genotoxické" procesy tohoto chemického stádia trvají různě dlouhou dobu - od tisíců sekund do řádově jednotek sekund, v závislosti na transportní době reaktivních složek z místa svého vzniku do místa lokalizace napadené biomolekuly.

✓ Biologické stádium - Molekulární změny v biologicky důležitých látkách (v DNA, enzymech, proteinech) mohou vyústit ve funkční a morfologické změny v buňkách, orgánech i v organismu jako celku. Biologické stádium se při vysokých dávkách záření může projevit již po několika desítkách minut, při středních dávkách během několika dní - akutní poškození či nemoc z ozáření v důsledku zničení velkého počtu buněk. Při nízkých dávkách může však zahrnovat dobu latence několika let nebo i desítek let (pozdní stochastické účinky).⁽¹⁴⁾

2.5.2 Závislost biologického účinku na dávce

Pokud dávka záření není velká, s naprostou většinou poškození biologicky aktivních látek se organismus úspěšně vyrovná svými reparačními mechanismy.

I při malých dávkách však existuje určitá pravděpodobnost, že některá poškození se opravit nepodaří a vzniknou pozdní trvalé následky genetického nebo nádorového charakteru. Jelikož takové následky jsou zcela náhodné, individuální a nepředvídatelné, nazývají se účinky stochastické.

Při vysokých dávkách záření je počet poškozených molekul biologicky aktivních látek již natolik vysoký, že organismus není schopen je zcela opravit – část buněk hyne, vzniká nemoc z ozáření. Poškození tkáně je zde přímo úměrné obdržené dávce záření, není již náhodné, je naopak předvídatelné – hovoříme o účincích deterministických.

Základním cílem radiační ochrany tedy je vyloučit deterministické účinky záření a omezit výskyt stochastických účinků na minimum.

Tab. 2. Odhad prahových dávek pro různé tkáně.⁽⁷⁾

Orgán	Účinek	Dávka [Gy]
Varle	Přechodná sterilita	0,1 – 0,5 ^{a)}
Kostní dřevina	Přechodný pokles hodnot periferního krevního obrazu	0,5 – 1,0 ^{b)}
Oční čočka	Zákaly	5
Vaječníky	Trvalá sterilita	3 – 6 ^{c)}
Chrupavka	Zaostávání růstu u dětí	10 ^{d)}
Mozek	Morfologické změny	10 ^{e)}
Plíce	Pneumonitida, fibróza	20 ^{b)}
Ledviny	Chronický zánět	20 ^{c)}
Tenké střevo	Akutní zánět sliznice	30 ^{b)}
Játra	Funkční poruchy	30 ^{b)}
Kůže	Erytém, epilace	50 – 60 ^{f)}
Kost	Dispozice ke zlomenině	60 ^{g)}

Vysvětlivky k tabulce č. 2 :

- a) trvalá sterilita při 2 – 6 Gy
- b) v závislosti na ozářeném objemu
- c) v průběhu vývoje citlivost vyšší
- d) zralá chrupavka rezistentnější
- e) pro nekrózu malých okrsků 65 Gy
- f) v závislosti na ozářené ploše
- g) vyšší jsou hodnoty pro kostní nekrózu

2.6 Stínění ionizujícího záření

Při ochraně před ionizujícím zářením, při detekci ionizujícího záření, při některých zobrazovacích metodách, při radioterapii je třeba zabránit tomu, aby ionizující záření vnikalo do určitých míst, nebo z určitých směrů.

2.6.1 Stínění záření gama

Pro záření gama a X jsou nejvhodnější stínící materiály látky s velkou hustotou, jako například olovo, baryt nebo wolfram. Běžně se k odstínění používají olověné cihly, zástěny s olověnou výplní, olověné vložky do dveří nebo olověné sklo. Na betonové stěny se zase používá barytová omítka. Pro ochranu osob zase olověné zástěry, rukavice nebo límce chránící štítnou žlázu před účinky ionizujícího záření. Často se můžeme setkat s termínem polovrstva, nebo polotloušťka absorbce. Je to taková mocnost vrstvy stínícího materiálu, která zeslabí intenzitu daného záření na polovinu. Použijeme-li stínění o tloušťce, které odpovídá sedmi polovrstvám zeslabí se záření přibližně na 1%, při použití deseti polovrstev zeslabíme záření pod 0,1%.

Tab. 3. Velikost polovrstvy pro vybrané materiály

Energie [keV]	Polovrstva [mm]			
	voda	beton	železo	olovo
200	51	21	6,6	1,4
500	78	30	11,1	4,2
1000	102	45	15,6	9
2000	144	59	21	13,5
5000	231	99	28,8	14,7

2.6.2 Stínění záření beta

Pro odstínění záření β^- jsou nejvhodnější lehké materiály s následnou tenkou vrstvou olova. Mezi lehké materiály vhodné k odstínění záření β^- patří například plexisklo nebo hliník. Následující tenká vrstva olova se používá pro odstínění brzdného záření vzniklého zabrzděním elektronů ve stínícím materiálu. Pro odstínění pozitronového záření je kromě vrstvy lehkého materiálu potřeba použít

silné vrstvy olova. To se používá pro odstínění tvrdého záření gama o energii 511keV, které vzniká při anihilaci pozitronů s elektronem.

2.6.3 Stínění záření alfa

Záření α je možné odstínit velmi snadno. Díky jeho malé pronikavosti stačí jen tenká vrstva lehkého materiálu. Ve vzduchu je dolet částic alfa jen několik centimetrů, takže v určitých případech není potřeba stínit. Pokud používáme smíšený gama a alfa zářič, pak použité stínění proti gama záření automaticky odstíní i záření alfa.

2.6.4 Stínění neutronového záření

Stínění neutronového záření je složitější. Pokud potřebujeme odstínit rychlé neutrony, je třeba je nejprve zpomalit, a poté je pohltit účinným absorbátorem. Nejúčinnější způsob zpomalení neutronů je průchodem látkou bohatou na vodík, například parafín. Zde ztrácejí neutrony energii při pružném rozptylu při kontaktu s jádry vodíku. Takto zpomalené neutrony se absorbují vhodnými absorbátory.

Mezi takové neutronové pohlcovače patří například bór, kadmium nebo indium. Tato absorbce je ještě doprovázena emisí záření gama. Toto záření je také zapotřebí odstínit.

2.7 Detekce ionizujícího záření

Ionizující záření je okem nepostřehnutelné, takže abychom se mohli vůbec přesvědčit o jeho existenci, je třeba jej nějakým způsobem detekovat, a to pomocí příslušných fyzikálních metod a vhodné přístrojové techniky. Kromě důkazu existence záření nám detektory umožňují zkoumat vlastnosti tohoto záření a využívat jej v řadě aplikací. Poskytuje nám informace o intenzitě, energii, prostorové distribuci a dalších vlastnostech záření. Byla vyvinuta řada detektorů ionizujícího záření, které (kromě společného základního jevu, kterým jsou ionizační účinky záření) využívají různých principů a technických konstrukcí.

2.7.1 Základní jednotky pro měření radiace

✓ „Becquerel (Bq) je jednotka intenzity záření zdroje radioaktivního záření v soustavě SI. Je pojmenovaná po francouzském fyzikovi Henri Becquerelovi, který radioaktivitu objevil. Jeden Becquerel je definován jako aktivita radioaktivní látky při níž dojde k jednomu rozpadu atomového jádra za jednu sekundu. V praxi se pro určení radioaktivity látek často používají relativní jednotky, například Bq/m^3 pro plyny nebo Bq/kg pro látky pevné.

✓ Gray (Gy) je jednotka absorbované dávky záření v soustavě SI. Jeden gray odpovídá energii záření jednoho joule absorbované jedním kilogramem látky. Rozměr jednotky gray je stejný jako v případě jednotky ekvivalentní dávky sievert. Pro jednoznačnost se proto musí používat vždy jednotky gray pro absorbovanou dávku a sievert pro ekvivalentní dávku, nikdy však joule na kilogram.

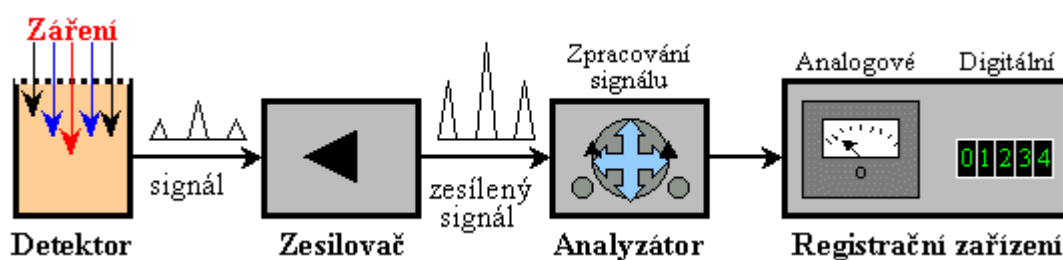
✓ Sievert (Sv) je jednotkou dávkového ekvivalentu ionizujícího záření. Je pojmenována po Rolfu Sievertovi, průkopníkovi radiační ochrany. Jeden Sievert je taková absorbovaná dávka, která při jakémkoliv typu ionizujícího záření vyvolá v organické látce stejný biologický účinek. Vypočítá se jako součin dávky a jakostního faktoru Q .“(15)

2.7.2 Rozdělení detektorů podle principu detekce

Podle principu detekce rozeznáváme tři skupiny detektorů

✓ Fotografické, založené na fotochemických účincích záření (filmové dozimetry, rtg filmy, jaderné emulze).

✓ Elektronické, v nichž se část absorbované energie ionizačního záření převádí na elektrické proudy či impulsy, které se zesilují a vyhodnocují v elektronických aparaturách. Sem patří ionizační komory, G.-M. detektory, scintilační detektory, polovodičové detektory.



Obr. 8. Základní schéma elektronického detektoru záření⁽¹⁴⁾

✓ Materiálové, využívající dlouhodobější změny vlastností určitých látek (barva, složení) působením ionizujícího záření. Vzhledem k nízké citlivosti jsou použitelné pouze pro vysoké intenzity záření či dlouhodobou kumulativní detekci (stopové detektory – změna krystalické mřížky po ozáření).

2.7.3 Rozdělení detektorů podle komplexnosti měřené informace

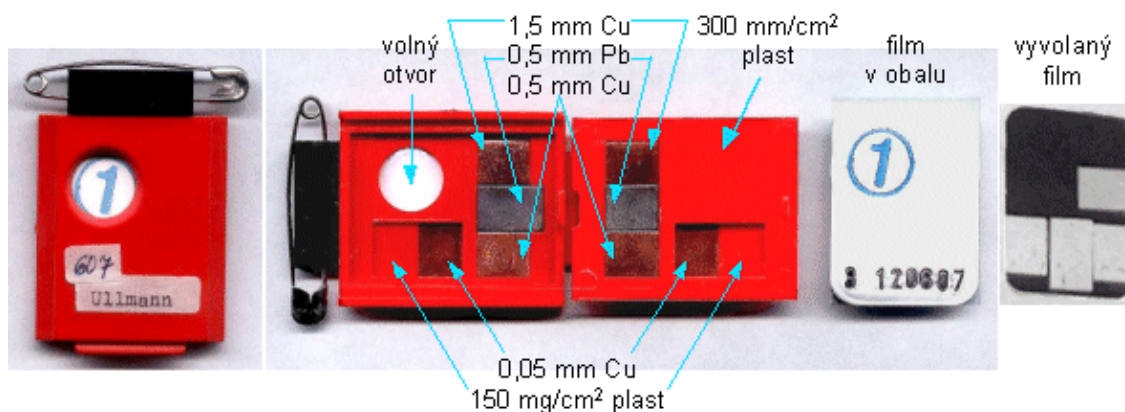
Podle komplexnosti měřené informace můžeme měřící přístroje ionizujícího záření rozdělit na detektory záření, udávající pouze intenzitu záření, resp. počet kvant záření, bez informace o druhu záření a jeho energii. Sem patří např. filmové a termoluminiscenční dozimetry, ionizační komory včetně G.-M. detektorů. Dále na spektrometry ionizujícího záření, které měří nejen intenzitu či počet kvant záření, ale i energii kvant záření a příp. jeho další charakteristiky. Do této skupiny patří především scintilační detektory, polovodičové detektory, magnetické spektrometry.

✓ Fotografická detekce ionizujícího záření - Vnikne-li ionizující záření do fotografického materiálu obsahujícího halogenidy stříbra (jako je bromid stříbrný), dochází v místech s ionizací k fotochemické reakci (uvolňování stříbra ze sloučeniny) a vzniku latentního obrazu, který je při vyvolání zviditelněn pomocí hustoty zrníček koloidního stříbra. Hustota zčernání fotografického materiálu je úměrná hustotě ionizace v daném místě, a tedy množství energie ionizujícího záření, která byla v tomto místě pohlcena.

Nejjednodušším využitím fotografické detekce ionizujícího záření jsou filmové dozimetry. Základem filmového dozimetru je políčko fotografického filmu, světlotěsně zabalené do černého papíru (od běžného fotografického filmu se liší tím, že má tlustší

emulzi s vyšším obsahem bromidu stříbra). Ionizující záření prochází obalem filmu a ve fotoemulzi vytváří latentní obraz, který se vyvoláním zviditelní. Optická hustota zšednutí či zčernání filmu je pak mírou množství záření, které filmem prošlo během expozice; indikuje tím i dávku záření, která by byla absorbována v látce vystavené této expozici. Pro malé dávky záření platí přibližně lineární závislost mezi dávkou ozáření a zčernáním fotografického materiálu, při vyšších dávkách roste zčernání již pomaleji a posléze dosahuje stavu nasycení.

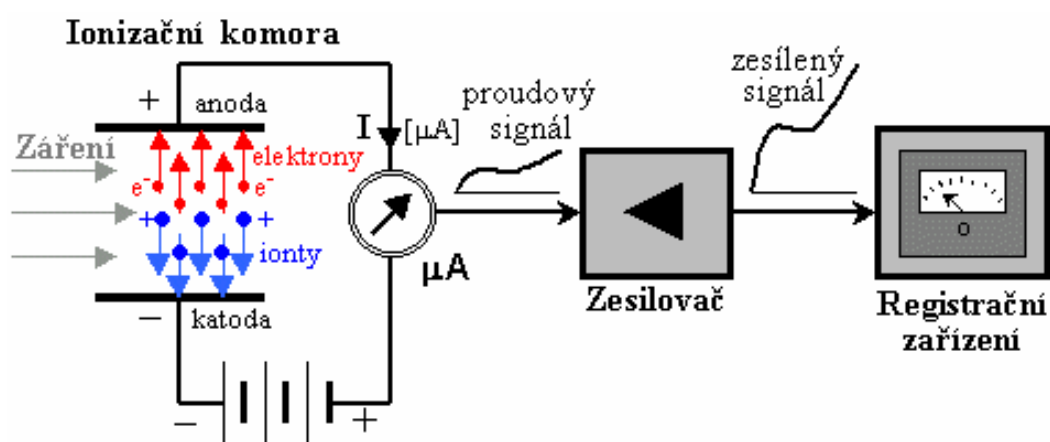
Filmové dozimetry se využívají především pro osobní dozimetrii pracovníků s ionizujícím zářením. Vlastní políčko filmu se vkládá do plastového pouzdra opatřeného několika malými obdélníčky měděných a olověných plíšků o různých tloušťkách, které slouží jako filtry pohlcující záření γ v závislosti na jeho energii. Tyto filtry slouží jednak ke korekci závislosti zčernání na energii záření, jednak porovnáním zčernání pod jednotlivými filtry lze odhadnout druh a zhruba i energii záření.



Obr. 9. Osobní filmový dozimetr⁽¹⁴⁾

✓ Ionizační detektory a ionizační komory - Ionizační komora je nejjednodušším elektronickým detektorem ionizujícího záření; přímočaře využívá ionizační účinky na látku. Ionizační komora je tvořena dvěma kovovými destičkami - elektrodami (anodou a katodou), umístěnými v plynném prostředí a připojenými v elektrickém obvodu na napětí řádově stovky voltů. Za normálních okolností (bez přítomnosti záření) systémem neprochází žádný proud - plyn mezi elektrodami je nevodivý, obvod není uzavřen. Vnikne-li však do prostoru mezi elektrodami ionizující záření, vyráží z původně

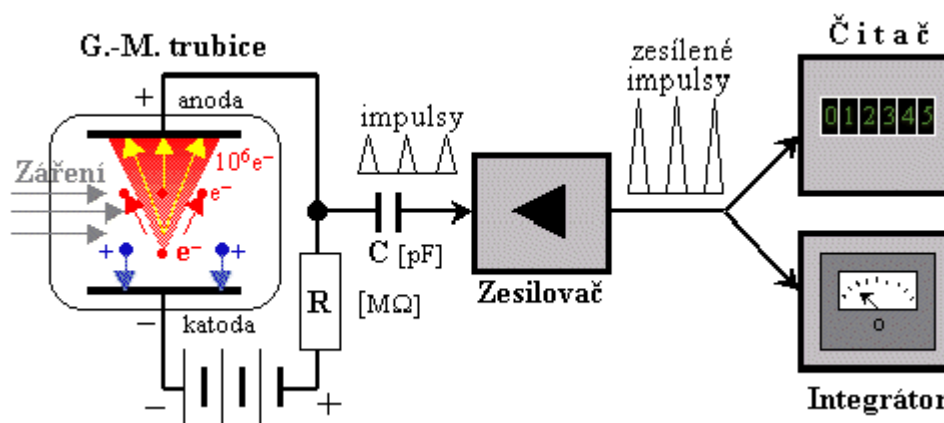
neutrálních atomů plynu elektrony a mění je na kladné ionty. Záporné elektrony putují v elektrickém poli okamžitě ke kladné anodě, kladné ionty se dají do pohybu k záporné katodě - obvodem začne protékat slabý elektrický proud způsobený iontovou vodivostí ionizovaného plynu mezi elektrodami. Proud, měřený mikroampérmetrem, je přímo úměrný intenzitě ionizujícího záření; dá se měřit v jednotkách intenzity záření či dávkového příkonu (Gy/s). Je tak realizována detekce toku neviditelného ionizujícího záření převedením na měřitelnou velikost elektrického proudu obvodem ionizační komory.



Obr. 10. Schématické znázornění principu ionizační komory pro detekci ionizujícího záření⁽¹⁴⁾

Geiger-Müllerův (G.-M.) detektor je ionizační komora, hermeticky uzavřená, naplněná zředěným plynem o tlaku nižším než atmosférický. Po vniknutí kvanta ionizujícího záření nastane v plynu ionizace, načež se elektrony začnou pohybovat k anodě a kladné ionty ke katodě. Jelikož plyn je zředěný a napětí na elektrodách dostatečně vysoké, je střední volná dráha každého elektronu natolik dlouhá, že v elektrickém poli získá takovou kinetickou energii, že při nárazu na atom plynu je schopen vyrazit další elektrony. Tyto sekundární elektrony pak vyřázejí další sekundární elektrony atd. Tento proces probíhá lavinovitě. Z jednoho primárního elektronu vzniká až 10^{10} sekundárních elektronů. Vzniká tak samovolný výboj v prostoru mezi elektrodami. Obvodem projde poměrně silný proudový impuls, který se přes kondenzátor vede ke zpracování v příslušné elektronické jednotce.

Výboj, který vznikne při detekci částice v prostoru mezi elektrodami, je nutno co nejdříve přerušit, protože po dobu výboje nelze registrovat další částice. Proto se do plynové náplně přidává zhašecí látka (bývají to páry metylalkoholu, bromu a pod.), jejíž molekuly absorbují ultrafialové fotony a přispívají tak k rychlému přerušování výboje.



Obr. 11. Schématické znázornění principu G.-M. detektoru⁽¹⁴⁾

✓ Scintilační detektory – scintilační detektory ionizujícího záření jsou založeny na vlastnosti některých látek reagovat světelnými záblesky (scintilacemi) na pohlcení kvant ionizujícího záření; tyto světelné záblesky se pak elektronicky registrují pomocí fotonásobičů. Látky vykazující tuto vlastnost se nazývají scintilátory. Nejstarším používaným scintilátorem je sirník zinečnatý aktivovaný stříbrem ZnS(Ag), ze kterého byla stínítka skiaskopických rentgenových přístrojů. Pro účely detekce záření γ se však nejčastěji používá jodid sodný aktivovaný thaliem - NaJ(Tl), ve formě monokrystalu.

Kvantum měřeného neviditelného záření, například záření γ , vniká do scintilačního krystalu, kde se absorbuje a část jeho energie se přemění na záblesk (scintilaci) viditelného světla. Ke scintilačnímu krystalu je opticky přiložen fotonásobič - speciální elektronka která s vysokou citlivostí převádí světlo na elektrický signál. Na vstupním okénku fotonásobiče je zevnitř nanese tenká kovová vrstvička - fotokatoda (tloušťky cca 10^{-7} cm, materiálem bývá cesium a antimon), uvnitř celé trubice je vysoké vakuum.

Dále fotonásobič obsahuje soustavu elektrod - tzv. dynod. Na jednotlivé dynody je přiváděno kladné napětí - na každou dynodu postupně vyšší a vyšší. Fotony světelného záblesku ze scintilátoru dopadají na fotokatodu, z níž fotoelektrickým jevem vyrážejí elektrony. Každý takový elektron se v elektrickém poli začne pohybovat k první (nejbližší) dynodě, na niž je přivedeno kladné napětí například 100V. Na tuto dynodu dopadne s kinetickou energií cca 100eV, což způsobí vyrazení nejméně 2 či více sekundárních elektronů z kovového povrchu dynody. Tyto elektrony se vydají na cestu k další dynodě, na niž je vyšší kladné napětí - například 200V. Energie, na kterou se urychlí (danou rozdílem napětí, tedy opět cca 100eV) opět vyrazí pro každý elektron 2 či více sekundárních elektronů - máme tedy již nejméně 4 elektrony, které se pohybují k další dynodě, vyrazí opět dvojnásobný počet elektronů atd.

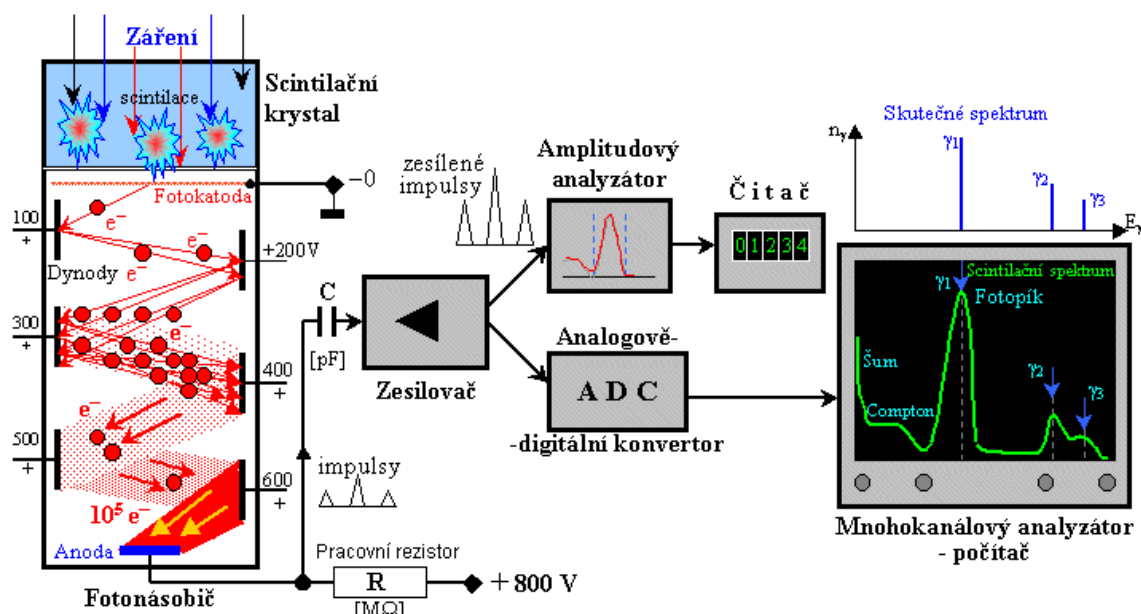
Díky tomuto opakovanému násobení na poslední dynodu, tedy anodu, dopadne cca 10^5 elektronů, což je již dostatečný počet k vyvolání dobře měřitelného elektrického impulsu. Tento impuls se přes kondenzátor vede na zesilovač a další elektronické obvody ke zpracování.

Scintilační detektory mají ve srovnání s G.-M. detektory tři zásadní přednosti.

1. Vysoká detekční účinnost (citlivost) - V masívním scintilačním krystalu o poměrně vysoké hustotě a protonovém čísle se účinně absorbuje (a tedy detekuje) podstatně větší část záření gama než ve zředěném plynu G.-M. trubice (kde většina kvant γ prolétá bez interakce). Scintilační detektory tedy mají vysokou detekční účinnost (citlivost), která se často blíží 100%.

2. Krátká mrtvá doba - Doba trvání scintilace v krystalu je neobyčejně krátká - jen asi 10^{-9} sec. Doba, po kterou procházejí elektrony a násobí se ve fotonásobiči, je rovněž velmi krátká - cca 10^{-8} sec. Doba formování a zpracování elektrického impulsu (časová konstanta) v zesilovači a analyzátoru je u současné elektroniky cca 10^{-6} sekundy; právě tato (nejpomalejší) doba je v celém spektrometrickém řetězci určující. Mrtvá doba scintilačního detektoru je tedy asi 1ms, což je téměř 100-krát kratší, než u G.-M. detektorů.

3. Spektrometrické vlastnosti - Intenzita světelného záblesku ve scintilátoru je přímo úměrná energii kvanta, která se tam pohltila. A intenzitě záblesku je přímo úměrný počet fotoelektronů emitovaných z fotokatody fotonásobiče. Multiplikační proces elektronů na dynodách je rovněž přesně lineární. Amplitudovou analýzou výstupních impulsů ze scintilačního detektoru můžeme tedy provádět energetickou analýzu detekovaného záření - jeho spektrometrii.



Obr. 12. Schématické znázornění principu scintilačního detektoru⁽¹⁴⁾

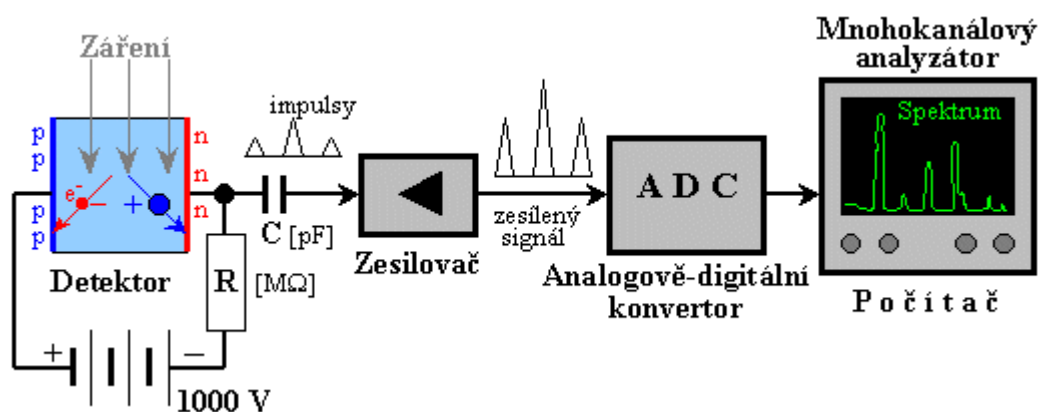
✓ Polovodičové detektory - Mechanismem přímého elektrického využití ionizačních účinků záření se polovodičový detektor svým principem poněkud podobá ionizační komoře.

S tím rozdílem, že citlivým médiem není plyn, ale vhodný polovodičový materiál. Z elektronického hlediska je polovodičový detektor v podstatě dioda zapojená v elektrickém obvodu s vysokým napětím (cca 1000-2000 V). Vnikne-li do aktivní vrstvy detektoru kvantum ionizujícího záření, ionizační energie způsobí v polovodiči přeskok úměrného množství elektronů do vodivého pásma a vznik elektron-děrových párů.

Tyto elektrony se v elektrickém poli okamžitě začnou pohybovat ke kladné elektrodě (a díry k záporné), elektrickým obvodem projde krátký proudový impuls, na pracovním odporu R vznikne napěťový úbytek a přes kondenzátor se elektrický impuls vede k předzesilovači. Amplituda impulsu na výstupu zesilovače je přímo úměrná celkovému sebranému náboji, a tedy energii, která se absorbovala při průchodu kvanta záření aktivní vrstvou detektoru. Amplitudovou analýzou výstupních impulsů můžeme tedy provádět spektrometrickou analýzu energie detekovaného záření, podobně jako u scintilačních detektorů. Zesílené impulsy se vedou na analogově-digitální konvertor a odtud do paměti "mnohokanálového analyzátoru", realizovaného nyní v počítači, v jehož paměti se střeďává výsledné spektrum.

Jelikož sběr náboje vytvořeného v polovodiči ionizací je poměrně dokonalý z celého citlivého objemu, mají germaniové detektory záření γ velmi dobrou energetickou rozlišovací schopnost (zpravidla lepší než 1 keV), asi 30-krát lepší než detektory scintilační. Oproti scintilačním detektorům však mají nižší detekční účinnost pro záření gama a též delší mrtvou dobu (mrtvá doba je dána kapacitou systému detektor + předzesilovač a hodnotou pracovního odporu). Polovodičové detektory se používají všude tam, kde potřebujeme co nejlepší energetickou rozlišovací schopnost, např. v jaderné fyzice, zjišťování radionuklidů v ekologii či měření radionuklidové čistoty preparátů.

Polovodičové detektory jsou zhotoveny většinou z monokrystalů germania, buď se stopovým množstvím lithia, takzvanými drift - detektory Ge(Li), ze superčistého germania, nebo křemíku. Pro svou správnou funkci polovodičové spektrometrické detektory většinou potřebují být chlazeny na teplotu kapalného dusíku.



Obr. 13. Schématické znázornění principu polovodičového detektoru⁽¹⁴⁾

✓ Detekce neutronů – vzhledem k tomu, že neutrony nemají elektrický náboj a nemohou samy přímo ionizovat, je pro jejich detekci potřeba využít procesů interakce, při nichž vznikají sekundární nabitě částice, které již mají ionizační účinky a mohou být detekovány.

Pro detekci neutronů se využívá například metoda odražených jader využívá srážek (pružných interakcí) rychlých neutronů s lehkými jádry, především jádry vodíku (protony), které jsou při srážkách urychlovány a vyvolávají pak v látce ionizaci - mohou být pak detekovány obvyklými detektory. Aktivace je založena na tom, že zachycení neutronu neaktivním jádrem může vést ke vzniku radioaktivního jádra. Toto jádro pak při své radioaktivní přeměně vysílá ionizující záření (β a γ), které se detekuje.

3. Ochrana obyvatelstva před účinky ionizujícího záření

3.1 Historický vývoj ochrany obyvatelstva

„Období organizované ochrany obyvatelstva na našem území je možno rozdělit do několika časových úseků:

✓ Od svého vzniku v roce 1935 do roku 1938 představovala civilní protiletectká ochrana historickou etapu existence ochrany obyvatelstva v demokratických

podmínkách, která skončila zánikem republiky a vznikem Protektorátu Čechy a Morava a Slovenské republiky.

✓ Poválečné období 1945 - 1951 bylo charakteristické likvidací civilní protiletecké ochrany do roku 1948 a snahou o její znovu vybudování po tomto datu.

✓ Rozmezí let 1951 - 1957 se vyznačovalo vznikem civilní obrany a její výstavbou v duchu centralistického pojetí státu pod přímým vlivem tehdejšího Sovětského svazu se zaměřením na ochranu proti konvenčním zbraním v případě ozbrojeného konfliktu.

✓ V letech 1958 - 1975 plnila civilní obrana úkoly a opatření, spojené s ochranou obyvatelstva a národního hospodářství proti použití zbraní hromadného ničení v případě ozbrojeného konfliktu. Do řízení civilní ochrany se promítly změny ve státoprávním uspořádání země v roce 1968.

✓ Relativně dlouhá časová etapa 1979 - 1989 byla charakterizována přechodem civilní obrany z resortu federálního ministerstva vnitra k resortu federálního ministerstva obrany, novou koncepcí ochrany obyvatelstva a snahou právně legalizovat činnost civilní obrany při přírodních katastrofách a průmyslových haváriích v době míru.

✓ Další dvě časové etapy 1990 - 1992 a od roku 1993 se týkají činnosti civilní obrany v podmínkách demokratické ČSFR a samostatné České republiky a odrážejí množství systémových, organizačních a legislativních změn. Mimo jiné i změnu názvu - od roku 1993 se hovoří o civilní ochraně a po přijetí nové legislativy v roce 2000 o ochraně obyvatelstva.“⁽¹³⁾

V současné době plní úkoly ochrany obyvatelstva především Hasičský záchranný sbor, podporován ostatními složkami Integrovaného záchranného systému.

3.2 Základní legislativa týkající se ochrany obyvatelstva

Ochrany obyvatelstva se týká následující legislativa.

- ✓ Zákon č.1/1993 Sb., Ústava ČR v platném znění
- ✓ Zákon č.18/1997 Sb., o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření
- ✓ Zákon č.110/1998 Sb., o bezpečnosti ČR

- ✓ Zákon č. 133/1985 Sb., o požární ochraně
- ✓ Zákon č. 238/2000 Sb., o Hasičském záchranném sboru
- ✓ Zákon č. 239/2000 Sb., o Integrovaném záchranném systému
- ✓ Zákon č. 240/2000 Sb., o krizovém řízení
- ✓ Zákon č. 241/2000 Sb., o hospodářských opatření pro krizové stavy
- ✓ Zákon č. 59/2006 Sb., o prevenci závažných havárií
- ✓ Zákon č. 254/2001 Sb., o vodách
- ✓ Vyhláška MV č. 247/2001 Sb., o organizaci a činnosti jednotek požární ochrany
- ✓ Vyhláška MV č. 328/2000 Sb., o některých podrobnostech zabezpečení IZS
- ✓ Vyhláška MV č. 380/2002 Sb., k přípravě a provádění úkolů ochrany obyvatelstva
- ✓ Vyhláška SÚJB č. 307/2002 Sb. o radiační ochraně

Dne 25. února 2008 schválila vláda České republiky na svém zasedání novou koncepci ochrany obyvatelstva do roku 2013 s výhledem do roku 2020. Je to dokument zásadního významu, zohledňující přípravu a realizaci opatření k ochraně obyvatelstva v kontextu s existujícími ale také předpokládanými bezpečnostními hrozbami.

3.3 Základní možnosti ochrany před ionizujícím zářením

„Obdrženou dávku záření lze určit několika základními faktory: radioaktivitou, s níž pracujeme, druhem a energií emitovaného záření, dobou expozice a geometrickými podmínkami (vzdálenost, stínění). Máme 4 základní způsoby ochrany před zářením:

1) Čas - obdržená dávka je přímo úměrná době expozice, takže se zbytečně dlouho nezdržujeme v prostoru s ionizujícím zářením a práce s radioaktivními látkami je třeba promyšleně připravit a provádět je pokud možno rychle.

2) Vzdálenost - intenzita záření a tím i dávkový příkon jsou nepřímo úměrné druhé mocnině vzdálenosti od zdroje záření (přesně platí pro bodový zdroj). Je proto třeba se zdržovat co nejdále od zdrojů záření (tedy i od pacientů s aplikovanou aktivitou), při práci se zářiči je užitečné držet je co nejdále od těla a případně používat vhodné manipulátory, pinzety.

3) Stínění - velmi efektivní ochranou je odstínění záření vhodným absorbujícím materiálem. Pro záření gama jsou to materiály s velkou měrnou hmotností – především olovo, ze stavebních materiálů pak beton s případnou příměsí barytu. Používají se olověné kontejnery pro přepravu a skladování zářičů, zástěny z olověného plechu, tvarované olověné cihly.

Tloušťka potřebného stínění závisí na hustotě (a nukleonovém čísle) stínícího materiálu, na energii záření γ a na požadovaném zeslabení. V tabulkách se někdy uvádí hodnoty tzv. polovrstvy absorpce, což je taková tloušťka vrstvy stínícího materiálu, která sníží intenzitu daného záření na polovinu (2 polovrstvy pak na $1/4$, 3 polovrstvy na $1/8$ – stínící účinek roste exponenciálně s tloušťkou stínění).

K odstínění záření β stačí lehké materiály jako je plexisklo, nejlépe v kombinaci s následnou tenkou vrstvou olova k odstínění brzděného elektromagnetického záření.^{“(14)} „Neutronové záření se nejprve zpomalí látkami s velkým množstvím vodíku, například voda nebo parafin, a zpomalené neutrony se poté pohltí látkami s výraznou absorpční schopností pro neutrony, například kadmiem nebo bórem.“⁽⁷⁾

4) „Zabránění kontaminace – posledním základním způsobem ochrany je zabránění kontaminace. To se vztahuje jak na vnitřní, tak i na vnější kontaminaci. Toto riziko nám hrozí na pracovištích s otevřenými zářiči. Na takovýchto pracovištích může dojít jednak k povrchové kontaminaci těla, ale také k vnitřní kontaminaci. Vnitřní kontaminace je daleko nebezpečnější, protože při ní je organismus zářením zatěžován dlouhodobě a “zevnitř”. Radionuklid vstoupí do metabolismu a podle své chemické povahy se hromadí v určitých cílových orgánech, které jsou pak bezprostředně vystaveny účinkům záření. K vnitřní kontaminaci může docházet zažívacím ústrojím, dýchacím ústrojím nebo průnikem přes pokožku. Pro zabránění kontaminace je tedy nutno dodržovat pravidla hygieny, v kontrolovaném pásmu nejíst, nepít, používat ochranné rukavice, s těkavými radioaktivními látkami pracovat v digestoři.“⁽¹⁴⁾

3.4 Radiační monitorování a osobní dozimetrie

Cílem radiačního monitorování je měření veličin charakterizujících záření. Pomocí tohoto měření je možné zajistit optimální úroveň ochrany osob a pracovního či životního prostředí před nepříznivými účinky ionizujícího záření. Monitoring je prováděn na pracovištích s ionizujícím zářením a pokud je potřeba, také v okolí zdrojů ionizujícího záření. Při měření se zaměřujeme především na radiační dávku a dávkový příkon. Měření těchto veličin se provádí pomocí dozimetrů. Provádí se měření osob, pracoviště, radioaktivních odpadů a také okolí pracoviště s ionizujícím zářením.

„Pro hodnocení výsledků měření při monitorování se stanovují určité význačné hodnoty, jejichž dosažení signalizuje určitou anomální radiační situaci a je pokynem pro zahájení příslušných opatření radiační ochrany. Zavádějí se tři druhy referenčních úrovní:

✓ Záznamová úroveň - Tato úroveň stanovuje nejnižší hodnotu monitorované veličiny, od které má význam ji hodnotit a zaznamenávat v dokumentaci. Jako záznamová úroveň se většinou bere nejmenší detekovatelná hodnota měřené veličiny, či hodnota pozadí. Tato hodnota je závislá na druhu měřené veličiny, konkrétních podmínkách měření a vlastnostech měřících přístrojů používaných k monitorování.

✓ Vyšetřovací úroveň - Dosažení vyšetřovací úrovně je již příznakem, ne zcela běžné, radiační situace na pracovišti a mělo by být podnětem k šetření jeho příčin a důsledků. Vyšetřovací úroveň se zpravidla stanovuje jako horní mez obvykle se vyskytujících hodnot, u osobních radiačních dávek pak jako 0,3násobek příslušného limitu pro radiační pracovníky.

✓ Zásahová úroveň - Dosažení této úrovně již signalizuje mimořádnou událost či radiační nehodu, spojenou se zvýšeným radiačním rizikem, a je podnětem k neprodlenému varování a podniknutí kroků pro ochranu osob a prostředí podle havarijního řádu pracoviště.“⁽¹⁴⁾

Monitoring osob je velice důležitý. Pro každého pracovníka s ionizujícím zářením platí systém limitování dávek

3.5 Systém limitování dávek

„Jakákoliv dávka ionizujícího záření může být spojena s určitým rizikem škodlivých účinků. Z tohoto důvodu je třeba dbát na to, aby dávky byly co nejnižší.

Cílem ochrany osob před účinky ionizujícího záření je zcela vyloučit nežádoucí deterministické účinky a omezit výskyt stochastických účinků na tak nízkou úroveň, aby byla přijatelná pro společnost i jedince.

Deterministickým účinkům lze zcela zabránit stanovením tak nízkých limitů dávkového ekvivalentu, aby nebyla dosažena prahová dávka pro jejich vznik ani po celoživotním ozáření. Omezení stochastických účinků na přijatelnou úroveň se zajišťuje uplatněním systému limitování dávek. Ten je založen na následujících třech principech. Žádná činnost nesmí být zavedena, nepovede-li k pozitivnímu čistému přínosu (princip zdůvodnění). Všechny expozice musí být udržovány tak nízké, jak lze z hledisek ekonomických a sociálních rozumně dosáhnout (princip optimalizace ochrany před zářením). Dávkový ekvivalent žádného jednotlivce nesmí překročit limity doporučené pro příslušné podmínky (princip nepřekročení obecně platných limitů dávkového ekvivalentu).“⁽²⁾

Limity jsou považovány nikoliv za hodnoty zaručující přijatelnost, ale za hranici mezi oblastí dávek zcela nepřijatelných a oblastí, kde je nutno určit skutečnou přijatelnost ozáření optimalizací ochrany před zářením. Vyhláška č. 307/2002 Sb. rozlišuje několik druhů základních limitů jako závazných kvantitativních ukazatelů, jejichž překročení není přípustné.

„Limity pro radiační pracovníky, vztahující se na ozáření, kterému jsou vystaveni v přímém vztahu k vykonávané práci pracovníci kategorie A nebo B. Pro součet efektivních dávek ze zevního ozáření a úvazků efektivních dávek z vnitřního ozáření 100 mSv za pět let po sobě jdoucích kalendářních roků a 50 mSv za kalendářní rok, pro ekvivalentní dávku v oční čočce 150 mSv za kalendářní rok, pro průměrnou ekvivalentní dávku v 1 cm² kůže 500 mSv za kalendářní rok, pro ekvivalentní dávku na ruce od prstů až po předloktí a na nohy od chodidel až po kotníky 500 mSv za kalendářní rok.

Limity pro učně a studenty, vztahující se na ozáření, kterému jsou vědomě, dobrovolně a po poučení o rizicích s tím spojených vystaveny osoby po dobu jejich specializované přípravy na výkon povolání se zdroji ionizujícího záření. Pro součet efektivních dávek ze zevního ozáření a úvazků efektivních dávek z vnitřního ozáření 6 mSv za kalendářní rok, pro ekvivalentní dávku v oční čočce 50 mSv za kalendářní rok, pro průměrnou ekvivalentní dávku v 1 cm^2 kůže 150 mSv za kalendářní rok, pro ekvivalentní dávku na ruce od prstů až po předloktí a na nohy od chodidel až po kotníky 150 mSv za kalendářní rok.

Obecné limity, vztahující se na ozáření ze všech radiačních činností, kromě ozáření výše uvedených, lékařského ozáření, ozáření osob podílejících se na zásazích v případě radiační nehody a případů ozáření, na které se vztahují limity zvláštní. Pro součet efektivních dávek ze zevního ozáření a úvazků efektivních dávek z vnitřního ozáření 1 mSv za kalendářní rok, výjimečně 5 mSv za pět po sobě jdoucích kalendářních roků, pro ekvivalentní dávku v oční čočce 15 mSv za kalendářní rok, pro průměrnou ekvivalentní dávku v 1 cm^2 kůže 50 mSv za kalendářní rok.“⁽⁵⁾

Tab. 4. Základní limity stanovené vyhláškou č. 307/2002 Sb.⁽⁵⁾

Veličina	limity pro radiační pracovníky		limity pro učně a studenty	Obecné limity
	za 5 za sebou jdoucích roků (mSv)	za rok (mSv)	za rok (mSv)	za rok (mSv)
$E + E_{(t)}$	100	50	6	1
H oční čočka	-	150	50	15
H kůže	-	500	150	50
H končetiny	-	500	150	-

Vysvětlivky k tabulce č. 4 :

$E + E_{(t)}$ - součet efektivních dávek ze zevního ozáření a úvazků efektivních dávek z vnitřního ozáření

H oční čočka – ekvivalentní dávka pro oční čočku

H kůže - ekvivalentní dávka pro 1 cm² kůže

H končetiny - ekvivalentní dávka pro ruce od prstů až po předloktí a pro nohy od chodidel až po kotníky

4. Ochrana proti ionizujícímu záření v jednotlivých oblastech použití

4.1. Ochrana v radiodiagnostice

Radiodiagnostika je v ta část radiologie, která slouží diagnostickým účelům. Cílem radiodiagnostiky není jen stanovení diagnózy, ale taktéž získání informace, prostřednictvím obrazu, po provedeném chirurgickém zákroku. Slouží také k průběžné kontrole v rámci prováděného intervenčního terapeutického výkonu.

Zařízení pracující na principu rentgenu jsou konstruována tak, aby kromě zvýšení kvality diagnostické informace také významně přispívala ke snížení zátěže pacienta. Tohoto je dosaženo například automatickým nastavením expozičních parametrů či

automatickou výměnou přídavné filtrace primárního rentgenového svazku podle tloušťky pacienta nebo automatickým vykloněním primárního svazku na velikost kazety.

4.1.1 Ochrana pracovníků na oddělení radiodiagnostiky

„Při skiaskopických vyšetřeních se musí nezbytný zdravotnický personál zdržovat během expozice pacienta ve vyšetřovací místnosti. Potom je hlavním zdrojem expozice personálu Comptonův rozptyl primárního záření v ozářené části těla pacienta. Množství rozptýleného záření je úměrné ozařované ploše. Je proto důležité, aby byl svazek vymezen jen na diagnosticky významnou oblast. Sníží se tak nejen radiační zátěž personálu a pacienta, ale zvýší se i kvalita zobrazení. Při ochraně proti rozptýlenému záření se uplatní všechny tři základní způsoby ochrany – ochrana časem, vzdáleností a stíněním. Dávka je přímo úměrná času strávenému v blízkosti zdroje záření.

Velmi účinné je uchovávat si co největší odstup od zdroje záření. Monitorováním rozptýleného záření při konkrétním typu vyšetření simulovaném pomocí fantomu lze stanovit pracovní místa, která jsou pro přítomný zdravotní personál z hlediska dávky nejbezpečnější.

Ochrana časem a vzdáleností vhodně doplňuje ochrana stíněním. Používají se mobilní zástěny, ochranné závěsy upevněné na vyšetřujícím stole, stropní závěsy s olovnatým sklem, chránící zejména oči vyšetřujícího lékaře.

Velmi důležité jsou osobní ochranné pomůcky, zástěry, límce, rukavice, brýle. Ochranné zástěry a límce se vyrábějí se stínícím ekvivalentem 0,25; 0,35 nebo 0,50 milimetrů olova. Rukavice se vyrábějí i s nižším stínícím ekvivalentem pro ta vyšetření, kdy musí být zachován cit v rukou, například při vyšetření kojenců. Zástěry, límce i rukavice musí být nejméně jednou za rok podrobeny skiaskopické kontrole, zda není narušena jejich celistvost.“⁽⁶⁾

K ochraně personálu napomáhá také pořádání různých školení a průběžné vzdělávání personálu, monitorování dávek pomocí osobních dozimetrů.

Tab. 5. Množství prošlého rentgenového záření v závislosti na stínícím ekvivalentu a anodovém napětí.⁽⁶⁾

Napětí na rentgence [kV]	50	75	100	150
Ekvivalent olova [mm Pb]	Množství prošlého ionizujícího záření [%]			
0,13	2,0	10	20	40
0,25	0,35	3,0	10	20
0,35	0,05	1,5	5,5	11
0,40	0,03	1,0	4,5	8,0
0,50	0,01	0,7	3,0	5,5
1	-	0,05	0,5	1,0



Obr. 14. Ochranná Pb zástěra a ochranný Pb límec. (foto: Miloš Řehák, duben 07, 2007)



Obr. 15. Ovladovna RTG přístroje. (foto: Miloš Řehák, duben 07, 2007)

4.1.2 Ochrana pacientů na oddělení radiodiagnostiky

Při ochraně pacientů na oddělení radiodiagnostiky se uplatňuje jak princip zdůvodnění činnosti, tak princip optimalizace ochrany. Princip limitování dávek nelze v tomto případě použít, neboť řešení zdůvodněných klinických problémů při některých radiodiagnostických výkonech by mělo mít přednost před jakýmkoliv formálními pravidly.

„Při optimalizaci hraje klíčovou úlohu radiodiagnostický asistent. Jednak provádí pravidelnou kontrolu kvality zobrazení a jednak volí optimální podmínky expozice, aby dávka byla co nejnižší bez ztráty nezbytné klinické informace. Volí také použití vhodných ochranných prostředků pro pacienta.

Jedním z nejvýznamnějších technických prostředků k omezení radiační zátěže pacienta je vymezení svazku záření na co nejmenší pole, které je ještě v souladu s oblastí zájmu. Přesné umístění pole je také velmi důležité, zejména leží-li oblast zájmu v blízkosti gonád nebo při vyšetření novorozenců, kdy jsou gonády vždy v blízkosti primárního svazku.

Při skiaskopii je radiační zátěž pacienta nejvíce ovlivněna kvalitou zesilovače obrazu a také celkovým skiaskopickým časem. Přímá skiaskopie bez použití zesilovače by se již neměla používat vůbec.

Výrazného snížení dávky lze dosáhnout použitím citlivějších zesilujících folií. Zesilující folie ze vzácných zemin umožňují až několikanásobné snížení dávky proti klasickým fóliím. Používáním folií s vysokým zesilujícím účinkem lze jednak snížit dávky například při nezbytných gynekologických a pediatrických vyšetřeních, ale také minimalizovat pohybovou neostrost, aby nedocházelo ke zbytečnému opakování snímků.

Z důvodů radiační ochrany se musí stínit radiosenzitivní orgány nebo tkáně, kdykoliv je to možné. Stínění testes či ovárií se u pacientů v reprodukčním věku musí použít vždy, jsou-li gonády blízko primárního svazku, nebo přímo ve svazku, pokud stínění nebrání v získání potřebné klinické informace.“⁽⁶⁾



Obr. 16. RTG přístroj Philips. (foto: Miloš Řehák, duben 07, 2007)



Obr. 17. Ochranné dveře s Pb vložkou. (foto: Miloš Řehák, duben 07, 2007)

Tab. 6. Přibližná radiační zátěž pro nejčastější metody rentgenové diagnostiky⁽¹⁴⁾

Rentgenová diagnostika	
Druh vyšetření	Ef. dávka [mSv]
Snímek plic	0,05
Páteř	1,8
Břicho	3 – 8
Urografie	2,1
Mamografie	0,5
Angiografie	3 – 9
CT hlava	1,1
CT tělo	9,2

4.2 Ochrana v nukleární medicíně

Nukleární medicína je lékařský obor, který se zabývá podáním radioaktivních látek. Nukleární medicína se zabývá především diagnostikou, v menší míře také léčbou. Přípravky obsahující chemickou sloučeninu, jejíž účinnou složkou je radionuklid jako zdroj ionizujícího záření, jsou nazývána radiofarmaka. Mohou být otevřenými zářiči, jež se aplikují jako roztoky, plyny případně pevné látky – želatinové kapsle.

V nukleární medicíně se uplatňují pouze umělé radionuklidy, které mají vhodné fyzikální charakteristiky. Například fyzikální poločas v intervalu od několika hodin až několik desítek dnů, emise záření beta a gama (případně charakteristického rentgenového záření) a energie záření gama (případně charakteristického rentgenového záření) v rozmezí od 30 keV do 511 keV.

4.2.1 Ochrana pracovníků na oddělení nukleární medicíny

„Práce s otevřenými zářiči na odděleních nukleární medicíny je spojena jak s rizikem vnějšího ozáření, tak i s rizikem vniknutí radioaktivních látek do organismu s následným vnitřním ozářením. Je tedy nutné dodržovat zásady ochrany před zářením (ochrana časem, vzdáleností a stíněním) i provádět opatření co nejvíce omezující vnitřní kontaminaci pracovníků.“⁽⁶⁾

Z hlediska ochrany proti zevnímu ozáření se klade důraz na některá opatření. Jedním z opatření je převlékání zaměstnanců po příchodu do pracovního oděvu. Dále pak používání ochranných pomůcek pro manipulaci se zářiči a používání laminárních boxů a digestoří při manipulaci s těkavými radioaktivními látkami.

„I když jsou generátory $^{99}\text{Mo} - ^{99\text{m}}\text{Tc}$ dodávány ve stínícím olověném krytu, je vždy nutné dodatečné olověné stínění. Umisťují se proto do olověných schránek laminárních boxů a pokud laminární box není k dispozici, pak do vhodného stínícího krytu, v němž jsou po celou dobu jejich využívání na pracovišti (přibližně týden). Na povrchu lahviček s eluátem $^{99\text{m}}\text{Tc}$ je vysoký dávkový příkon záření gama, proto nesmí pracovník brát lahvičky do ruky a musí při manipulaci s nimi používat speciální

pinzety, u nichž je zajištěno, že lahvička při přenášení nevypadne. Při injekční aplikaci radioaktivních roztoků jsou stříkačky ve stínících krytech z olověného plechu.

Při vyšetřování a léčbě pacientů, kterým byla aplikována radiofarmaka, jsou nejúčinnějšími metodami radiační ochrany pracovníků ochrana časem a ochrana vzdáleností. Čas strávený ošetřujícím personálem u pacienta a vzdálenost od něho jsou dány klinickým stavem pacienta – pacienti v horším stavu kladou z časového hlediska větší nároky, což má za následek až dvojnásobně vyšší radiační zátěž personálu než u pacientů v příznivějším klinickém stavu. Toto lze omezit střídáním pracovníků na nejvíce exponovaných místech.“⁽⁶⁾

Na odděleních nukleární medicíny, které mají k dispozici přístroje pro pozitronovou emisní tomografii jsou energie a tedy i obdržené dávky několikanásobně vyšší než na běžných odděleních nukleární medicíny, kde se nepoužívají pozitronové zářiče. Z tohoto důvodu je nutné větší stínění zářičů při manipulaci a aplikaci. Řešením pro snížení obdržených dávek by byla mechanizace přípravy radiofarmaka a manipulace s nimi.

K ochraně personálu napomáhá také pořádání různých školení a vzdělávání personálu, monitorování dávek pomocí osobních dozimetrů.

4.2.2 Ochrana pacientů na oddělení nukleární medicíny

„Radiofarmaka používaná k diagnostice a léčbě pacientů musejí být registrována Státním ústavem pro kontrolu léčiv v Praze. Při volbě aktivity aplikované nemocnému musí být splněn požadavek § 37 vyhlášky č. 184/1997 Sb.: při aplikacích radionuklidů (radiofarmak) pro diagnostické účely je nutné aplikovat nezbytné množství radioaktivní látky požadované čistoty a aktivity, které zaručuje dostatečnou diagnostickou informaci při co nejnižší radiační zátěži pacienta.

Snížení absorbované dávky u pacienta, jemuž byla podána optimálně volená aktivita radiofarmaka, se může dosáhnout ovlivněním biokinetiky této látky.

Často využívanou možností je urychlení její eliminace z těla; hydratace pacienta spolu s vyzváním k častému močení vede ke snížení radiační zátěže močového měchýře například při použití radiofarmak pro vyšetření kostí a ledvin. Jinou možností je

zabránit případně omezit přísun radiofarmaka do určitého orgánu; běžně se blokuje štítná žláza podáváním preparátů, jako je KI nebo KClO_4 v případě, že se aplikují radiofarmaka značená ^{131}I nebo $^{99\text{m}}\text{TcO}_4^-$ (s výjimkou jejich použití pro zobrazení štítné žlázy).

Za chybnou aplikaci radiofarmaka se považuje podání podstatně vyšší nebo podstatně nižší aktivity, než je nutné pro příslušnou léčbu. Dojde-li k aplikaci radiofarmaka o aktivitě podstatně vyšší, než je požadovaná, musí lékař přistoupit okamžitě k opatřením, aby se radiační zátěž pacienta výrazně snížila, k okamžitému odstranění perorálně podaných radiofarmak zvracením, žaludečním výplachem, projímadly nebo klysmatem, k urychlení eliminace intravenózně podaných radiofarmak zavodněním, diurézou a ve vhodných případech podáním chalátů, k odstranění moče katetrizací u pacientů, kteří nemohou spontánně močit.

Ve vhodných případech k použití blokujících látek jako KI nebo KClO_4 ke snížení absorbované dávky ve štítné žláze.^{“(6)}

Tab. 7. Přibližná radiační zátěž pro nejčastější metody radioisotopové diagnostiky⁽¹⁴⁾

Radioisotopová diagnostika	
Druh vyšetření	Ef. dávka [mSv]
Statická scintigrafie ledvin	1,5
Dynamická scintigrafie ledvin	2,2
Dynamická cholescintigrafie	2,3
Scintigrafie skeletu	3,4
Perfúzní scintigrafie plic	1,2
Scintigrafie štítné žlázy	2,2
Scintigrafie perfúze myokardu	7,5

4.3 Ochrana v radioterapii

4.3.1 Ochrana pracovníků na oddělení radioterapie

Radioterapie je samostatný medicínský obor, který se zabývá využitím ionizujícího záření k léčbě pacientů. Od sedmdesátých let jsou procesy na všech úrovních radioterapie významně ovlivněny rozvojem výpočetní techniky. Ta umožňuje nejen zpřesňovat metody plánování léčby a stanovení dávky, ale přispívá ke zvyšování bezpečnosti provozu všech typů ozařovačů při současném rozšiřování možností jejich využití.

Radiační ochrana na radioterapeutickém pracovišti musí zahrnout všechny tři kategorie osob, které mohou být ozářeny v důsledku činnosti související s radioterapií. Těmito osobami jsou pracovníci na oddělení radioterapie, pacienti a další osoby, které mohou být na radioterapeutickém oddělení přítomny (nejčastěji se jedná o doprovod pacientů).

Pro zdravotnický personál a obyvatelstvo jsou stanoveny limity ozáření a jejich radiační ochrana při práci a pobytu na radioterapeutickém pracovišti musí být optimalizována podobně jako při každé jiné činnosti vedoucí k ozáření.

Pro dosažení požadované úrovně ochrany se uplatňují obecné zásady vedoucí ke snížení ozáření (stínění, vzdálenost, časový faktor, případně administrativní opatření).

4.3.2 Ochrana pacientů na oddělení radioterapie

„Ochrana pacientů před nežádoucím ozářením má v radioterapii své zvláštní rysy. Při léčbě nádorových onemocnění, která se nazývá kurativní (v případě, že cílem léčby je úplná eliminace nádoru), nebo paliativní terapie (kdy hlavním cílem je omezení nádorového bujení a tím zlepšení kvality života pacienta), se do nádorem postižené tkáně uvnitř těla pacienta, která se nazývá cílový objem, aplikuje určitý počet frakcí dávky v celkové výši několika desítek grayů (obvykle 20 – 60 Gy). Při tom mohou být i okolní zdravé tkáně ozářeny až na hranici své tolerance. Protože se často jedná o výkon zachraňující život pacienta, nelze pro ozáření pacientů uplatnit žádné limity dávek. K eliminaci nádorového bujení se využívají deterministické účinky

ionizujícího záření, přičemž stochastické účinky se u této skupiny pacientů obvykle neuvažují. Úlohou lékaře je co nejpřesněji vymezit cílový objem, stanovit terapeutickou dávku a zmenšovat nežádoucí projevy deterministických účinků. Úlohou ostatních zdravotnických pracovníků (zejména fyziků a radiologických laborantů) je zajistit, aby dávka potřebná k odstranění nádoru byla dodána přesně do cílového objemu a aby současně bylo sníženo na co možná nejnížší úroveň ozáření okolních zdravých tkání (zejména kritických orgánů).“⁽⁶⁾

4.4 Ochrana před ionizujícím zářením v jaderných elektrárnách a jejich okolí

„Zákon číslo 18/1997 Sb. definuje jadernou bezpečnost jaderného zařízení jako stav a schopnost jaderného zařízení a osob obsluhujících jaderné zařízení zabránit nekontrolovatelnému rozvoji štěpné řetězové reakce nebo nedovolenému úniku radioaktivních látek nebo ionizujícího záření do životního prostředí a omezovat následky nehod.“⁽¹⁶⁾ Možné riziko jaderných elektráren tedy spočívá v možné ztrátě kontroly nad řízením štěpné řetězové reakce a v objemu radioaktivních látek nahromaděných v aktivní zóně reaktoru za jeho provozu, a to zejména v souvislosti s jejich možným únikem do životního prostředí.

4.4.1 Ochrana pracovníků v jaderných elektrárnách

„Z charakteru pracovních činností a souvisejících zdrojů záření vyplývá, že primárním rizikem u pracovníků jaderné elektrárny je riziko vnějšího ozáření, druhotným rizikem je riziko vnitřního ozáření. Principy ochrany pracovníků v jaderné elektrárně jsou stejné jako na ostatních pracovištích se zdroji ionizujícího záření: osobní efektivní dávky pracovníků musí být udržovány na rozumně dosažitelné nízké úrovni.

Technologické prostory jaderné elektrárny jsou z hlediska rizika ozáření obvykle rozděleny na prostory neobsluhované (za provozu nepřístupné), částečně obsluhované (omezeně přístupné při dodržení určitých a stanovených podmínek režimu pobytu v těchto prostorách) a obsluhované (plně přístupné bez omezení).

Nutnost režimových opatření v těchto prostorách definuje tyto prostory – v souladu s legislativou – jako kontrolovaná pásma a zároveň určuje i ostatní části elektrárny, kde není nutné kontrolovaná pásma vymezovat, pokud tam není nakládáno s jinými zdroji ionizujícího záření, které režimová opatření vyžadují.

Monitorování pracoviště poskytuje trvalou a úplnou informaci o příkonu ekvivalentních dávek a o objemové aktivitě radionuklidů v ovzduší v různých částech elektrárny, znalost těchto údajů je nutnou podmínkou pro uplatňování principu optimalizace radiační ochrany.

Měření a vyhodnocování individuálního vnějšího i vnitřního slouží především k regulaci osobních dávek a jejich udržování na rozumně dosažitelné nízké úrovni. Musí poskytnout informaci nejen o celkové efektivní dávce jednotlivce za sledované období (zpravidla jeden měsíc), ale i o rozložení této dávky v závislosti na prováděných činnostech.“⁽⁶⁾

4.4.2 Ochrana obyvatel v okolí jaderných elektráren

„Vliv jaderné elektrárny na okolní obyvatelstvo a na životní prostředí je dán především úrovní kvality technologického zařízení a úrovní řízení technologických procesů. Mírou této kvality je ozáření jednotlivce z obyvatelstva respektive ozáření kritické skupiny obyvatelstva v důsledku radioaktivních výpustí do okolí.

Kritickou skupinou se rozumí na základě racionálních modelů identifikovaná homogenně ozařovaná skupina osob (z daného zdroje a danou expoziční cestou), a to tak, že efektivní nebo ekvivalentní dávky jednotlivce z této skupiny jsou vyšší než kteréhokoliv jednotlivce z ostatní populace.

Kritériem bezpečnosti provozu jaderně energetického zařízení jsou hodnoty ozáření kritické skupiny obyvatel. Průměrná efektivní dávka u této skupiny obyvatel nesmí v kalendářním roce překročit hodnotu 200 μSv v důsledku výpustí do ovzduší a 50 μSv v důsledku výpustí do vodotečí.

Další důležitou metodou pro ochranu obyvatelstva před zevním ozářením je monitorování okolí jaderné elektrárny. Za normálního provozu slouží monitorování okolí jaderné elektrárny k potvrzování bezpečného provozu ve vztahu k okolí, v případě

mimořádného úniku radionuklidů do prostředí je základním východiskem ke zhodnocení rizika tohoto úniku a jeho dopadu na obyvatelstvo. Monitorování okolí se zahajuje 1 až 2 roky před zahájením provozu. Cílem je jednak získat podklady o původním stavu okolí budoucího zdroje, jednak prakticky ověřit program monitorování.“⁽⁶⁾

4.5 Ochrana před ionizujícím zářením v průmyslové defektoskopii

„Základním preventivním bezpečnostním opatřením, které při nakládání s defektoskopickými zdroji záření musí být implementováno do systému zabezpečování jakosti, je pravidelná údržba a kontrola zařízení.

Provádí se podle instrukcí stanovených výrobcem. Patří sem zejména pravidelná vizuální kontrola zařízení, testování opotřebovanosti spojovacích prvků, čištění funkčních prvků zařízení.

K dosažení co nejnižší expozice osob je zapotřebí správně vymezené kontrolované pásmo a jeho účinná ostraha v době expozice, použití stínících prostředků, optimální délka expozice, pravidelné monitorování pracoviště a pracovníků, důsledné používání kolimace svazku záření a co nejbezpečnější pracovní místo operátora a ostatních pracovníků při expozici.“⁽⁶⁾

4.6 Ochrana před ionizujícím zářením z radionuklidových měřidel

„Moderní automatizovaná výroba vyžaduje, aby výrobní proces byl průběžně kontrolován. Tato kontrola se velmi často provádí kontrolními přístroji obsahujícími radioaktivní zdroje. V češtině není pro tyto přístroje speciální název, obvykle se nazývají radionuklidová měřidla, v angličtině gauging devices. Jsou to kontrolní a měřicí přístroje využívající ionizující záření, emitované z jednoho nebo více uzavřených radionuklidových zářičů. Měřidla provádějí nedestruktivní ověřování některých vlastností materiálu. Obecně se využívají pro stanovení a kontrolu tloušťek materiálu, jeho hustoty, pro kontrolu dvou vrstev, kontrolu polohy daného objektu, úniku látky.

Jejich výhodou je, že nezasahují do výrobního procesu, nejsou v přímém kontaktu se sledovaným materiálem, a přitom mohou kontrolovat nebo monitorovat takové procesy, které jinými prostředky lze jen velmi obtížně sledovat.

Jedná se zejména o kontrolu velmi rychlých změn ve výrobním procesu, kontrolu materiálů o extrémně vysokých teplotách, kontrolu agresivních, chemických látek, kontrolu materiálů, které by se kontaktem mohly poškodit, kontrolu zabalených materiálů nebo materiálů, ke kterým je velmi obtížný přístup.

Tab. 8. Radioizotopy běžně používané v radionuklidových měřidlech.⁽⁶⁾

Radioizotop	Poločas rozpadu [rok]	Typ záření	Energie záření [MeV]
²⁴¹ Am	458	gama	0,060
¹³⁷ Cs	30	gama	0,662
⁸⁵ Kr	10,3	beta	0,672
⁶⁰ Co	5,2	gama	1,17 a 1,33

V zařízení používané uzavřené zdroje ionizujícího záření a jejich kryty musí splňovat požadavky dané technickými normami. Jednotlivé typy přístrojů a zařízení podléhají schválení dle vyhlášky č. 142/1997 Sb. o typovém schvalování.

Základní pravidlo, které musí být dodrženo pro všechna instalovaná a přenosná zařízení, je zabránění neautorizovaného proniknutí do primárního svazku a jeho blízkosti. Přístup může být znemožněn například uzavřeným pracovním prostorem, blokováním vstupu při zdroji v pracovní poloze, automatickým stíněním záření při narušení chráněného prostoru. U přenosných zařízení je nezbytné dodržovat předepsané pracovní postup, případně vymežit kontrolované pásmo.“⁽⁶⁾

4.7 Ochrana proti ionizujícímu záření při těžbě a zpracování uranu

„Těžba uranové rudy na území České republiky začala v roce 1858 v Jáchymově. Důvodem nevelké těžby uranu byly především potřeby průmyslu barviv, sklářství a keramiky. Opravdový rozvoj uranového hornictví začal v Čechách až po roce

1945. Poznání, že štěpení atomového jádra uranu může být prostředkem ničivé síly a politická situace v tehdejší době vedly k výrobě obrovského arzenálu jaderných zbraní. Surovinou se stal i československý uran. V průběhu půl století bylo na území České republiky prozkoumáno na 200 ložisek a 74 z nich bylo těženo.“⁽⁶⁾

4.7.1 Ochrana pracovníků při těžbě a zpracování uranu

„Pracovníci v podzemí uranových dolů jsou vystaveni třem možným způsobům ozáření. Je to zevní záření gama, ozáření z inhalace produktů přeměny radonu a ozáření z inhalace směsi dlouhodobých radionuklidů uran – radiové řady emitujících záření alfa. Díky používání ochranných a povinné hygienické očištění po vyfárání má minoritní význam depozice radionuklidů na kůži nechráněných částí těla horníků. Pracovníci jsou vybaveni osobními dozimetry všech tří složek ozáření. Pracovní prostředí v dole je z hlediska radiační ochrany monitorováno podle monitorovacího programu schváleného SÚJB.

V úpravách uranových rud je technologický proces uzavřen a automatizován tak, že vyžaduje malou personální obsluhu. Těmito technicko-organizačními opatřeními se výrazně snižuje riziko pro pracovníky. Nejvíce rizikovým pracovištěm je sušárna s plnírnou koncentráty. Na tomto pracovišti jsou pracovníci povinně vybaveni osobními ochrannými pomůckami včetně respirátorů a osobními integrálními dozimetry. Jsou stanovena pravidla pro přístup pracovníků do jednotlivých částí technologického procesu a pracoviště jsou dobře odvětrávána.“⁽⁶⁾

4.7.2 Ochrana obyvatel v okolí těžby a zpracování uranu

„Těžba a zpracování uranových rud ovlivňuje obyvatele ve svém okolí plynnými, kapalnými a pevnými přírodními radioaktivními látkami. U provozovaných dolů to může být zejména vzduch odváděný výdušnými jámami z důlního pole, prašnost těžebního a odvalového materiálu a možné účinky čerpané důlní vody. K minimalizaci

těchto vlivů je nutné provádět monitorování a přijímat technická opatření k nápravě vzniklého stavu.“⁽⁶⁾

5. Ukrytí obyvatelstva před účinky ionizujícího záření při vzniku radiační havárie

„Podstatou všech opatření ochrany osob před účinky a následky nadměrného ozáření je podstatné snížení kontaktu se zářením. Nejefektivnějším způsobem ochrany před radioaktivními látkami je ukrytí. Již pouhým pobytem v budovách za zavřenými okny se podstatně omezí účinky radioaktivního záření. Ukrytím však nesmí být omezena možnost poslechu stanovených rozhlasových, televizních a dalších informačních kanálů. Důležité je uzavřít okna, dveře, větrací otvory, vypnout větrání a klimatizaci, zabezpečit své potraviny a zásobu vody před možnou kontaminací zabalením do neprodyšných obalů a lahví, a uložením do chladničky, mrazničky či spíže, zabezpečit vodní zdroj (studnu) před kontaminací překrytím například polyetylenovou folií.

5.1 Doporučení pro ochranu před ionizujícím zářením doma

Jestliže se v době vyhlášení varovného signálu nachází občan doma, měl by dodržovat následující doporučení. Pokud možno shromáždit rodinu. Nesnažit se však vyzvednout děti ze škol a školek, či příbuzné z jiných zařízení (například zdravotních, ústavů sociální péče apod.). Bude o ně personálem těchto zařízení postaráno a zbytečný pobyt v nechráněném prostoru není příliš neprospěšný.

Vytvořit si možnost sledovat rozhlas, televizi i hlášení místního rozhlasu, připravit improvizované ochranné prostředky (ochrannou roušku, pokrývku hlavy, gumové holínky a rukavice nebo návleky na ruce a obuv z umělé hmoty a vhodné oblečení pro případ odchodu z budovy).

5.2 Doporučení pro ochranu před ionizujícím zářením v zaměstnání

Zaměstnanec by měl postupovat podle pokynů svých nadřízených nebo podle havarijních plánů, pokud je má pracoviště zpracované. Ve zdravotnických, sociálních, kulturních, dopravních a jiných zařízeních dodržovat pokyny jejich personálu.

5.3 Doporučení pro ochranu před ionizujícím zářením venku

Pokud zastihne občana vyhlášení varovného signálu mimo budovu, na volném prostranství, je nejvhodnější odebrat se neprodleně do nejbližší budovy nebo automobilu alespoň k provizornímu ukrytí.

5.4 Co dělat při styku s radioaktivní látkou

Pokud jste mohli přijít do styku s radioaktivními látkami z radiační havárie, je zapotřebí před vstupem do místností určených pro ochranu odložit obuv a svrchní oděv i ochrannou roušku nejlépe do neprodyšného obalu a již je nepoužívat. Omýt důkladně ruce, obličej a vlasy, vypláchnout oči, ústa, vyčistit nos a uši. Ihned nebo při nejbližší příležitosti se osprchovat a vyměnit prádlo.

5.5 Jak se chovat při nezbytném opuštění úkrytu

Pokud musíte z jakéhokoli důvodu opustit byt či budovu, v níž se ukrýváte, měli byste si chránit nos a ústa improvizovanými ochrannými rouškami (stačí navlhčený kapesník, ručník, přeložená gáza, toaletní papír). Chránit povrch těla (pokrývkou hlavy, šálem, pláštěm do deště s kapucí, gumovými holínkami nebo návleky na obuv z umělé hmoty) před opuštěním budovy.

5.6 Jodová profylaxe

Požítí jodových tablet se provádí až po výzvě ve sdělovacích prostředcích. Je nejúčinnější před příchodem radioaktivního oblaku. Jednou z látek unikajících při radiační havárii je radioaktivní jód. Aby se předešlo jeho hromadění ve štítné žláze

člověka a poškození zdraví, užívají se tablety s neradioaktivním jódem (KI), který nasytí štítnou žlázu a nepustí do ní radioaktivní jód. Budete-li vyzváni, použijte ihned jednu dávku jodových tablet a zapijte ji vodou. Pokud z nějakého důvodu nemáte tablety v dosahu, nevycházejte pro ně mimo budovu, ukrytí je důležitější.“⁽¹⁷⁾

Tab. 9. Dávkování při jodové profylaxi⁽¹⁷⁾

Novorozenci do 1 měsíce	Kojenci a děti do 3 let	Děti od 3 do 12 let	Osoby starší 18 let
¼ tablety (16 mg KI)	½ tablety (32 mg KI)	1 tableta (65 mg KI)	2 tablety (130 mg KI)

6. Evakuace obyvatelstva při vzniku radiální havárie

„Evakuace je velmi účinným ochranným opatřením. K jejímu provedení jsou připraveny evakuační plány, podle nichž jsou lidé evakuováni do předem stanovených příjmových obcí po vybraných trasách. Evakuační trasy jsou voleny tak, aby doprava po komunikaci byla plynulá a nedocházelo ke komplikacím. Evakuaci vyhlašuje, zabezpečuje a organizuje odpovědný orgán státní správy. Podrobnější údaje můžete získat na svém městském či obecním úřadě. Školy, předškolní a zdravotnická zařízení, sociální ústavy apod. mají vlastní evakuační plány. Pokyny k přípravě a zahájení evakuace budou vysílány rozhlasem, televizí a místním rozhlasem či jinými náhradními prostředky.

6.1 Příprava k evakuaci

Je vhodné mít předem připravený seznam věcí, které budete v případě evakuace brát s sebou. Evakuační zavazadlo pro řízenou evakuaci musí být malých rozměrů a mělo by obsahovat zejména:

✓ osobní doklady (občanský průkaz, pas, rodný list, řidičský průkaz, technické osvědčení vozidla, kartu zdravotní pojišťovny, zdravotní průkaz apod. včetně dokladů rodinných příslušníků)

- ✓ peníze, vkladní knížky, cenné papíry, platební a sporožirové karty, cennosti
- ✓ potřebné léky či recepty a zdravotnické pomůcky
- ✓ soupravu náhradního sezónního oblečení
- ✓ prostředky osobní hygieny
- ✓ spací pytel nebo přikrývku
- ✓ jídelní nádobí

Při samo-evakuaci samozřejmě můžete vzít vše, co potřebujete a uvezete. Věcem uzavřeným v domech a bytech se nic nestane.

6.2 Samo-evakuace

Kromě řízené evakuace můžete využít i samo-evakuace. Při použití vlastního krytého automobilu důkladně uvažte, zda:

- ✓ vozidlo je blízko místa, kde se ukrýváte, je v dobrém technickém stavu a má dostatečnou zásobu pohonných hmot,
- ✓ znáte dobře komunikaci k cílovému místu evakuace,
- ✓ jste způsobilí k jízdě.

6.4 Doporučení po vyhlášení evakuace

- ✓ zachovat klid
- ✓ sledovat pozorně hlášení rozhlasu, televize a místního rozhlasu a řídit se jejich pokyny
- ✓ vypnout elektrické spotřebiče s výjimkou chladniček a mrazniček, ve kterých jsou uloženy potraviny
- ✓ uhasit všechny otevřené ohně a spalovací zařízení
- ✓ uzavřít hlavní uzávěry plynu a vody
- ✓ nevypínat hlavní jistič elektrického proudu
- ✓ odpojit antény televizních a rozhlasových přijímačů
- ✓ překontrolovat uzavření oken v celé budově
- ✓ zabezpečit byt či dům proti zlodějům

Pokud máte užitková a hospodářská zvířata:

- ✓ uzavřít je ve chlévech či kotcích
- ✓ dát jim zásobu krmiva a vody asi na dva dny
- ✓ vyplnit tiskopis D - označení domu pro péči o zvířata a umístit jej na viditelném místě na dveře domu
- ✓ ke zvířatům umožnit přístup ošetřovatelům
- ✓ doplnit tiskopis E - zpráva pro evakuační orgány
- ✓ pokud jsou Vaše děti ve škole, školce či jiných dětských zařízeních, nechodit pro ně, budou evakuovány se svými pedagogy či doprovodem do příjmové obce, kde se s nimi shledáte, stejně jako s ostatními rodinnými příslušníky
- ✓ jste-li odkázáni na cizí pomoc, vyvěsit z okna na ulici, či zavěsit na kliku vstupních dveří z ulice bílý ručník, utěrku či prostěradlo. Takto označeným domácnostem bude při evakuaci poskytnuta pomoc záchrannými skupinami. K organizaci této pomoci velmi přispěje, vyplníte-li předem údaje tiskopisu C - zpráva pro obecní (městský) úřad.⁽¹⁷⁾

II. PRAKTICKÁ ČÁST

7. Cíle práce a hypotézy

Cílem této diplomové práce je podat přehledný a ucelený pohled na problematiku ochrany obyvatelstva před účinky ionizujícího záření. Cílem bylo také potvrdit či vyvrátit domněnku, že uhlí a uhelný odpad obsahují ionizující záření.

✓ První hypotéza: „Obyvatelé žijící v blízkém okolí povrchových uhelných dolů jsou ohroženi radiací z uhlí, uhelného prachu a z uhelného popílku“.

✓ Druhá hypotéza: „Radioaktivitu uhlí, uhelného prachu a uhelného popílku způsobuje zejména ^{90}Sr “.

8. Metodika

Metodika teoretické části diplomové práce spočívala ve shromažďování informací zejména z odborné literatury a internetových stránek. Přehledným uspořádáním získaných informací bych chtěl čtenáře srozumitelně obeznámit s problematikou ochrany před ionizujícím zářením. Praktická část diplomové práce zahrnovala odebrání vzorků, příprava vzorků, proměření a stanovení výsledných hodnot.

Pro praktickou část jsem zvolil problematiku prašnosti v blízkém okolí povrchového uhelného dolu. Tato část se skládá z odběru vzorků, měření prašnosti v dané lokalitě a z chemického rozboru uhelného prachu. Vzhledem k dané hypotéze se dělalo také stanovení obsahu stroncia a měření radiace u uhlí a uhelného prachu. Tuto problematiku jsem si zvolil vzhledem k faktu, že se v blízkosti tohoto dolu nachází mé trvalé bydliště. Cílem praktické části této práce bylo zjistit, zda je takto obdržená dávka záření zanedbatelná, či nikoliv. Vzhledem k tomu, že radioaktivní není jen uhelný prach, ale také popel, bylo provedeno stanovení obsahu stroncia a měření radiace i v uhelném popelu.

9. Výsledky

9.1. Měření prašnosti

Pro měření prašnosti bylo vybráno město Ledvice, které se nachází v okrese Teplice, kraj Ústecký, zhruba 4 km severně od Bíliny a 7 km jihozápadně od Teplic v Čechách. Ke dni 3. 7. 2006 zde žilo 564 obyvatel. Toto město se nachází v těsné blízkosti povrchového uhelného dolu. Měření bylo provedeno ve dnech 24.4., 25.4. a 26.4.2009 přístrojem Airchek Sampler model 224-PCXR7. U přístroje byl nastaven průtok na 2 litry za minutu. Měření probíhalo v průměru 61 minut. Pro odstranění vlhkosti byly filtry pro měření umístěny v exsikátoru. Před začátkem měření byly zváženy filtry i s kazetou. Po provedení měření prašnosti byly filtry znovu vloženy do exsikátoru a následně zváženy, a to opět společně s kazetou. Od této finální hmotnosti byla odečtena hmotnost počáteční a tím byla získána hmotnost zachyceného prachu.

Měření probíhalo v místnosti, kde bylo jedno křídlo okna vyklopeno do ventilační polohy. Odběr prachu se uskutečnil mimo hlavní topnou sezonu. V průběhu měření nebyly zaznamenány žádné dešťové srážky. Průměrný atmosferický tlak byl 1003,6 hPa.

Hygienické limity prašnosti přípustné pro vnitřní prostředí obytných místností je dáno vyhláškou č. 6/2003 Sb., kterou se stanoví hygienické limity chemických, fyzikálních a biologických ukazatelů pro vnitřní prostředí obytných místností některých staveb. V této vyhlášce se rozlišují dvě frakce prachu, a to PM10 a PM2,5. Frakce prachu PM10 obsahuje prachové částice s převládající velikostí částic o průměru 10 mikrom, které projdou speciálním selektivním filtrem s 50% účinností. Frakce prachu PM2,5 obsahuje prachové částice s převládající velikostí částic o průměru 2,5 mikrom, které projdou speciálním selektivním filtrem s 50% účinností. Tyto limity jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 10. Hygienické limity pro prašnost⁽²²⁾

Ukazatelé	Jednotka	Limit
Frakce prachu PM10	$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	150
Frakce prachu PM2,5	$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	80

Tyto limity odpovídají hodinovému odběru vzorků za standardních podmínek.

Tab. 11. Datum, čas a teplota při měření prašnosti

Den měření	Čas měření	Teplota vzduchu [°C]
24.04.09	9:07 – 10:08 (61 minut)	20 °C
25.04.09	19:18 – 20:20 (62 minut)	22 °C
26.04.09	18:25 – 19:25 (60 minut)	22 °C



Obr. 18. Příklad AIRCHEK SAMPLER pro měření prašnosti (foto: Miloš Řehák, duben 27, 2009)

Tab. 12. Hmotnost filtrů + kazet

Počáteční hmotnost [g]	Koncová hmotnost [g]	Hmotnost prachu [g]	Obsah prachu ve vzduchu [mg.m ⁻³]
0,83086	0,83129	0,00066	0,55
0,91876	0,91939	0,00063	0,508
0,95269	0,95330	0,00061	0,508

9.2. Chemická analýza uhelného prachu

Při chemickém rozboru byla zjištěna přítomnost stroncia, uranu a thália. Mimo tyto prvky byla zaznamenána přítomnost hliníku, křemíku, síry, draslíku, vápníku, titan, železa a uhlíku.

9.3. Měření radiace

Toto měření bylo provedeno u odebraných vzorků uhlí, uhelného prachu a uhelného popela. Toto měření bylo provedeno přístrojem Gamma I626. Byly naměřeny hodnoty, které byly nižší než přirozené radiační pozadí laboratoře. Z toho plyne, že uhlí obsahuje ionizující záření, ale intenzita je na tak nízké úrovni, že je zcela zanedbatelná.

9.4. Stanovení obsahu stroncia

Uhlí, uhelný prach a popel vznikající ze spalování uhlí obsahují stroncium. Stroncium se v základní formě nachází ve všech součástech životního prostředí – v horninách, půdách, vodách i v ovzduší. Řada jeho sloučenin je rozpustná ve vodě a to je důvod toho, že se poměrně snadno pohybuje v různých prostředích. Zvýšení koncentrace stroncia v ovzduší může být způsobeno spalováním fosilních paliv – uhlí a ropy.

Pro stanovení obsahu stroncia ve vzorcích byla použita rentgenfluorescenční spektroskopie (XRF). Měření bylo provedeno u sebraných vzorků uhelného prachu, vzorků z popela a vzorků z vrchní vrstvy prachových filtrů, které byly použity pro měření prašnosti. Jako uhelný prach byl použit hruboprach (HP) a průmyslová směs

(PS). Rozdíl mezi HP a PS je v tom, že HP má větší výhřevnost a také nižší obsah popela než PS. Popel byl použit jak z pevného uhlí, tak z uhelného prachu.

„XRF spektroskopie je jednou z nejrozšířenějších metod pro nedestruktivní prvkovou analýzu, která nachází uplatnění v oblasti průzkumu objektů kulturního dědictví. XRF patří do skupiny metod atomové spektroskopie subvalenčních elektronů. Jejich princip je založen na interakci atomů vzorku s proudem částic nebo záření o vysoké energii. Důsledkem je vyražení excitovaného elektronu z některé vnitřní dráhy atomu. Volné místo je okamžitě zaplněno elektronem z některé vyšší hladiny, což je spojeno s vyzářením energetického rozdílu ve formě fotonu nebo s vyražením tzv. Augerova elektronu. Tyto energetické rozdíly jsou charakteristické pro jednotlivé prvky. Rentgenfluorescenční spektroskopie využívá pro excitaci RTG, nebo γ záření a detekuje emitované charakteristické RTG záření.“⁽²⁰⁾

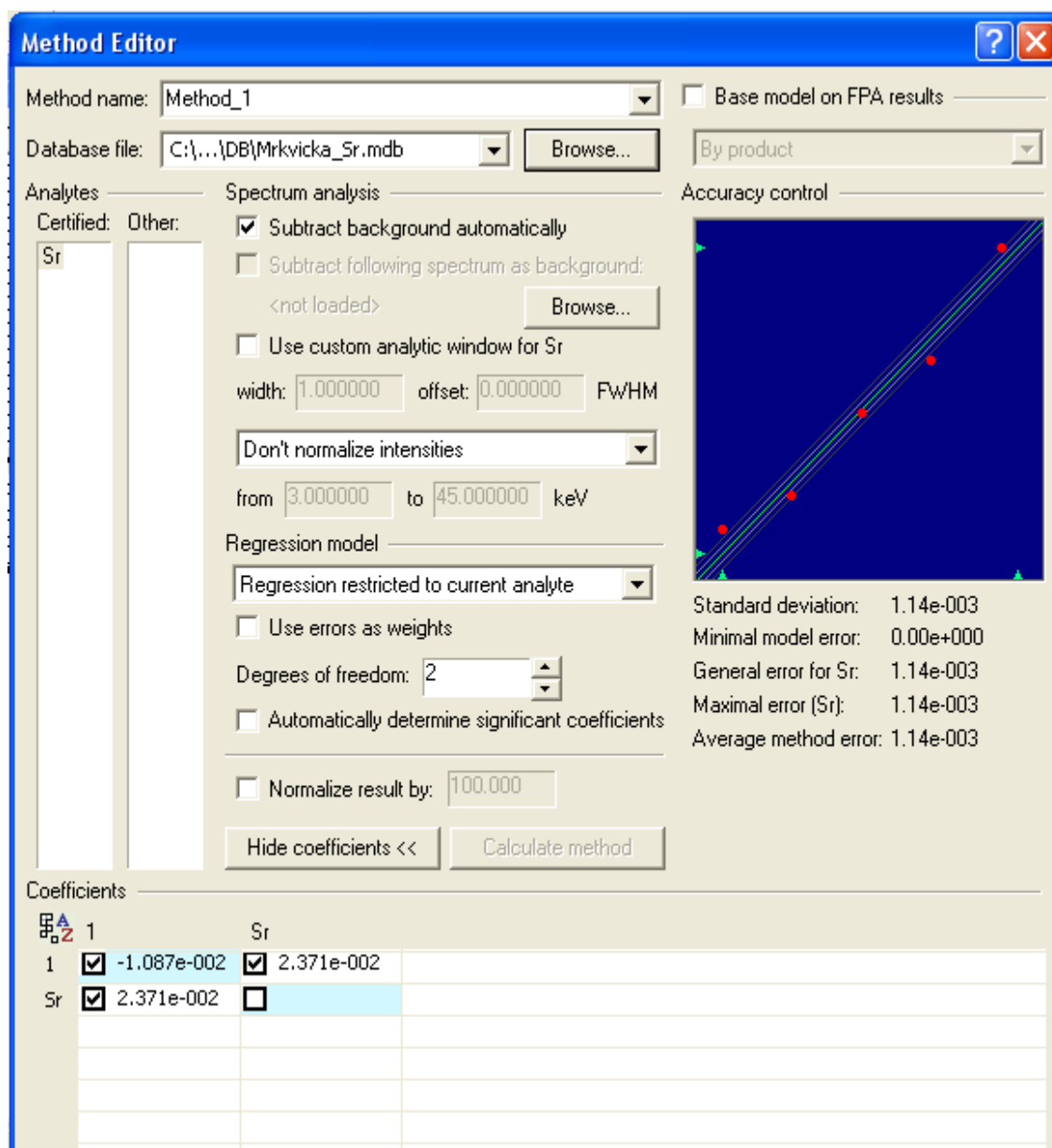
Toto měření bylo provedeno dne 7.4.2009 zprostředkovaně, a to díky panu Ing. Vratislavu Bednaříkovi, Ph.D. z Ústavu inženýrství ochrany životního prostředí fakulty Technologické na Baťově univerzitě ve Zlíně.

Výsledky XRF analýzy:

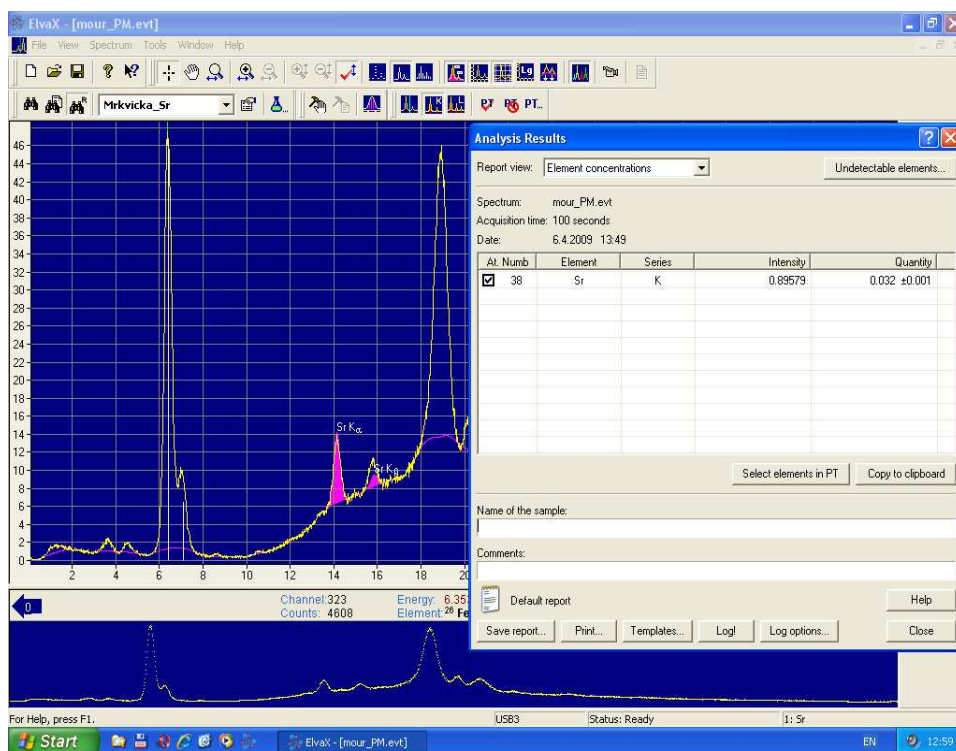
Přístroj: X-Ray Fluorescence Spectrometer ElvaX, Elvatech Ltd., Ukrajina

Podmínky měření: $I = 40 \mu\text{A}$, $U = 45 \text{ kV}$, $t = 100 \text{ s}$

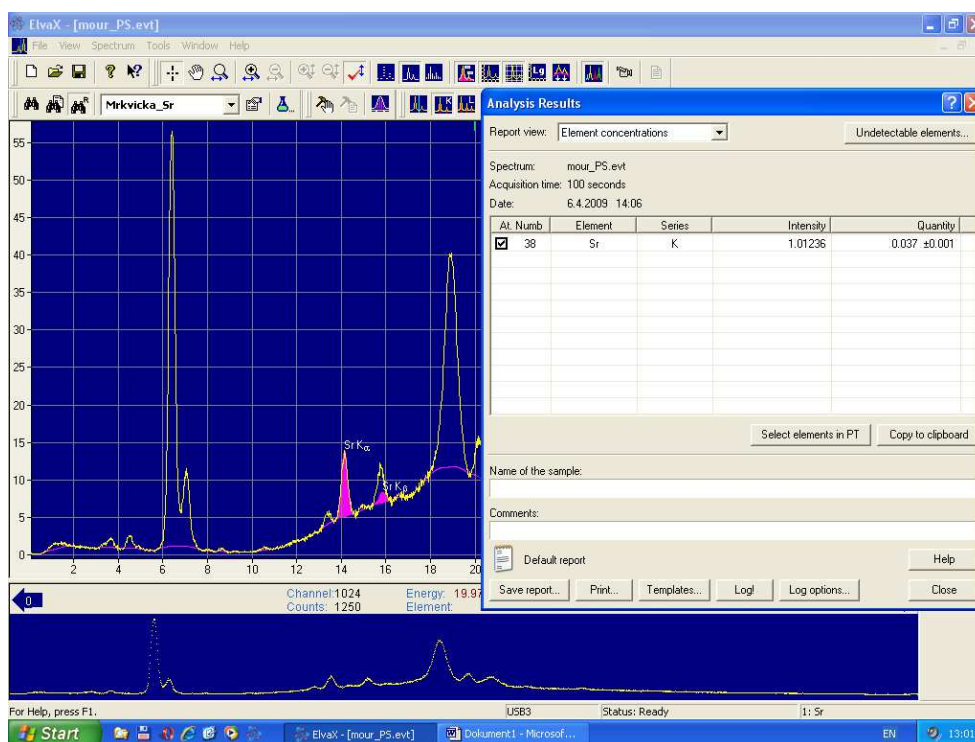
Kalibrace: Jako kalibrační standardy byly použity dodané směsi aktivního uhlí a SrCO_3 , koncentrace stroncia v rozmezí 0,01 - 0,5 %. Pro Kalibraci byly použity standardy 0,01 - 0,04 % Stroncia.



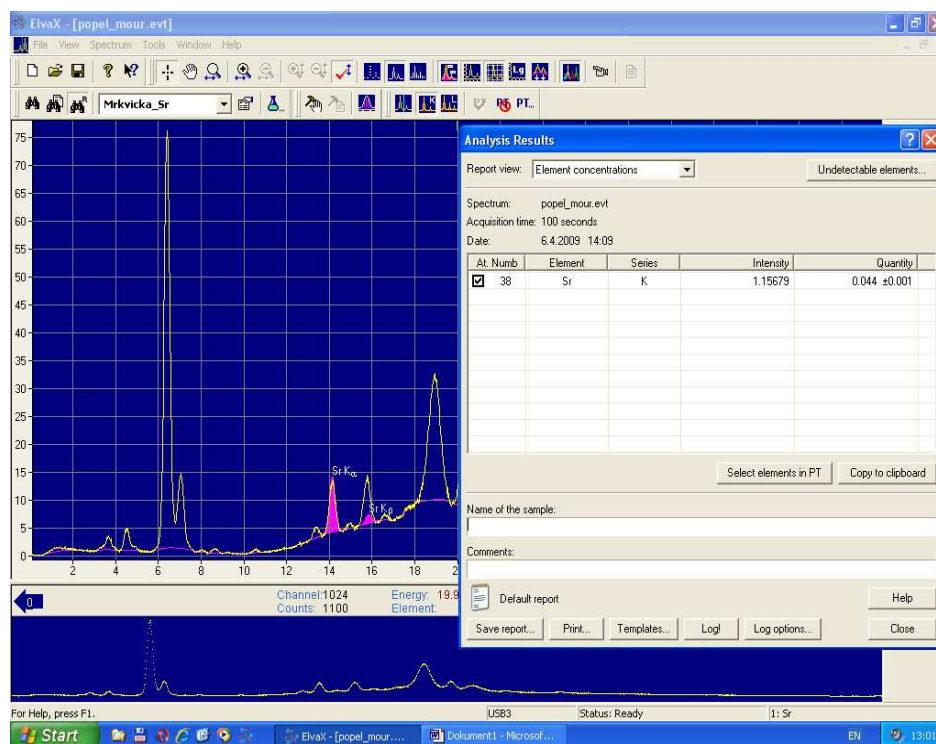
Obr. 19. Kalibrační křivka + parametry regresního modelu



Obr. 20. Vzorek: mour HP (hruboprach)



Obr. 21. Vzorek: mour PS (průmyslová směs)



Obr. 22. Vzorek: popel z uhlého prachu (HP)

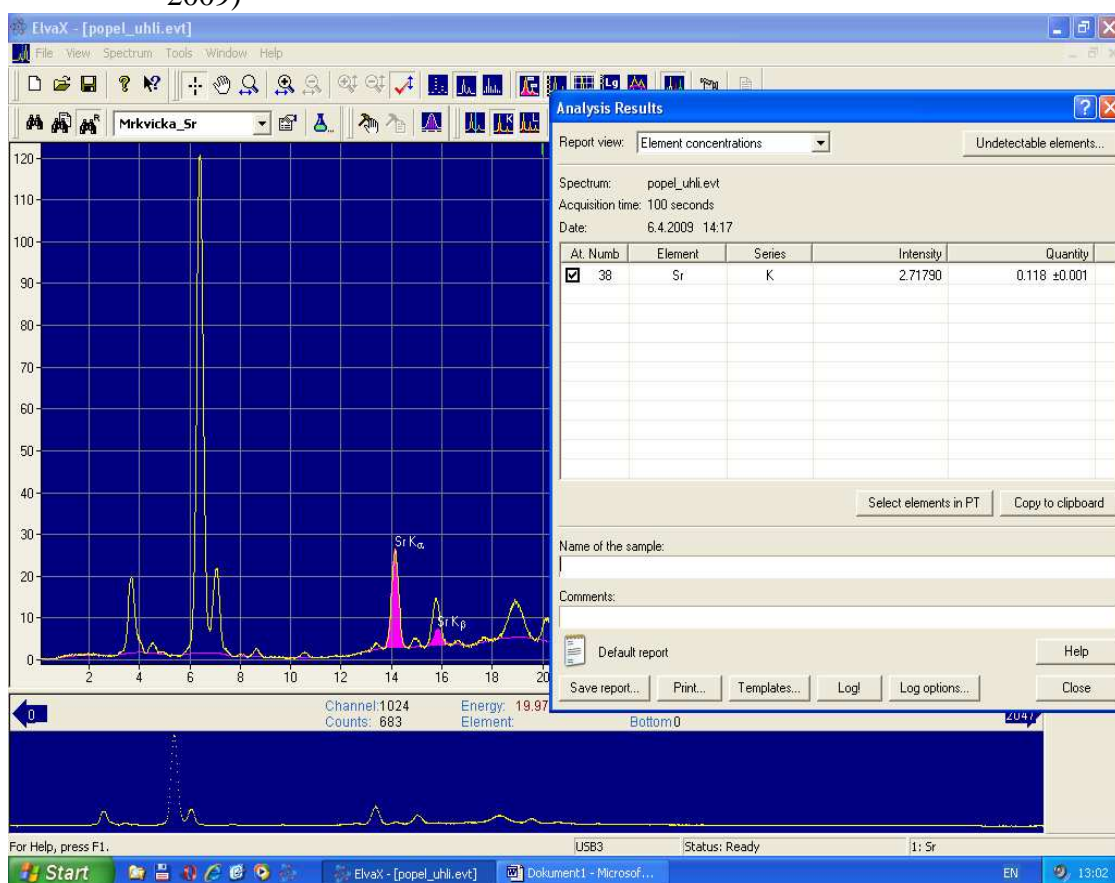
Popel byl získán spálením na železné vypálené desce pod kterou hořel oheň. Odebrána byla jen svrchní část, aby nedošlo ke kontaminaci ze železné desky. Stejným způsobem se spalovalo i uhlí.



Obr. 23. Spalování uhlého prachu (foto: Miloš Řehák, březen 12, 2009)



Obr. 24. Spálený uhelný prach (foto: Miloš Řehák, březen 12, 2009)



Obr. 25. Vzorek: popel z uhlí

Shrnutí výsledků:

Tab. 13. Výsledný obsah stroncia ve vzorcích (%)

vzorek	obsah ⁹⁰ Sr dle XRF (%)
MOUR HP	0,032
MOUR PS	0,037
POPEL HP	0,044
POPEL UHLÍ	0,118

Ve vzorcích filtrů bylo stroncium rovněž detekováno, ale nelze provést vyhodnocení pomocí dané kalibrace (odlišná matrice, příliš malé množství vzorku).

10. Diskuse

Myslím si, že každý občan by měl mít alespoň základní znalosti o možnostech vlastní ochrany před účinky ionizujícího záření. O těchto možnostech jsou dobře informováni ti, kteří žijí v okolí jaderných elektráren. Od příslušného úřadu, v místě svého bydliště, dostávají brožury s informacemi o tom jak se chovat při vzniku radiační havárie. Také mají k dispozici tablety jodidu draselného, pro zablokování štítné žlázy. O tom jak se chovat při vzniku radiační havárie pojednávají kapitoly číslo 5 a 6.

Také je důležité vědět co to vlastně ionizující záření je. Pokud má člověk alespoň základní znalosti o vlastnostech ionizujícího záření, je schopen lépe porozumět principům ochrany proti tomuto záření. O vlastnostech ionizujícího záření je kapitola číslo 2.

Ve třetí kapitole čtenář nalezne historii vývoje ochrany obyvatelstva, základní legislativu uplatňující se v ochraně obyvatelstva, ale především základní obecné možnosti ochrany před ionizujícím zářením. Čtvrtá kapitola pak popisuje ochranu před ionizujícím zářením v různých oblastech působení.

V praktické části se zabývám problematikou radiační zátěže obyvatel žijících v blízkém okolí uhelných povrchových dolů. Tito obyvatelé se každý den potýkají s problémem, kterým je zvýšená hodnota prašnosti v jejich okolí. To je způsobeno jemným uhelným prachem, který je unášen větrem a je tak jemný, že není možné zabránit jeho proniknutí do domů, či bytů. Horníci a lidé pracující v uhelných dolech často trpí antrakózou plic. Je to onemocnění způsobené „zaprášením“ plic uhelným prachem. Uhlý prach se střeďává v plicním parenchymu, přičemž ale nedochází k fibróze plicní tkáně. Toto onemocnění se často vyskytuje u horníků, avšak objevuje se i u běžné populace žijící v znečištěných oblastech. Dalším rizikem pro obyvatele takto znečištěné oblasti může byt také radioaktivita uhlí a tedy i uhelného prachu a popílku.

Při měření prašnosti jsem došel k jednoznačnému závěru. V této oblasti jsou překročeny hygienické limity pro prašnost. Povoleno limit je $150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ pro frakci prachu PM10 a $80 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ pro frakci prachu PM2,5. Naměřené hodnoty byly v průměru $522 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Neměl jsem možnost určit typ frakce odebraného vzorku prachu. Přesto je

zřejmé, že limity jsou několikrát překročeny. Této skutečnosti si je vědoma obec i podnik vlastníci uhelný lom. Proto mají obyvatelé tohoto města značné výhody, kterými podnik kompenzuje toto překročení limitů prašnosti.

Již dlouhou dobu existují spekulace o přítomnosti ionizujícího záření v uhlí. Domníval jsem se, že tuto radioaktivitu způsobují zejména radioaktivní izotopy stroncia a to hlavně izotop ^{90}Sr . Četl jsem článek jehož autor ve své práci zmiňoval přítomnost ^{90}Sr v hnědém uhlí. Tímto byla také má domněnka podpořena. Podle rentgenfluorescenční spektroskopie zkoumané vzorky opravdu obsahují stroncium. Jenže tyto izotopy jsou stabilní, což znamená že nejsou radioaktivní. Uhlí totiž nemůže obsahovat radioaktivní izotop ^{90}Sr . Radioaktivní látka má určitý poločas rozpadu. To je doba za kterou se sníží její aktivita na polovinu. Pokud proběhne 10 poločasů přeměny, můžeme předpokládat, že látka již téměř nevykazuje známky radiace. Problém je v tom, že poločas přeměny pro izotop ^{90}Sr je 29 let. Z toho plyne, že uhlí by muselo být staré maximálně 300 let. Přitom stárí uhlí se odhaduje na několik desítek milionů let. Další možností by bylo, že ^{90}Sr vzniká v uhlí radioaktivní přeměnou například z uranu nebo z thoria. Jenže žádná z rozpadových řad (uranová, aktinuranová, thoriová, naptuniová) stroncium neobsahuje. Je tedy jisté, že ^{90}Sr radioaktivitu uhlí nezpůsobuje. Otázkou tedy je „co ji způsobuje?“. Podle chemického rozboru vzorku uhlí je příčinou přítomnost ^{238}U , ^{232}Th a ^{14}C .

Po proměření vzorků na zjištění přítomnosti ionizujícího záření jsem došel k závěru, že uhlí obsahuje ionizující záření, ovšem jeho intenzita je zcela zanedbatelná. Vyšší intenzitu mělo i přirozené radiační pozadí v laboratoři, kde měření probíhalo.

11. Závěr

Ionizující záření využívá téměř každý z nás. Vyrábí se s jeho pomocí elektřina, používá se k diagnostickým a léčebným účelům, ale jen málo lidí si uvědomuje co to vlastně ionizující záření je. Doufám, že tato práce bude sloužit odborné i laické veřejnosti jako ucelený přehled informací o vlastnostech a účincích ionizujícího záření.

Po provedení všech potřebných měření jsem dospěl k závěru, že první hypotéza: „Obyvatelé žijící v blízkém okolí povrchových uhelných dolů jsou ohroženi radiací z uhlí, uhelného prachu a z uhelného popílku“ není pravdivá. Vyvrácena byla také druhá hypotéza „Radioaktivitu uhlí, uhelného prachu a uhelného popílku způsobuje zejména ^{90}Sr “.

12. Použitá literatura

- 1) ÖSTERREICHER, J., VÁVROVÁ, J. *Přednášky z radiobiologie*. 1. vydání. Praha: Manus, 2003, s. 116, ISBN 80-86571-01-7
- 2) NAVRÁTIL, L., ROSINA, J. *Medicínská biofyzika*. 1. vydání. Praha: Grada Publishing, a.s., 2005, s. 524, ISBN 80-247-1152-4
- 3) KUNA, Pavel. Možnosti chemické radioprotekce v případě neutronového ozáření organismu. *Vojenské zdravotnické listy*. 1978, roč. 47, č. 6, s. 237 – 244.
- 4) KUNA, P. Chemická radioprotekce. Praha: Babáková sbírka č. 72, 1985, s. 148.
- 5) KUNA, P., NAVRÁTIL, L. *Klinická radiobiologie*. 1. vydání. Praha: Manus, 2005, s. 222, ISBN 80-86571-09-2.
- 6) KLENER, V. a kolektiv. *Principy a praxe radiační ochrany*. Praha: Azin CZ, 2000, s. 620, ISBN 80-238-3703-6.
- 7) KLENER, V. *Hygiena záření*. 1. vydání. Praha: Avicenum, 1988, s. 472.
- 8) KIEFER, J. Biological radiation effects. Berlin: Springer – Verlag, 1990, s. 444, ISBN 3-540-51089-3.
- 9) HRAZDIRA, I., MORNSTEIN, V. *Lékařská biofyzika a přístrojová technika*. 1. vydání. Brno: Neptun, 2001, s. 396, ISBN 80-902896-1-4.
- 10) FREMUTH, F. *Účinky záření a chemických látek na buňky a organismus*. 1. vydání. Praha: SPN, 1981, s. 272.
- 11) NERUDA, O., PETÝREK, P., PODZIMEK, F. *Závažnost povrchové a vnitřní kontaminace produkty jaderného výbuchu a význam příslušných opatření*. Příloha k závěrečné zprávě úkolu LE-SO-03, Hradec Králové: VLVDÚ JEP, 1985.
- 12) FUKÁTKO, T. *Detekce a měření různých druhů záření*. 1. vydání. Praha: BEN-technická literatura, 2006, ISBN 80-7300-193-4.
- 13) LINHART, P., ŠILHÁNEK, B. *Ochrana obyvatelstva v Evropě*. 1. vydání. Praha: MV-generální ředitelství hasičského záchranného sboru ČR, 2005, s. 196, ISBN 80-86640-55-8
- 14) Ullmann, Vojtěch. Radiační ochrana
<http://astronuklfyzika.cz/RadiacniOchrana.htm>

15) Wikipedia – otevřená encyklopedie

<http://cs.wikipedia.org>

16) Zákon č. 18/1997 Sb. o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření

http://www.sujb.cz/docs/Z18_1997Sb.pdf

17) JE Dukovany – Příručka pro ochranu obyvatel při radiační havárii jaderné elektrárny Dukovany

<http://www.namestnosl.cz/storage/jedu-prirucka.pdf>

18) UNSCEAR Report 2000: Sources and Effects of Ionizing Radiation.

http://www.unscear.org/unscear/en/publications/2000_2.html

19) Český hydrometeorologický ústav

<http://www.chmi.cz/>

20) Barrande I. Vědecko-výzkumné centrum kulturního dědictví České republiky

<http://barrande.nm.cz>

21) Ministerstvo vnitra České republiky

<http://www.mvcr.cz/>

22) Vyhláška č. 6/2003 Sb. kterou se stanoví hygienické limity chemických, fyzikálních a biologických ukazatelů pro vnitřní prostředí pobytových místností některých staveb

<http://www.tzb-info.cz/>

13. Seznam obrázků

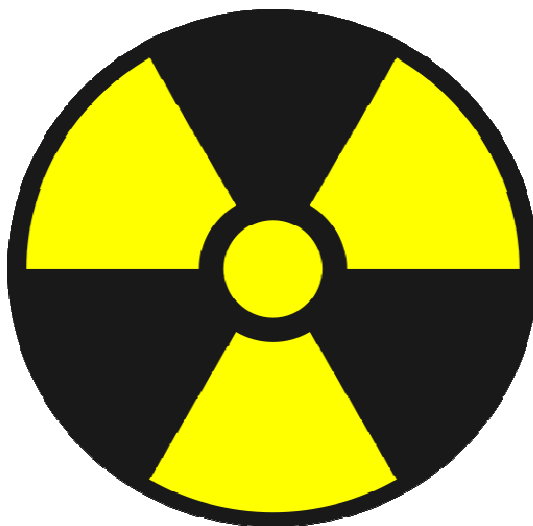
Obr. 1. Příspěvky různých zdrojů k ozáření člověka. Celkem 2 - 3 mSv na obyvatele ročně. ⁽¹⁷⁾	15
Obr. 2. Základní schéma radioaktivity α . ⁽¹⁴⁾	17
Obr. 3. Základní schéma radioaktivity β^- . ⁽¹⁴⁾	18
Obr. 4. Základní schéma radioaktivity β^+ a elektronový záchyt. ⁽¹⁴⁾	19
Obr. 5. Základní schéma radioaktivní přeměny γ a následná deexcitace. ⁽¹⁴⁾	20
Obr. 6. Průnik záření vybranými druhy materiálů. ⁽¹⁷⁾	20
Obr. 7. Tři způsoby interakce záření γ s látkou. ⁽¹⁴⁾	23
Obr. 8. Základní schéma elektronického detektoru záření ⁽¹⁴⁾	31
Obr. 9. Osobní filmový dozimetr ⁽¹⁴⁾	32
Obr. 10. Schématické znázornění principu ionizační komory pro detekci ionizujícího záření ⁽¹⁴⁾	33
Obr. 11. Schématické znázornění principu G.-M. detektoru ⁽¹⁴⁾	34
Obr. 12. Schématické znázornění principu scintilačního detektoru ⁽¹⁴⁾	36
Obr. 13. Schématické znázornění principu polovodičového detektoru ⁽¹⁴⁾	38
Obr. 14. Ochranná Pb zástěra a ochranný Pb límec. (foto: Miloš Řehák, duben 07, 2007)	47
Obr. 15. Ovladovna RTG přístroje. (foto: Miloš Řehák, duben 07, 2007).....	48
Obr. 16. RTG přístroj Philips. (foto: Miloš Řehák, duben 07, 2007).....	49
Obr. 17. Ochranné dveře s Pb vložkou. (foto: Miloš Řehák, duben 07, 2007).....	50
Obr. 18. Přístroj AIRCHEK SAMPLER pro měření prašnosti (foto: Miloš Řehák, duben 27, 2009)	69
Obr. 19. Kalibrační křivka + parametry regresního modelu.....	72
Obr. 20. Vzorek: moučkový prášek (HP)	73
Obr. 21. Vzorek: moučkový prášek (průmyslová směs).....	73
Obr. 22. Vzorek: popel z uhelného prachu (HP)	74
Obr. 23. Spalování uhelného prachu(foto: Miloš Řehák, březen 12, 2009)	74
Obr. 24. Spálený uhlí (foto: Miloš Řehák, březen 12, 2009)	75
Obr. 25. Vzorek: popel z uhlí	75

14. Seznam tabulek

Tab. 1. Průměrná roční, celosvětová efektivní dávka v roce 2000 z přírodních a umělých zdrojů záření (mSv). ⁽¹⁸⁾	16
Tab. 2. Odhad prahových dávek pro různé tkáně. ⁽⁷⁾	27
Tab. 3. Velikost polovrstvy pro vybrané materiály	28
Tab. 4. Základní limity stanovené vyhláškou č. 307/2002 Sb. ⁽⁵⁾	45
Tab. 5. Množství prošlého rentgenového záření v závislosti na stínícím ekvivalentu a anodovém napětí. ⁽⁶⁾	47
Tab. 6. Přibližná radiační zátěž pro nejčastější metody rentgenové diagnostiky ⁽¹⁴⁾	50
Tab. 7. Přibližná radiační zátěž pro nejčastější metody radioisotopové diagnostiky ⁽¹⁴⁾	53
Tab. 8. Radioizotopy běžně používané v radionuklidových měřidlech. ⁽⁶⁾	58
Tab. 9. Dávkování při jodové profylaxi ⁽¹⁷⁾	62
Tab. 10. Hygienické limity pro prašnost ⁽²²⁾	69
Tab. 11. Datum, čas a teplota při měření prašnosti.....	69
Tab. 12. Hmotnost filtrů + kazet.....	70
Tab. 13. Výsledný obsah stroncia ve vzorcích (%)	76

15. Přílohy

Příloha č. 1. Znak radioaktivity⁽¹⁵⁾



Příloha č. 2. Míchání vzorků pro měření obsahu stroncia (foto: Miloš Řehák, březen 16, 2009)



Příloha č. 5. Filtr a obal pro měření prašnosti (foto: Miloš Řehák, duben 25, 2009)



Příloha č. 6. Vzorčky pro stanovení obsahu stroncia (foto: Miloš Řehák, březen 16, 2009)

