



Zdravotně
sociální fakulta
Faculty of Health
and Social Sciences

Jihočeská univerzita
v Českých Budějovicích
University of South Bohemia
in České Budějovice

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích
Zdravotně sociální fakulta
Ústav radiologie, toxikologie a ochrany obyvatelstva

Bakalářská práce

Využití ionizujícího záření v archeologii

Vypracovala: Sandra Horáková
Vedoucí práce: prof. Dr. Friedo Zölzer, Ph.D.

České Budějovice 2016

Abstrakt

Radioaktivita a ionizující záření jsou neoddelitelnou součástí našeho života a doprovází celý vývoj života na Zemi. Člověk je nemůže vnímat vlastními smysly, i když je prostředí kolem nás protkáno neviditelnými paprsky, které velmi výrazně ovlivňují celou řadu procesů. Toto záření může člověka negativně ovlivnit, kdy po překročení určité hranice může způsobit těžká onemocnění, ale i smrt. Proto je brán zřetel na intenzitu záření, její druh, celkové dávky a odpovídající dobu, po kterou je člověk záření vystaven. Při manipulaci se zdroji ionizujícího záření se bere ohled na dodržování zásad radiační ochrany. Ionizující záření nám přineslo i mnoho užitečných poznatků. Převratných změn se dočkala medicína, zemědělství, průmysl, věda i archeologie.

Metody využívající ionizující záření ke studiu archeologických artefaktů nalezly v oblasti archeologie významné místo. Archeologové za pomoci použití ionizujícího záření získávají daleko ucelenější pohled do minulosti. Hlavní oblastí využití jsou určování stáří daných objektů, dokazování pravosti artefaktů a analýzy složení předmětů k určení původu. Dnes existuje řada různých metod, avšak pro oblast archeologie jsou brány v úvahu jen takové, které nepoškozují zkoumaný předmět. To je základní omezující faktor pro tuto oblast, protože památky představují nenahraditelné kulturní dědictví. Další omezení představuje náročnost a vysoká cena metod, z toho plyne použití většiny metod v dobře vybavených laboratořích. Nicméně přístroje i metody se neustále vylepšují a konkrétně v archeologii se například materiály analyzují pomocí hmotové spektrometrie, emisní i absorpční spektrometrie, jakož i aktivační analýzy. Z tohoto směru se jedná o aktuální téma.

V této oblasti je známá celá řada dnes již moderních metod. Ovšem ne každá je pro daný typ materiálu vhodná. Každá metoda se vždy hodí jen pro úzký okruh daných látek i omezený rozsah stáří. Tato práce je zaměřena na metody s využitím ionizujícího záření, které jsou nejčastěji používané a typické pro tento obor. Nabízí se tedy otázka, zda při archeologických výzkumech existují významná rizika z hlediska radiační ochrany. Pro objasnění této otázky jsou v práci popsány vybrané metody a na jednu z nich, konkrétně rentgenfluorescenční analýzu je provedeno praktické měření. Výběr

této metody spočíval v její časté použitelnosti mezi archeology, jelikož samotný přístroj mobilní analyzátor lze použít v terénu.

Teoretická část práce je zaměřena na základní poznatky o ionizujícím záření, které jsou důležité pro pochopení řešené problematiky. Jedná se o základní pojmy, jako jsou radioaktivita, ionizující záření a jeho dělení a radiační ochrana. V souvislosti s radiační ochranou jsou nastíněny i deterministické a stochastické účinky. Dále jsou popsány základní způsoby ochrany před ionizujícím zářením a biologické účinky tohoto záření na člověka. Vymezeny jsou i limity, které jsou součástí principů radiační ochrany. Pro ucelený přehled je v teoretické části krátce popsána radiační zátěž populace.

Další část bakalářské práce se věnuje výzkumu, tedy přehled vybraných metod, u kterých je ionizující záření používáno. Vybráno bylo sedm metod, které se nejčastěji používají a jsou typické pro obor archeologie. Radiouhlíková metoda s velkou přesností určuje stáří archeologických předmětů na principu stanovení koncentrace uhlíku ^{14}C . Neutronová aktivační analýza udává prvkové složení daného vzorku a funguje na základě vystavení vzorku proudem tepelných neutronů v jaderném reaktoru nebo v generátoru neutronů. Aktivační analýza s nabitými částicemi stanovuje prvkovou koncentraci v povrchové vrstvě pevných vzorků. Je založena na využití jaderných reakcí vytvářející radioaktivní nuklidy z jader stabilních prvků ve zkoumaném vzorku. Tato metoda vyžaduje dostatečně mohutný zdroj a tím nejlepším je jaderný reaktor. Emise záření vyvolané těžkými nabitými částicemi umožňuje analyzovat elementární složení materiálu od sodíku až po uran. Budicím zářením jsou zde protony a jejich zdrojem je urychlovač, díky kterému je dostupnost metody velmi omezena. Na vzorek se nejčastěji používá proud protonů nebo α částic o energii 2-5 MeV. Elektronová mikrosonda používající svazek elektronů umožňuje získat údaje o chemickém složení povrchu zobrazeného elektronovým mikroskopem. Termoluminiscenční datování zjišťuje stáří keramických materiálů, které je založené na jaderných procesech. Při studiu termoluminiscence se měří světlo, emitované látkou při jejím ohřevu, kdy zdrojem excitace je tepelná energie.

Praktické měření bakalářské práce představuje výsledky rentgenfluorescenční analýzy. Archeologický ústav Jihočeské univerzity používá právě touto metodou a

konkrétně byl použit mobilní analyzátor Thermo Scientific NITON XL2 GOLDD. Slouží ke kvantitativní analýze vzorků a primární zdroj je nízkovýkonová minirentgenka 45 kV/2,0 W se stříbrnou anodou. Pro měření dávkového příkonu od přístroje NITON XL2 GOLDD byl použit měřič dávkového příkonu FH 40G-10, který zapůjčila jaderná elektrárna Temelín. Rozsah tohoto přístroje je 10 nSv/h – 1 Sv/h.

K tomuto měření bylo vybráno několik předmětů jako bronzový meč, ocelové závaží o \varnothing 4 cm a stříbrná mince o \varnothing 1 cm. Měření probíhalo na základě kontaktního přiložení mobilního analyzátoru ke zkoumanému předmětu, na kterém byla provedena analýza složení. Současně byl změřen dávkový příkon přístrojem FH 40G-10 přes měřený předmět. Bylo zjištěno, že s rostoucí vzdáleností měřiče dávkového příkonu od mobilního analyzátoru, byl prokazatelný úbytek dávkového příkonu. Ze vzdálenosti 10 cm byla hodnota 24,3 μ Sv/h naopak vzdálenost 50 cm ukazovala naměřenou hodnotu pouze 8,43 μ Sv/h. Proběhlo měření i na ruku člověka, který mobilní analyzátor obsluhoval. Naměřené hodnoty ukázaly, že člověk držící mobilní analyzátor není vystaven radiační zátěži. Pro ucelený přehled byl zkoumaný předmět změřen před ozářením i po ozáření mobilním analyzátozem a naměřené hodnoty dávkového příkonu se od sebe nijak nelišily a byly srovnatelné s přirozeným pozadím.

Z měření vyplývá, že člověk obsluhující přístroj dle pokynů není vystaven radiační zátěži. Nejvyšší je hodnota 124 mSv/h byla naměřena kontaktně na mobilním analyzátoru bez zkoumaného předmětu. Tato hodnota by mohla ohrozit zdraví, pokud by obsluhující pracovník nedbal pokynů bezpečného zacházení a došlo by k expozici přímo na kůži člověka. Z toho důvodu zde není vysoké riziko, ale nemůžeme jej zcela vyloučit. Ostatní metody, které k ozáření potřebují jaderný reaktor, musí zajistit mnohem vyšší stupeň radiační ochrany v porovnání s mobilními analyzátory při práci v terénu.

Klíčová slova: ionizující záření, mobilní analyzátor, měření dávkového příkonu, radiační zátěž, archeologické metody

Abstract

Radioactivity and ionizing radiation (rays) compose an integral part of our life and they accompany the whole evolution of life on the Earth. A human is not able to perceive the radiation by its own senses; nevertheless the environment around us is full of these invisible rays which considerably affect a wide range of processes. The radiation can affect humans, after crossing certain boundaries; it can cause a severe illness, as well as death. It is, therefore, important to take into the account an intensity of the radiation, the integrated dose rates and corresponding period during which a person is exposed to the radiation. Handling the radiation sources must take into the consideration the adherence with the principles of the radiation protection. Ionizing radiation has brought us many useful findings. The medicine, agriculture, industry, science and archaeology had experienced the breaking changes.

The methods using ionizing radiation for studying the archaeological artefacts have found an important place in the archaeology. The archaeologists using the ionising radiation are receiving far more comprehensive view into the past. The main area of this identification is the age of the objects, proving their authenticity and the composition analyses to determine the object origin. There is number of different methods, but for the archaeology only those methods that do not impair the subject investigated are taken into the account. This is a fundamental limiting factor for this area, as far as the monuments create an irreplaceable cultural heritage. The other limitations are difficulty and high price of the methods, implying that most of the methods can be used in well-equipped laboratories only. But the instruments and the methods are being constantly improved, and specifically in the archaeology, the materials are analysed by the volumetric spectrometry, emission and absorption spectrometry, as well as by the activation analysis. From this perspective it is very actual topic.

There are number of modern methods in this area. However, not all of them are suitable for a certain material. Every method is usually suited for a narrow range of dedicated elements and limited range of ages only. This work is focused on the methods using ionizing radiation, which are the mostly used and typical for this field. Thus, the question is, whether there are any significant risks for the archaeological research in

terms of the radiation protection. In order to clarify this issue, this material describes various methods and presents the results of practical measurements for the roentgen-fluorescent method. This method was selected due to its frequent usability by the archaeologists, and because the mobile analyser can be used in the field.

The theoretical part of this report is focused on the basic knowledge about ionizing radiation, which is important for the understanding the issue. This is about the basic terms, such as radioactivity, ionizing radiation and its kinds, and radiation protection. In the context of radiation protection, the deterministic and stochastic effects of the ionizing radiation are outlined. The basic methods of protection against ionizing radiation and the biological effects of radiation on a human body are also described. Also the limits, embodied in the principles of radiation protection, are described. For the comprehensive overview, the radiation burden of the population is briefly described in the theoretical part of this material.

The next part of this bachelor degree report is the methodology of the research, i.e., summarizes the overview of the selected methods, in which the ionizing radiation is used. Seven methods that are most commonly used and are typical for the archaeology are described. The radiocarbon method is unique for its accuracy, because it determines the age of archaeological objects based on the residual concentration of carbon ^{14}C . The neutron activation analysis determines the composition of the sample, after the irradiation of the sample by thermal neutrons from the nuclear reactor or the neutron generator. The analysis using the elements excitation determines the concentration of the elements in the surface layer of the solid samples. It is based on the nuclear reactions generating the radioactive nuclides from the nucleuses of the stable elements in the analysis of the sample. This method requires a reliable and powerful neutron source, preferably the nuclear reactor. Monitoring the emissions of the induced radiation allows to analyse the spectrum of the material composition from the sodium to uranium. The radiation source for the elements exciting is the proton beam generated in the accelerator, which is very limited on its availability, so the method also. The most commonly method used is a beam of protons or α particles with the energy of 2-5 MeV applied on the sample. The electron microprobe using a beam of electrons allows to

obtain the data about the chemical composition on the surface of the sample with the use of the electron microscope. The thermos-luminescent method checks the age of the ceramic materials, which is based on the nuclear processes also. The thermos-luminescence method is based on the measurement of the light emitted from a substance when it is heated up when the source of excitation is the thermal energy.

Practical measurement of the bachelor degree report presents the results of the roentgen-fluorescent analysis. Archaeological Institute of the University of South Bohemia use this method and specifically the mobile analyser Thermo Scientific NITON XL2 GOLDD. It is being used for a quantitative analysis of the samples with the primary source of low power mini roentgen tube 45 kV/W with silver anode. For the dose rate measurement from the NITON XL2 GOLDD meter, the FH-40-10 dose rate meter was used, borrowed from the nuclear power plant Temelin. Its range is 10 nSv/h - 1 Sv/h.

Several items were selected for the measurement, such as the bronze sword, steel weight with the diameter of 4 cm and silver coin with the diameter of 1 cm. The measurement was accomplished after a contact application of the mobile analyser on the investigated subject, for the analysis of its composition. At the same time the dose input was measured by the FH-40-10 meter over the measured subject. It was found that with the increasing distance of the dose rate meter from the mobile analyser, decrease of the dose rate can be demonstrated. From the distance of 10 cm, its value was 24.3 $\mu\text{Sv/h}$, with the distance 50 cm the dose rate value was only 8.43 $\mu\text{Sv/h}$. A person's hand serving the mobile analyser was measured also. Readings showed that the person holding the mobile analyser is not exposed with the radiation burden. For a comprehensive overview, the subject under the investigation was measured before and after the exposition with the mobile analyser; and measured values of the dose rate did not differentiate from each other and were comparable with the natural background.

The measurement had showed that if the person operating the device follows the instructions, he is not exposed to the radiation burden. The highest value is 124 $\mu\text{Sv/h}$ was measured in contact with the mobile analyser without investigation any subject. This value could endanger a service person, if he had ignored the instructions of the safe

operation and the exposure had occurred directly on his skin. Therefore, the risk is not high, but we can't eliminate it entirely. Other methods that need the nuclear reactor as a source for irradiation must ensure much higher degree of the radiation protection, compared with the mobile analysers used while working in the field.

Key words: ionizing radiation, mobile analyser, dose rate measurement, radiation burden, archaeological methods

Prohlášení

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

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejich internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby kvalifikační práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé kvalifikační práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

V Českých Budějovicích dne 3.5.2016

.....

Sandra Horáková

Poděkování

Ráda bych poděkovala vedoucímu práce prof. Dr. Friedo Zölzer, Ph.D za odborné vedení a informace, které mi pomohly při zpracování bakalářské práce. Dále bych ráda poděkovala PhDr. Janu Johnovi, Ph.D za spolupráci při získávání údajů pro výzkumnou část práce a panu Ondřeji Sýkorovi, technikovi radiační bezpečnosti, za zapůjčení měřiče z jaderné elektrárny Temelín.

Obsah

1	TEORETICKÁ ČÁST.....	16
1.1	Radioaktivita.....	16
1.2	Objevení radioaktivity	17
1.3	Původ ionizujícího záření v životním prostředí.....	18
1.4	Přírodní radioaktivita	19
1.5	Umělá radioaktivita.....	21
1.6	Charakteristika ionizujícího záření	22
1.7	Biologické účinky ionizujícího záření na člověka.....	23
1.8	Deterministické účinky	24
1.9	Stochastické účinky	25
1.10	Radiační zátěž populace.....	27
1.11	Radiační ochrana.....	29
1.12	Základní způsoby ochrany před ionizujícím zářením.....	30
1.13	Principy radiační ochrany	31
2	VÝZKUMNÁ OTÁZKA A METODIKA VÝZKUMU.....	34
2.1	Výzkumná otázka	34
2.2	Metodika	34
3	VÝSLEDKY.....	36
3.1	VYUŽITÍ IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ V ARCHEOLOGII.....	36
3.2	Radiouhlíková metoda	37
3.2.1	Princip metody	38
3.2.2	Princip měření	39
3.2.3	Laboratorní metodika	40
3.2.4	Nevýhody metody	40
3.3	Neutronová aktivační analýza (NAA)	41
3.4	Aktivační analýza s nabitými částicemi (CPAA)	42
3.5	Rentgenfluorescenční analýza (RFA).....	42
3.5.1	Využití metody.....	43

3.5.2	Princip metody	43
3.6	Emise záření vyvolané těžkými nabitými částicemi (PIXE)	43
3.7	Elektronová mikrosonda (EMP)	44
3.8	Termoluminiscenční datování (TL)	45
3.9	Praktické měření	46
4	DISKUZE	54
5	ZÁVĚR	57
6	LITERATURA	58
7	SEZNAM TABULEK	63
8	SEZNAM OBRÁZKŮ	64

Seznam použitých zkratek

AMS	<i>Accelator Mass Spectrometry</i> - Hmotnostní spektrometrie na urychlovačích
CPAA	<i>Charged particle activation analysis</i> - Aktivační analýza s nabitými částicemi
CT	Výpočetní tomografie
ČR	Česká republika
DNA	Deoxyribonukleová kyselina
EDS	Elektronově disperzní spektrometr
EMP	Elektronová mikrosonda
IZ	Ionizující záření
JE	Jaderná elektrárna
NAA	<i>Neutron activation analysis</i> - Neutronová aktivační analýza
PET	Pozitronová emisní tomografie
PIXE	<i>Particle induced x-ray emission</i> - Emise záření vyvolané těžkými nabitými částicemi)
RFA	<i>Roentgen – fluorescent analysis</i> - Rentgenfluorescenční analýza
SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost
TL	<i>Thermoluminescence dating</i> - Termoluminiscenční datování
TLD	Termoluminiscenční dozimetrie

ÚVOD

Můžeme hovořit o takzvané fyzikalizaci archeologie, která je, podobně jako ostatní humanitní vědy, na vzestupu. Mezi stálými členy archeologických výzkumných týmů jsou stále populárnější i fyzici, neboť míra metod a přístrojů používaných v archeologii je čím dál více širší. Věda jde nekompromisně vpřed, když se na to podíváme konkrétně, archeologické materiály se analyzují hmotově spektrometricky, emisní i absorpční spektrometrií, jakož i aktivační analýzou. Z tohoto hlediska se jedná o aktuální téma. Různé metody, které pomohou urychlit práci archeologa nebo dokonce dokázat pravost předmětů či jeho složení, našly své uplatnění. Přesné stanovení stáří historických předmětů je pro archeologii velmi důležité, aby se mohla dále odvíjet historie. Pro tento účel je nám známá celá řada dnes již moderních fyzikálních metod. Ovšem ne každá je univerzální nebo pro daný typ materiálu dokonalá.

Na základě mých zjištění, se určitá metoda vždy hodí jen pro úzký okruh daných látek i omezený rozsah stáří. Uvedu příklad na aplikaci při nejznámější a nejrozšířenější metodě Libbyho, založenou na stanovení koncentrace radionuklidu ^{14}C v daném předmětu, je zásadně omezena jen na látky organického původu a na rozsah stáří 500 – 50 000 let. Obě tato omezení vyplývají z principu této metody, které vychází v předpokladu rovnovážné koncentrace radionuklidu ^{14}C v ovzduší a dané látce v jejím vegetačním období a exponenciálního úbytku této koncentrace od skončení jejího života, který je daný poločasem 5730 let. Na druhé straně se jedná o velmi pracný způsob, protože vyžaduje složité aparaturní vybavení, které je finančně nákladné. Podobně jsou na tom i další radiometrické metody pro stanovení stáří.

Podstatná část, která v oblasti určování stáří archeologických předmětů dlouho unikala, byla keramika, vypalované stavebniny, porcelán a sklo. Zkrátka látky, které se při vykopávkách nacházejí velmi často. Až s příchodem metody termoluminiscenční dozimetrie (TLD) se stalo datování těchto látek prakticky možné. Ve srovnání s jinými metodami i výhodné. Proto je o termoluminiscenční datování velký zájem.

Využití ionizujícího záření je známo již delší dobu a s ním souvisí i velký pokrok nejen v oblasti medicíny či jaderné energie. Přišlo mi velmi zajímavé aplikovat ionizující záření právě do oblasti archeologie a zkoumat jeho další využití.

Hlavním cílem bakalářské práce bylo zjistit, zda při archeologických výzkumech existují významná rizika z hlediska radiační ochrany, a popsat metody v archeologii, u kterých je ionizující záření nebo radioaktivita používána. A dále zjistit radiační zátěž na člověka. První část bakalářské práce byla věnována teoretickému přehledu. Do této problematiky jsem zahrнула stručné informace o radioaktivitě. Zaměřila jsem se také na radiační ochranu a s tím související biologické účinky ionizující záření na člověka. Podrobně byly popsány archeologické metody, u kterých se využívá ionizující záření s výběrem typických a nejčastěji používaných. Provedla jsem také měření na rentgenfluorescenční analýzu a popsala metodu měření vzorků. V další části je charakterizovaná metodika a výsledky příkonu dávkového ekvivalentu.

1 TEORETICKÁ ČÁST

Různé archeologické metody využívají poznatky ionizujícího záření. S tím souvisí úskalí této činnosti a to zejména bezpečnost při práci se zdroji ionizujícího záření, aby nedošlo k radiační zátěži archeologa. Opodstatněná je náležitá manipulace s těmito přístroji v laboratoři a při použití mobilních analyzátorů v terénu i odpovídající zacházení vzhledem k životnímu prostředí.

Na samotný úvod práce je třeba definovat pojem radioaktivita, ionizující záření a vzhledem k problematice i radiační ochrana.

1.1 Radioaktivita

Je vlastnost některých jader atomů samovolně se rozpadat, přeměňovat se na jádra jednodušší a uvolňovat energii ve formě záření. (1)

Radioaktivita je přirozeným jevem a většina přirozených radionuklidů vznikla při výbuchu supernovy, který předcházela vzniku naší sluneční soustavy. Do dneška se dochovaly pouze radionuklidy s velmi dlouhým poločasem přeměny. Jako například uran ^{238}U , jehož poločas přeměny 4,5 miliardy let se rovná předpokládanému stáří Země. To znamená, že za celou dobu existence naší planety se stačila přeměnit pouze polovina jeho počátečního množství. (2)

Radioaktivita a ionizující záření jsou neoddelitelnou součástí našeho života a setkáváme se s nimi dnes a denně. Člověk je nemůže vnímat smysly, i když je prostředí kolem nás protkáno neviditelnými paprsky, které velmi výrazně ovlivňují celou řadu procesů. Toto záření může člověka negativně ovlivnit, kdy je brán zřetel na intenzitu záření, její druh, celkové dávky a odpovídající dobu, po kterou je člověk záření vystaven. (3)

Největší podíl na ozáření obyvatelstva mají přírodní zdroje, se kterými se setkáváme z vesmíru, vody, skal a z podloží a půdy (zejména uran ^{238}U a ^{235}U , thorium ^{232}Th a berilium ^{87}Rb) a při jejich přeměně vznikají další radioaktivní prvky jako radium ^{226}Ra , polonium ^{210}Po , radon ^{222}Rn a ^{220}Rn . Známe však i záření z umělých zdrojů

ionizujícího záření, jehož využití započalo ve 20. století zejména v oblasti dnešní medicíny. Nenahraditelné je také v odvětví vědy, techniky, výzkumu, průmyslu a u jaderných materiálů v energetice. Ionizující záření se mimo jiné používá ke sterilizaci materiálů, při hledání skrytých vad materiálů a pro měření tloušťky materiálů. V archeologii ke zjišťování složení neznámého materiálu a při zkoumání stáří archeologických nálezů (radiouhlíkové datování). Významná je i neutronová a rentgenová aktivační analýza, která slouží k ověřování pravosti nebo zjišťování původu uměleckých předmětů. Artefakty jsou ošetřovány ionizujícím zářením, aby byly chráněny před plísněmi a dřevokazným hmyzem. (4)

1.2 Objevení radioaktivity

Profesor univerzity ve Würzburgu Wilhelm Conrad Röntgen publikoval v prosinci 1895 objev, který významně změnil soudobou fyziku a posunul ji na vyšší úroveň. Jeho záření X (dnes rentgenové záření) bylo prvním poznaným druhem ionizujícího záření. I když nebyla ještě zcela známá jeho podstata, rychle se dostala do čela pozornosti zejména lékařů a fyziků. Ve svazcích lékařských rentgenů se také rodily první poznatky o účincích ionizujícího záření a zároveň o potřebě radiační ochrany. Rentgenka se stala součástí vybavení mnoha laboratoří a ordinací, ale nezůstala jediným známým zdrojem. (5)

V roce 1896 profesor pařížské polytechniky Antoine Henri Becquerel zveřejnil zjištění, že soli uranu vysílají dosud neznámé paprsky, které způsobují zčernání fotografické emulze a ionizaci vzduchu. Manželé Curieovi navázali na jeho výzkum a nazvali tento jev radioaktivitou. Tak byly poznány přírodní radioaktivní radionuklidy jako další zdroje ionizujícího záření. Intenzivní zkoumání nového jevu vedlo ke zjištění, že radioaktivní látky neemitují jediný druh záření, ale tři, označovány symboly α , β a γ . Manželé F. a I. Joliot Curieovi dalším studiem jaderných reakcí objevili první umělé radionuklidy. Radionuklid ^{30}P vznikl jako výsledek jejich experimentů jako zářič β^+ a současně byl poznán další, dosud neznámý, typ radioaktivní přeměny β .

Prudký rozvoj ve zkoumání radioaktivity přinesla 2. světová válka, kdy o množství energie uvolňované při štěpení jader byl velký zájem, zejména z vojenských kruhů. Výsledkem těchto intenzivních studií během 2. světové války byl vývoj dvou zařízení, které jsou nejmohutnějším člověkem vyrobeným zdrojem ionizujícího záření. Tedy jaderný reaktor a jaderná puma. Explóze jaderných pum v Hirošimě a Nagasaki jsou odstrašujícím příkladem, co člověk dokáže spáchat na bezbranných lidech. Na druhou stranu jsou jedním ze základních zdrojů informací o následcích jednorázového celotělového ozáření člověka pro potřeby radiační ochrany do budoucna. Získané informace o zásadách radiační ochrany se aplikují například v jaderném palivovém cyklu. (6)

1.3 Původ ionizujícího záření v životním prostředí

Všechny látky ve vesmíru, počínaje mlhovinami, z nichž vznikla naše sluneční soustava, až po veškeré bytosti na Zemi, jsou složeny z molekul, a ty jsou dále složeny z atomů. Ve vesmíru se odehrávají přeměny neustále. K těmto přeměnám dochází buď chemickou cestou, nebo vlivem jaderných přeměn. V přírodě dochází k jaderným změnám buď vlivem samovolně probíhající přeměny jader na jádra jiná, nebo vlivem jaderných reakcí. K nim dochází pod vlivem dopadajících částic kosmického záření.

Zdroje ionizujícího záření tedy dělíme na:

- přírodní zdroje
- umělé zdroje

Radioaktivní nuklidy, které vznikly v přírodě v důsledku radioaktivní přeměny, se nazývají přirozeně radioaktivní. Tyto nuklidy vznikly v naší sluneční soustavě velmi dávno (před 4 až 6 miliardami let) a vznikají stále zejména vlivem kosmického záření a radioaktivní přeměny. Člověk však dokázal získat radioaktivní nuklidy uměle, a to pomocí jaderných reaktorů a urychlovačů částic.

Lidstvo během svého vývoje bylo vystaveno neustálému působení přirozeného radioaktivního záření. A právě přírodní zdroje nejvíce ozařují obyvatelstvo. Na druhém

místě stojí ozáření vyšetřovaných či léčených lidí pomocí zdrojů ionizujícího záření používaných ve zdravotnictví. (7)

1.4 Přírodní radioaktivita

V přírodě bylo nalezeno okolo 340 nuklidů, z nichž přibližně 70 je radioaktivních. Najdeme je hlavně mezi těžkými prvky. Atomy téhož prvku, které se od sebe liší pouze počtem neutronů, se nazývají **izotopy**. Izotopy mají stejné protonové číslo, ale různé nukleové číslo. Všechny prvky, které mají protonové číslo vyšší než 80, tvoří přirozené radioaktivní nuklidy. Všechny nuklidy prvků, které mají protonové číslo vyšší než 82 jsou radioaktivní, tedy podléhají radioaktivní přeměně. K ní dochází, dokud se z radioaktivních nuklidů nestanou nuklidy stabilní.

Přírodní radioaktivita se tedy dělí na:

- *kosmické záření (kosmogenní)* – dopadá na Zem z vesmíru; závislost na nadmořské výšce
- *přírodní radionuklidy* – vyskytují se v našem životním prostředí

Rozlišují se tři složky kosmického záření:

- *galaktické kosmické záření* – pochází z hlubokých oblastí vesmíru, skládá se z 85 % protonů, 11 % jader helia, 3 % elektronů a 1 % těžších jader všech prvků soustavy.
- *sluneční kosmické záření* – pochází ze slunečných erupcí, skládá se z 99 % protonů, 0,1 % těžší nabitě částice
- *radiační (van Allenovy) pásy* – jsou tvořeny protony a elektrony zachycené magnetickým polem Země v určitých vzdálenostech od jejího povrchu.

Rozlišují se tři skupiny přírodních radionuklidů:

- *kosmogenní radionuklidy* – vznikají v jaderných reakcích při interakci kosmického záření se stabilními prvky ve vnějším obalu Země. Typické jsou ^{14}C a ^3H .
- *primordiální radionuklidy* – vznikly v raných stádiích vesmíru a kvůli dlouhému poločasu přeměny většinou než 108 let se dosud vyskytují na Zemi a to ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th , ^{40}K a ^{87}Rb .
- *Radionuklidy vznikající v přeměnových řadách* – nejvýznamnější je *řada uranová*, která obsahuje dva významné prvky ^{226}Ra a ^{222}Rn , *řada thoriová* (od ^{232}Th), *řada aktiniová* (od ^{235}U) a *řada neptuniová* (od ^{237}Np), kdy v přírodě se setkáme s prvními třemi.

Nejrozšířenější radioaktivní prvek v přírodě je draslík ^{40}K . Jeho aktivita v zemské kůře je větší než aktivita všech ostatních přirozeně radioaktivních prvků dohromady. Radioaktivní draslík je v půdě značně rozptýlen, zejména v půdě. Záření zemského povrchu je tvořeno složkami záření alfa, beta a gama, z nichž nejvýznamnější je složka gama. Z hlediska zevního ozáření člověka má největší podíl ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K v horninách a půdách. Vnitřní ozáření má nejvíce na svědomí ^{226}Ra , ^{222}Rn , ^{220}Rn , ^{40}K a ^{14}C . Celkový roční dávkový ekvivalent obyvatel Evropy vytvořený všemi druhy ozáření (přirozené zdroje) činí průměrně kolem 2,5 mSv v lidském organismu. (8)

Člověk dokáže vyrobit zdroje ionizujícího záření, avšak daleko mohutnější zdroje dokáže vytvořit příroda. Kosmická tělesa jsou zdroji mohutných toků částic a v podobě kosmického záření dopadají na povrch Země. Díky tomuto záření vznikají v atmosféře další radionuklidy jako ^{14}C a ^3H , jež se dostávají do biosféry či vodních toků. Další přírodní radionuklidy najdeme i v zemské kůře a v atmosféře, zejména se jedná o prvky přírodních přeměnových řad, ale i dlouhodobé radionuklidy, jako je ^{40}K . Měrná aktivita v těchto případech je velmi nízká, takže se přírodní materiály ani nepovažují za radioaktivní zářiče. Musíme ale podotknout, že obsah radionuklidů v zemské atmosféře a kůře je velmi značný. (5)

1.5 Umělá radioaktivita

S umělými zdroji se nejčastěji setkáme v lékařství při ozáření pacientů, kde radioaktivní záření našlo široké uplatnění. Využívání radioizotopů v lékařství dosáhlo tak velkého rozvoje, že vedlo k vytvoření odvětví zvaného nukleární medicína. Umělé zdroje ionizujícího záření vytvořené člověkem jsou například rentgenky, urychlovače, umělé radionuklidy a jaderný reaktor.

Záření se v medicíně používá dvěma způsoby. Malé dávky při diagnóze poranění či nemocí a velké dávky na ničení rakovinotvorných buněk. Nejznámější formou záření, se kterou se snad každý setkal, je rentgenové záření. Většinou se používá na zobrazení končetin, hrudníku i zubů. Dávka se liší podle typu vyšetření a je snaha ji snižovat používáním co nejlepšího (tj. citlivého) zařízení.

Další zajímavou metodou je aplikace radioaktivní látky do těla pro účely sledování tělesných funkcí a k lokalizaci nádorů. Největší dávky se v medicíně používají pro léčení rakoviny. Pro představu, typická léčebná dávka představuje desítky grayů a je většinou rozdělena do několika týdnů. Pro srovnání rentgen zubů představuje 0,1 mSv a rentgen prsu 1 mSv.

Další oblast odvětví, kde se využívají zdroje umělé radioaktivity, jsou diagnostické zdroje - výpočetní tomografie (CT) a pozitronová emisní tomografie (PET) a radioterapeutické zdroje – gama nůž (9)

Dále se sleduje radioaktivní spad při zkouškách s jadernými zbraněmi z období 50. a 60. let. Dnes je to 30x méně než v roce 1964. Malé zdroje ionizujícího záření mohou představovat televizory, detektory kouře a náramkové hodinky. Za vypuštění radionuklidů do životního prostředí může i člověk sám, například spalováním fosilních paliv. K velkému překvapení je jich mnohem více, než kolik se jich dostane do životního prostředí normálním provozem jaderné elektrárny. Palivový cyklus jaderné elektrárny od vytěžení uranové rudy, po uložení odpadů představuje velmi malé procento přírodního pozadí – asi 0,1 %. Uhlí a fosfátové horniny obsahují stopy radioaktivních prvků uranu a radia. Z toho plyne, že používání fosfátů jako hnojiv a spalování uhlí v elektrárnách vede k rozšiřování radioaktivity do životního prostředí. (10)

1.6 Charakteristika ionizujícího záření

Pro ionizující záření se v řadách obyvatelstva ustálily názvy jako jaderné či radioaktivní záření. Jaderné je věcně správné, avšak zahrnuje jen ionizující záření vzniklé v jádrech atomu. Radioaktivní je už však chybné. Ionizující záření samo o sobě není radioaktivní – je už produkt radioaktivity.

Ionizující záření je tok hmotných částic nebo fotonů elektromagnetického záření, které mají schopnost ionizovat atomy prostředí nebo excitovat jejich jádra. Ionizace prostředí znamená, že z původně elektricky neutrálních atomů se vytvoří kladné a záporné ionty (iontové páry). Vzniká tedy jako průvodní jev jaderných procesů. Při těchto procesech se jádro (nebo obal) atomu dostane do excitovaného stavu, tedy stává se energeticky nestabilní. Stabilní stav získá právě vyzářením energie ve formě částic nebo fotonů elektromagnetického záření. (11)

Vzhledem k charakteru ionizačního procesu lze ionizující záření rozdělit na:

- *přímo ionizující záření*
- *nepřímo ionizující záření*

Přímo ionizující záření je tvořeno nabitými částicemi (elektrony, pozitrony, protony, částice alfa a beta), které mají tak silnou kinetickou energii k vyvolání ionizace.

Nepřímo ionizující záření je tvořeno nenabitými částicemi (fotony, neutrony), které samy prostředí neionizují, ale při interakcích s prostředím uvolňují sekundární, přímo ionizující částice. Tyto sekundární části poté způsobují ionizaci prostředí. (12)

Ionizující záření je energií přenášeno přes fotony rentgenového záření, gama záření, alfa a beta částicemi, neutrony, protony nebo těžkými ionty. Rentgenové a gama záření jsou elektromagnetickým vlněním, stejně jako světlo, ale mají podstatně vyšší energii, a tedy i kratší vlnovou délku. Ultrafialové světlo je také záření, ale pouze o střední energii, avšak poškodit živé buňky dokáže taktéž. Rozdíl mezi ultrafialovým

zářením a ionizujícím zářením spočívá ve vlnové délce a v tom, že ultrafialové záření nedokáže ionizovat atomy nebo molekuly a způsobuje pouze excitaci. (13)

1.7 Biologické účinky ionizujícího záření na člověka

Účinky ionizujícího záření se projevují ve větší i menší míře u všech druhů živých organismů. Často jde o účinky negativní, jsou však známy případy, kdy ionizující záření vyvolává změny pozitivní. Biologický účinek ionizujícího záření závisí na absorbované dávce a na druhu ionizujícího záření.

Účinek záření je zajímavé pozorovat na nejdůležitější biologické molekule – na DNA. Jedná se o unikátní molekulu, kdy pro existenci buňky je velmi důležitá. Obsahuje totiž základní informace o struktuře a funkci buňky. Zásah do biochemické struktury DNA může způsobit, že buňka přestane vyrábět potřebnou bílkovinu. Molekula DNA je zásadní pro ionizující záření, v níž vzniká chyba v řazení aminokyselin do řetězce. Ionizující záření je typické tím, že způsobuje řadu poškození, z nichž hlavní jsou dva druhy přerušení. A to *jednoduché zlomy* (poškodí se pouze jeden řetězec DNA), které si buňka dokáže opravit a *dvojitě zlomy* (poškodí oba řetězce DNA), které jsou obtížnější k opravě a často neúspěšné. Dvojitý zlom struktury DNA vede často k zániku buňky.

Poškození buněk závisí především na rozmnožovacích schopnostech buněk. Vliv ionizujícího záření je tím význačnější, čím má buňka větší schopnost k rozmnožování a čím méně je diferencovaná. Z toho plyne, že organismy jsou nejcitlivější vůči záření na počátku vývoje. Biologické účinky ionizujícího záření závisí také na dávce a druhu záření. (14)

U člověka se mohou projevit účinky záření i po desítkách let. Můžeme hovořit o dvojitě charakteru důsledků buněčných změn. Ozáření buňky způsobí buď zánik buňky, nebo změnu genetickou informaci buňky, tedy mutaci. Smrt buňky si musíme představit jako neschopnost buňky projít opakovanými mitózami, tedy neschopnost buňky realizovat své potomstvo. Při menších dávkách záření nedochází jednoznačně k usmrcení buňky, avšak vzniklé radikály mohou vyvolat chemické změny v DNA.

Tyto změny cytogenetické informace (mutace) se pak při dělení mohou přenášet a objevit se v další generaci. Ozáření buněk jednoznačně vede k řadě škodlivých změn. Značná část může být reparačními mechanismy organismu napravena, avšak druhá část může vést ke zničení buněk. Na účinky ionizujícího záření jsou citlivé zejména tkáně s intenzivním dělením buněk, jako jsou například krvetvorba, slizniční výstelky a vyvíjející se plod. (15)

1.8 Deterministické účinky

Základní vlastností je existence prahové dávky, tedy hodnoty ozáření, kdy dojde k poškození, až při překročení této dávky. Platí, že nejcitlivější tkáň je v případě, že k ozáření dojde během okamžiku – jednorázově. Naopak, když je expozice rozložena v čase (formou malých opakujících dávek), prahová dávka vzrůstá a tkáň je odolnější. Tento jev vzniká důsledkem reparačních procesů v organismu, které mají příležitost zafungovat při delším časovém rozmezí. Většina deterministických účinků se označují jako časné, tedy projeví se krátce po ozáření (do 48 hodin). Pouze chronický zánět kůže a zákal oční čočky jsou pozdní.

Příklady deterministických účinků:

- akutní nemoc z ozáření – celotělové jednorázové ozáření pronikavým zářením, nad 0,7 Gy
- akutní poškození kůže – při lokalizovaném ozáření, nad 3 až 4 Gy (je relativně nejčastější)
- poškození fertility – důsledek ozáření pohlavních orgánů. U mužů se jedná o gonády, kdy dočasná neplodnost vzniká při dávkách okolo 250 mGy a trvalá okolo 1,5 Gy. U žen má vliv na vaječníky dočasná neplodnost při dávce okolo 1 Gy a trvalá okolo 3,5 Gy.
- Poškození plodu v těle matky – lze říci, že plod v těle matky je nejcitlivější lidskou tkání a to především v prvním trimestru. Prahová dávka závisí od doby po početí a může být již od 100 mGy.

Dále sem patří poškození oční čočky při ozáření nadprahovou dávkou vzniká dispozice pro vznik šedého očního zákalu. Nervová forma nemoci z ozáření, kdy při překročení celotělového jednorázového ozáření 15 Gy dojde k poškození nervového systému. Střevní forma nemoci z ozáření, zde je při překročení celotělového jednorázového ozáření 5 Gy poškozen střevní epitel. Poškození buněk ve smyslu mitotická smrt či nekróza buněk.



Obrázek 1: Křivka deterministických účinků (34)

Z grafu je patrné, že s rostoucí dávkou se zvyšuje závažnost poškození. Deterministické účinky jsou popisovány ekvivalentní dávkou a úkolem je zabránit jejich vzniku. (16)

1.9 Stochastické účinky

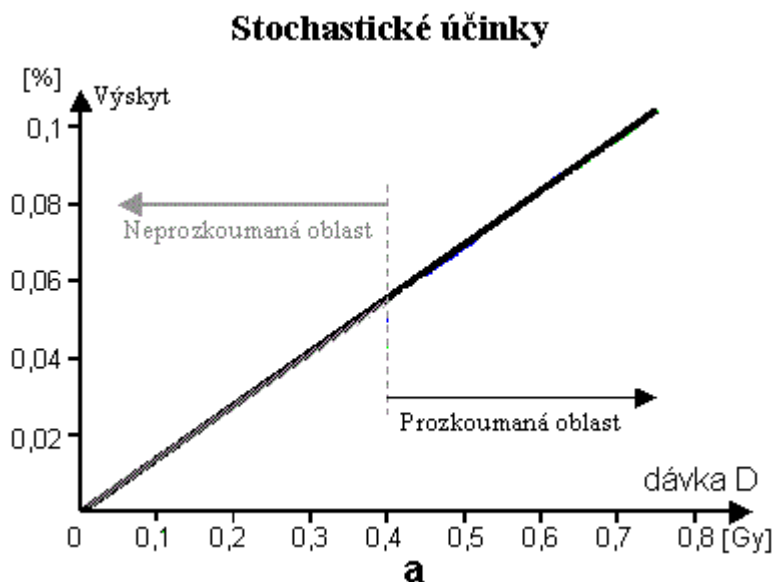
Jsou to účinky dlouhodobé, tzv. pravděpodobnostní. Jsou zásadně pozdní a projevují se po dlouhé době, roky či desítky let jen u několika lidí z ozářené skupiny. S rostoucí obdrženou dávkou vzrůstá riziko (pravděpodobnost) poškození, nikoliv však závažnost projevu. Z toho plyne, že jsou bezprahové – žádná dávka není považována za

bezpečnou. Tyto účinky jsou biologické účinky vyvolané mutacemi, které vznikly působením ionizujícího záření na buňky. Záření může způsobit usmrcení buňky nebo změnu její genetické informace. S dávkou (lineárně) vzrůstá po jednotlivce pravděpodobnost nádorů a dědičných poškození.

Příklady stochastických účinků:

- Rakovinová bujení (zhoubné nádory = malignity)
- Nádory (spontánní mutace)
- Genetická poškození, která se přenáší do příštích generací,

například Downova nemoc.



Obrázek 2: Křivka stochastických účinků (35)

Stochastické účinky jsou popisovány efektivní dávkou. Úkolem je snížit pravděpodobnost stochastických účinků na přijatelnou hodnotu. (17)

1.10 Radiační zátěž populace

Znalost dávek, kterým jsou obyvatelé státu vystavováni z různých zdrojů, je důležitá z hlediska správné ochrany před zářením a současně slouží k informovanosti obyvatelstva o stavu jejich životního prostředí.

Mezi kosmogenní radionuklidy, které jsou významné ve vztahu k ozáření lidí, patří ^3H , ^7Be , ^{14}C a ^{22}Na . Tyto nuklidy způsobují vnitřním ozářením dávky v různých orgánech a tkáních v rozmezí 5 až 25 μGy ročně.

Je také zajímavé sledovat zevní ozáření kosmickým zářením. Dávkové příkony z přímo ionizující složky se mění výrazně s nadmořskou výškou (málo se mění zeměpisnou šířkou). Přibližně každých 1500 m se jejich hodnota zdvojnásobuje. Dávkový příkon na úrovni moře činí asi 30 nGy za hodinu. Vyššímu ozáření z kosmického záření jsou vystaveni také cestující letadly. Průměrný dávkový příkon v dopravním letadle (průměrná výška 8 km) je odhadován na 0,84 $\mu\text{Gy h}^{-1}$. U kosmonautů nepřesahují dávkové ekvivalenty zpravidla 5 mSv za kosmický let. Radionuklidy vzniklé spontánním štěpením (např. uranu 238) lze z hlediska ozáření obyvatelstva zcela zanedbat.

Analýza hodnot změřených v řadě zemí vedla k závěru, že velká část obyvatel žije v oblastech, kde distribuce příkonů dávky mimo obydlí má normální charakter. Můžeme tedy říci, že 95 % obyvatelstva zeměkoule žije v oblastech s normálním přírodním pozadím, kde dávkové příkony mimo obydlí leží v rozmezí 30 až 70 nGy h^{-1} , což znamená ročně 0,5 mGy a inhalace tvoří 1,2 mGy. (18)

Pro představu pár příkladů z reálného života:

Tabulka 1: Přehled dávek (33)

Rentgenový snímek plic	0,02 mSv
Let do USA 7 hodin	0,05 mSv
Kouření 20 cigaret denně za 1 rok (210 Po, 210 Pb)	0,36 mSv
CT hlavy	1,1 mSv
Scintigrafie skeletu	5 mSv

CT břicha	10 mSv
PET/CT celého těla	15 mSv

V neposlední řadě je významná i radioaktivita stavebních materiálů. Stavební materiály nerostného původu obsahují vždy určité množství radioaktivních látek. Typický je draslík, uran, thorium a radionuklidy, které vznikají jejich radioaktivní přeměnou. Z nich nejzásadnější je obvykle radium (^{226}Ra). Jeho přítomnost ve stavebním materiálu vede k ozáření osob ve stavbách, kdy se vdechují produkty přeměny radonu vytvořeného z radia.

Radon se může do budovy dostat z podloží, s dodávanou vodou a z již zmiňovaných stavebních materiálů. Právě radon z podlaží budovy je zpravidla nejzásadnějším zdrojem radonu. Koncentrace radonu v domě souvisí s množstvím radonu přítomným v podloží pod objektem, plynopropustností podloží pod domem, těsností objektu vůči podloží a na intenzitě větrání objektu. Radon do domu vstupuje právě netěsnostmi ve zdech a podlahách, které jsou v kontaktu s podložím. Jedná se o prostupy inženýrských sítí, popraskaný beton či dlažbu, netěsné prkenné podlahy i neutěsněné šachty.

Největší roli v přísunu radonu hraje aktivní nasávání radonu budovou (komínový efekt) ze země. Toto nasávání vzrůstá, pokud se zvětší rozdíl mezi vnitřní a venkovní teplotou, čímž roste podtlak v budově. Můžeme pozorovat zpravidla největší přísun radonu do budovy v noci a v ranních hodinách a z toho vyplývající pravidelné kolísání koncentrace radonu během dne a noci. To stejné platí v ročním období, kdy větší přísun radonu je v zimním období než v letním.

Z hlediska průměru ozáření osob žijících v ČR má největší podíl radon (40 %), radionuklidy v zemské kůře (10 %), radionuklidy v těle a potravinách (20 %) a kosmické ozáření (10 %). Z umělých zdrojů se nejvíce připisuje lékařskému ozáření (20 %). U lidí obávané jaderné elektrárny mají oproti tomu na svědomí asi jen 0,01 % z celkového ozáření osob.

Jak je to s radonem v používané vodě? Podzemní voda obsahuje vždy určité množství radonu. Pouze v povrchových vodách je radonu zanedbatelně. Je to neustálý

řetězec, kdy radon do vody přechází z hornin obsahujících uran a radium a spolu s vodou se dostává do budov. Pak stačí vodu používat v bytě a část radonu se uvolní do ovzduší (při sprchování a mytí asi 50 %, při vaření a praní téměř 100 %) a vytváří zde krátkodobé produkty přeměny radonu, jejichž vdechování přispívá k ozáření osob. Pití vody je z hlediska ozáření považováno za méně významné. Průměrný obsah radonu v pitné vodě z podzemních zdrojů je v ČR kolem 14 Bq/l. Radon je možné z vody odstranit a to pomocí aeračního zařízení. Radon se vytěsňuje z vody jejím provzdušňováním. Takových zařízení je již několik stovek a jejich účinnost je vysoká, umožňují snížit obsah radonu ve vodě více než desetkrát. (19)

1.11 Radiační ochrana

Atomový zákon definuje radiační ochranu jako systém technických a organizačních opatření k omezení ozáření fyzických osob a k ochraně životního prostředí. Zaměřuje se na snížení absorbované dávky ionizujícího záření v organismu na co nejnižší míru, což vede k podstatnému snížení rizika nežádoucích deterministických a stochastických účinků záření.

Hlavním cílem radiační ochrany je zabránit vzniku deterministických účinků a omezit na přijatelnou úroveň účinky stochastické.

Absorbovaná dávka D je základní veličinou, která je definována jako poměr energie ionizujícího záření absorbovaná v jednotce hmotnosti ozařované látky v určitém místě. Jednotkou absorbované dávky je $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$, pro který byl zaveden název gray (Gy).

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm}$$

Absorbovaná dávka D není sama o sobě postačující k předpovědi závažnosti ani pravděpodobnosti škodlivých účinků na zdraví. Proto byla zavedena veličina **dávkový ekvivalent H** , který významnější škodlivé účinky lépe charakterizuje. Jednotkou je sievert (Sv).

$$H = Q \cdot D$$

Na dávkovém ekvivalentu jsou založeny veličiny pro praktické měření pro monitorování osob i prostředí. K monitorování osob je určen osobní **dávkový ekvivalent H_p** , což je dávkový ekvivalent v daném bodě pod povrchem těla v měkké tkáni v hloubce d . Pro nepronikavé záření (např. β) a ozáření kůže se zpravidla uvádí $d = 0,07$ mm a pro ozáření oka 3 mm. Pro pronikavé záření je nejčastěji brána hodnota $d = 10$ mm.

Další důležitou veličinou charakterizující zdroj záření je **aktivita**. Představuje takové množství radioaktivní látky, ve které proběhne jeden radioaktivní rozpad za sekundu. Jednotka je becquerel (Bq). Tato jednotka je malá, proto se v praxi používají její násobky (1 kBq, 1 MBq, 1 GBq). Aktivita radionuklidu není konstantní veličina, ale klesá s časem.

$$A = \frac{dN}{dt}$$

Ochrana před zářením se zabývá ochranou jednotlivců, jejich potomků a lidstva jako celku. Cílem ochrany před zářením je zabránit vzniku škodlivých deterministických účinků a omezit pravděpodobnost stochastických účinků na úroveň, kterou lze považovat za přijatelnou. (20)

1.12 Základní způsoby ochrany před ionizujícím zářením

Základní způsoby ochrany před IZ jsou natolik obecné, že je možno je použít na každém pracovišti se zdroji IZ. Jedná se o čas, vzdálenost a stínění.

Jedním z nejstarších a doposud platných ochranných faktorů je čas. Tedy doba, po kterou setrváme v prostředí ionizujícího záření. Čím kratší dobu budeme v rizikovém prostředí pobývat, tím menší riziko podstupujeme. Z toho vyplývá, že doba, po kterou se nacházíme v poli záření, je přímo úměrná absorbované dávce.

Vzdálenost od zdroje záření je také mnohdy podceňovaný faktor. Bohužel ho nemůžeme uplatnit vždy, ale musí se dbát na to, abychom se ke zdroji záření nepřibližovali velmi blízko. Tam, kde je to možné, se dnes používají dálkové manipulátory.

Vhodné stínění je faktor, bez něhož by mnohé práce nebylo možné vůbec realizovat. Zeslabení dopadajícího záření umožňuje vhodný stínící materiál. Ten způsobí absorpci určitého množství záření a někdy i veškerého záření. Neexistuje univerzální stínící materiál a pro jednotlivé druhy záření se stínění provádí jednotlivými způsoby.

Alfa záření

Záření alfa má malou pronikavost a lze jej velmi snadno odstínit. Ve vzduchu mají částice alfa krátký dolet, takže nás ochrání již vrstva vzduchu několik cm silná.

Beta záření

K odstínění záření β stačí lehký materiál například plexisklo, hliníková folie, nejlépe v kombinaci s následnou tenkou vrstvou olova k odstínění brzděného elektromagnetického záření.

Gama záření

Proti gama záření se používají materiály s obsahem prvků o vyšším atomovém čísle jako například olovo, železo, barytové betony. Beton s příměsí barytu poslouží jako nejvhodnější stínící materiál proti gama a rentgenovému záření. Čím vyšší energii mají fotony záření gama, tím silnější ochranná vrstva je potřeba. Z toho důvodu se používají olověné kontejnery pro přepravu a skladování zářičů.

Neutronové záření

Složitější je to s neutrony, které nezachytí ani silná vrstva olova. V tomto případě je nutné použít vhodné vrstvy vody, parafínu, látek s prvky o nízkém atomovém čísle. (21)

1.13 Principy radiační ochrany

V radiační ochraně obecně existují čtyři základní principy, které je nutné dodržovat. Jedná se o princip zdůvodnění činností, princip optimalizace ochrany, princip limitování a princip bezpečnosti zdrojů. Zákon o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření č.18/1997 Sb. formuluje tyto základní principy radiační ochrany. V bakalářské práci vzhledem k danému tématu se zaměřím pouze na princip limitování.

Jakákoliv dávka ionizujícího záření může být spojena s určitým rizikem škodlivých účinků, takže je třeba dbát, aby dávky byly co nejnižší. Pro účely hodnocení a usměrňování expozice záření byly stanoveny určité hraniční hodnoty dávek za čtvrtletí, rok a 5 let – limity (nejvyšší přípustné dávky) pro pracovníky se zdroji ionizujícího záření, které jsou spojeny s velmi malou pravděpodobností poškození zářením.

Roku 1928 byl objeven pojem limit a s ním i související dnešní definice: Limit je roční efektivní nebo ekvivalentní dávka, která nesmí být překročena a když nebude překročena, nevznikne deterministické onemocnění a pravděpodobnost vzniku stochastického onemocnění bude snížena na společensky přijatelnou hodnotu. Jinými slovy jsou to hodnoty efektivních dávek ionizujícího záření, které může pracovník za rok obdržet. Z toho plyne, že limity ozáření jsou závazné kvantitativní ukazatele, jejichž překročení není z hlediska radiační ochrany přípustné.

Limity se stále snižují a podle vyhlášky č. 307/2002 Sb., o radiační ochraně v platném znění jsou stanoveny takto:

- **Základní limit obecný** – je stanovený pro obyvatelstvo a pracovníky nepracujícími se zdroji IZ ve výši 1 mSv za kalendářní rok. Vztahuje se na ozáření ze všech činností vedoucích k ozáření. Jedná se o součet dávek ze zevního i vnitřního ozáření pro celé tělo. Ozáření z přírodních zdrojů i ozáření lékařská se do limitu nepočítá.
- **Základní limit pro pracovníky se zdroji IZ** – je 100 mSv za 5 let. V jednom roce se připouští až 50 mSv, ale součet za 5 let nesmí být překročen. Například v JE je provozní limit 20 mSv za rok. Opět jde o součet dávek ze zevního a vnitřního ozáření pro celé tělo.
- **Základní limity pro učně a studenty** – vztahuje se na ozáření, kterému jsou vědomě a dobrovolně vystaveni po dobu jejich specializované přípravy na výkon povolání se zdroji IZ. Jsou poučeni o rizicích s tím spojených. Součet efektivních dávek ze zevního i vnitřního ozáření je hodnota 6 mSv za kalendářní rok.

Pro přehlednost limitů uvádím tabulku:

Tabulka 2: Základní limity stanovené vyhláškou č. 307/2002 Sb. (22)

Veličina	ZL obecné	ZL pro učně a studenty	ZL pro pracovníky se ZIZ
E za rok	1 mSv	6 mSv	50 mSv
H oční čočka za rok	15 mSv	50 mSv	150 mSv
H v 1cm ² kůže za rok	50 mSv	150 mSv	500 mSv

Limity ozáření se nevztahují na ozáření osob podílejících se na zásazích v případě radiační nehody. Toto ozáření však nesmí překročit desetinásobek základních limitů pro pracovníky se zdroji, pokud nejde o případ záchrany lidských životů či zabránění rozvoje radiační nehody. (22)

2 VÝZKUMNÁ OTÁZKA A METODIKA VÝZKUMU

2.1 Výzkumná otázka

Existují při archeologických výzkumech významná rizika z hlediska radiační ochrany?

2.2 Metodika

Zpracování archeologických metod, u kterých je využíváno ionizující záření, předcházelo důkladné studium odborné literatury zabývající se touto problematikou, za účelem sjednocení uvedených informací vedoucí k popisu konkrétních metod.

V části vlastního měření jsem se zaměřila na metodu, která je mezi archeology častěji používaná, jelikož disponuje použitím samotné metody i v terénu. Archeologický ústav Jihočeské univerzity disponuje právě touto metodou, kterou jsem použila do svého měření. Jedná se o rentgenfluorescenční metodu, konkrétně pak o mobilní analyzátor Thermo Scientific NITON XL2 GOLDD, který slouží ke kvantitativní analýze vzorků. Primární zdroj u přístroje je nízkovýkonová minirentgenka 45kV/2,0 W se stříbrnou anodou. Jedná se o velmi přesnou a rychlou nedestruktivní analýzu.

Za asistence PhDr. Jana Johna, Ph.D. jsem pomocí měřiče dávkového příkonu FH 40G-10 měřila příkon dávkového ekvivalentu u přístroje NITON XL2 GOLDD.

Přístroj FH 40G-10 zapůjčila jaderná elektrárna Temelín a jeho rozsah je 10 nSv/h – 1 Sv/h.

Měření probíhalo tak, že jsme spektrometr kontaktně přiložili ke zkoumanému předmětu, na kterém jsme provedli analýzu složení. Současně jsem provedla měření dávkového příkonu přístrojem FH 40G-10 přes měřený předmět. Vybrala jsem více druhů předmětů s rozdílným průměrem a složením, abych zjistila závislost velikosti ionizujícího záření ze spektrometru na daných kritériích. Jako konkrétní předměty byly použity bronzový meč, ocelové závaží o \varnothing 4 cm, stříbrná mince o \varnothing 1cm, současně jsem zkoumala příkon dávkového ekvivalentu v závislosti na vzdálenosti od

spektrometru a zkouška měření proběhla i bez zkoumaného předmětu (kolik spektrometr vyzařuje).

Pro ucelenost a přehlednost výsledků je předložena i tabulka doplněna o naměřené hodnoty.

3 VÝSLEDKY

V této části práce se budu zaměřovat na konkrétní metody v archeologii, kde se využívá ionizující záření. Tyto metody jsem detailně popsala a odhadla rizika z hlediska radiační ochrany. Podrobně jsem se zaměřila na měření mobilních analyzátorů, které spadají do rentgenfluorescenční analýzy. Na základě výsledků jsem poté objasnila, zda tato metoda má rizika z hlediska radiační ochrany. V průběhu pokusu byl mnou iniciován návrh na měření ruky, která je v přímém kontaktu se spektrometrem. Zároveň jsem pro ucelenost změřila zkoumaný předmět před ozáření i po ozáření spektrometrem, zda IZ materiál zaktivovalo.

3.1 VYUŽITÍ IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ V ARCHEOLOGII

Metody využívající IZ ke studiu archeologických nálezů a památek našly v oblasti archeologie významné místo. Hlavní oblastí využití je určování stáří daných objektů a analýza složení k určení původu. Dnes existuje řada různých metod, avšak pro tuto oblast jsou brány v úvahu jen takové, které nevedou k jejich nenapravitelnému poškození. To je základní omezující faktor, protože památky představují nenahraditelné kulturní dědictví. Další omezení představuje náročnost a vysoká cena některých metod, takže jsou provozovány jen v málo dobře vybavených laboratořích.

S využitím ionizujícího záření úzce souvisí nový vědní obor **archeometrie**. Ta moderními přírodovědnými a technickými metodami studuje archeologické nálezy, dávné populace i životní prostředí. U nás tento, teprve se rodící, obor můžeme shrnout do pěti základních okruhů výzkumu:

- vyhledání archeologických nalezišť a jejich zaměření – letecká archeologie
- analýza a charakteristika materiálů a stanovení původu materiálů
- všestranná analýza lidských pozůstatků a veškeré lidské činnosti včetně stravy, pěstování rostlin i chovu a lovu zvířete, stavby obydlí

- různé exaktní datovací metody
- různé metody konzervace artefaktů

V archeologii se dlouhodobě používají přírodovědné analýzy archeologického materiálu. Běžnými archeologickými metodami lze pomocí artefaktů vyčlenit jednotlivé kultury a stanovit jejich chronologii. Významné při studiu archeologických nálezů je propojení metodami přírodních a technických věd jako fyziky, chemie, biochemie, geologie a mnoha dalších. Časem vznikla archeometrie jako samostatná vědní disciplína.

Rozvoj archeometrie umožnil určování stáří různých organických i anorganických materiálů metodami, jako je radiokarbonové datování, dendrochronologie, termoluminiscence aj.

Nejznámější aplikací přírodní radioaktivity v archeologii je metoda zjišťování stáří předmětů z organických materiálů měřením aktivity radioizotopu uhlíku ^{14}C . Neutronová a rentgenová aktivační analýza slouží k ověřování pravosti nebo zjišťování původu uměleckých předmětů. Využití ionizujícího záření na umělecké předměty je také v ochraně před napadením plísněmi nebo dřevokazným hmyzem. (23)

3.2 Radiouhlíková metoda

Vědci jsou schopni díky této metodě určovat s velkou přesností stáří nejrůznějších archeologických předmětů. Tím výrazně napomáhají nejen archeologům a geologům, ale i historikům umění. Radiouhlíková metoda je v současnosti široce užívaná technika s rozsáhlou oblastí využití.

U zrodu radiouhlíkové (neboli radiokarbonové) metody byl americký chemik **Willard Frank Libby** (1908-1980), který se svými studenty provedl první měření a obdržel výsledky dosud prvního datování pomocí nové metody. V roce 1960 Libby obdržel Nobelovu cenu za chemii, přesněji řečeno za radiouhlíkovou metodu.

3.2.1 Princip metody

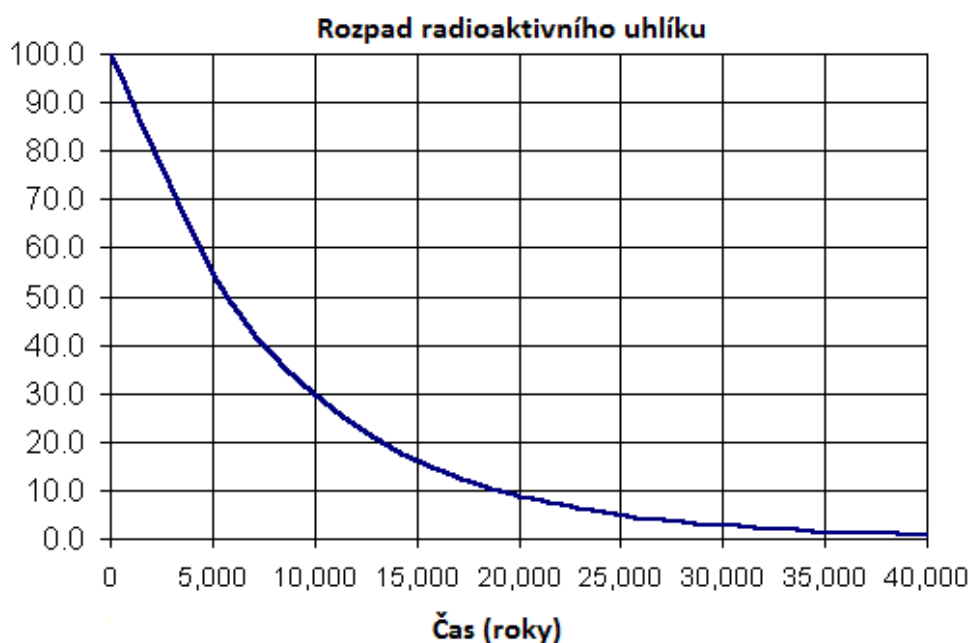
Tato metoda je založena na faktu, že uhlík v přírodě je směsí tří izotopů. Dva z nich jsou stabilní ^{12}C a ^{13}C a ten, který nás zajímá, je radioaktivní izotop ^{14}C . Již tehdy bylo známo, že kosmické záření produkuje spršky neutronů dopadající na atomy v zemské atmosféře. Kosmické záření vyvolává řadu jaderných reakcí, ve kterých se vytvářejí různé radioaktivní nuklidy. Jedním z nejvíce zastoupených je izotop uhlíku ^{14}C vznikající srážkou atomu dusíku ^{14}N s neutronem sekundárního kosmického záření.

Libby usoudil, že by se nepatrné množství tohoto izotopu mělo také vyskytovat v atmosférickém oxidu uhličitém. Tento plyn přirozeně přechází do živých organismů, kde se ustanoví rovnováha mezi příjmem ^{14}C a jeho úbytkem radioaktivní přeměnou. Po odumření organismu se zastaví přísun nového ^{14}C , takže koncentrace ^{14}C dále jen ubývá. Od tohoto okamžiku se v těle začne měnit poměr mezi radioaktivním izotopem uhlíku ^{14}C a stabilními izotopy ^{12}C a ^{13}C , jejichž koncentrace zůstává v průběhu času stejná. Postupně dochází k rozpadu uhlíku ^{14}C . Vyzařuje přitom částice beta, které je tvořeno elektrony a mění se na stabilní izotop dusíku ^{14}N . Dobu, která uběhla od smrti zkoumaného organismu, následně stanovíme z poměru mezi zastoupením radioaktivního a stabilního izotopu uhlíku, které se nacházejí v těle. Z poměru ^{14}C k ^{12}C lze usuzovat stáří organických látek.

Míru rozpadu lze změřit, kdy poločas přeměny tohoto izotopu je 5 730 let. To je dostatečně dlouhá doba na to, aby radiouhlíková metoda dokázala objevovat nová fakta. Zajímavé je, že Libby takto dokázal datovat lněné obaly Svitků od Černého moře, chléb z Pompejí pohřbený erupcí Vesuvu v roce 79. n. l., dřevěné uhlí ze svatyně Stonehenge i kukuřičné klasy z jeskyně v Novém Mexiku. V současnosti ve světě existuje více než stovka laboratoří, které datují s využitím radiouhlíkové metody. (24)

3.2.2 Princip měření

Měření spočívá v tom, že musíme mít vzorek materiálu organického původu a ze stanovení koncentrace uhlíku ^{14}C v něm obsaženého dopočítáme jeho stáří. Za daných 5 730 let poklesne relativní obsah ^{14}C ve vzorku na polovinu. Zjištěním jeho poměru ke stabilnímu ^{12}C je pak možné vypočítat dobu, kdy byl vzorek vyřazen z koloběhu v přírodě. Tato metoda se používá zejména na vzorky organický nálezů, které jsou mladší než 57 000 let. Po tak dlouhé době (asi 10 poločasů přeměny) je již množství radioaktivního uhlíku ve vzorku prakticky neměřitelné.



Obrázek 3: Znáornění závislosti aktivity uhlíku ^{14}C na čase (24)

Často jsou použity vzorky pro datování organického původu, avšak tato metoda umí měřit i vzorky anorganické. Při jejich vzniku se do nich zabudovával atmosférický uhlík, nejčastěji do formy uhličitánů (např. krápníkové útvary) a nedocházeli již k jeho výměně.

Měření koncentrace izotopu ^{14}C na základě jeho radioaktivní přeměny a emitovaného záření je poměrně málo výrazné. Elektronů, jež ho tvoří, mají celkem nízkou energii. K tomu se ^{14}C vyskytuje ve vzorcích v extrémně nízkých aktivitách a

kvůli tomu je ^{14}C extrahován a je převeden přímo do detekčního média v detektoru ionizujícího záření.

3.2.3 Laboratorní metodika

Ze vzorku se musí odstranit všechny složky obsahující uhlík a přírodní nečistoty jako kořínky, hornina aj. Poté se vzorky většinou spalují v proudu kyslíku na oxid uhličitý, který je výchozí látkou pro syntézu kapalného media – benzenu. Po syntéze benzenu z CO_2 vznikne výsledný C_6H_6 a změří se beta záření – aktivita ^{14}C a vypočte se stáří. Aktivitu ^{14}C lze měřit několika způsoby, ale každý způsob má své nedostatky i přednosti. Jde o měření extrémně nízkých aktivit a tomu musí být uzpůsobeny i přístroje. Vyznačují se vysokou citlivostí a nízkým pozadím. Podle principu se dělí na plynem plněným proporcionalním detektor, kdy uhlíkový vzorek je před měřením převeden na oxid uhličitý či acetylen. Dále je to kapalný scintilační detektor, kdy se vzorek převede do kapalné podoby (benzen) a následně se přidá scintilátor (látka, která při interakci s ionizující částicí vydává světelné záblesky). V poslední řadě se jedná o hmotnostní spektrometrii na urychlovačích (AMS). Je velmi citlivý a k samotnému datování stačí kolem 1 mg uhlíku.

3.2.4 Nevýhody metody

Problém s používáním uhlíku ^{14}C je jeho obtížná detekce. Jako zářič vykazuje tento izotop ve zkoumaných materiálech nízkou aktivitu a jím vysílané záření beta má malou energii. ^{14}C se proto musí extrahovat ze vzorků a převést přímo do detekčního média v detektoru ionizujícího záření (např. převádí se do formy CO_2 , acetylenu i benzenu). Toto chemické odseparování uhlíku ze vzorku se nejlépe provádí jeho spálením, vzniklý oxid uhličitý lze pak snadno zredukovat na uhlík. To právě omezuje použitelnost metody jen na objekty, z nichž lze bez náhrady odebrat dostatečně velký vzorek a dojde ke zničení vzorku. (25)

3.3 Neutronová aktivační analýza (NAA)

Jedná se o přesnou analytickou metodu, která stanovuje prvkové složení daného vzorku. Zároveň tato metoda je nedestruktivní a patří k nejcitlivějším, kdy umožňuje detekovat přítomnost prvku od koncentrací 10^{-12} g v 1g vzorku. Při využití této metody se odebere velmi malý vzorek a vystaví se proudu tepelných neutronů v jaderném reaktoru nebo v generátoru neutronů. Při srážkách neutronů s atomy ve vzorku dochází k jaderným reakcím. Většina nuklidů, které vznikly, jsou nestabilní a rozpadají se. Pro nás jsou důležité rozpadové reakce, u kterých dochází zároveň k emisi γ -záření, které se analyzuje gamaspektrometrem. Energie γ -záření je charakteristická pro každý radionuklid i prvek, jehož ozářením radionuklid vznikl. Každý nuklid se od sebe liší i poločasem rozpadu. Měření spektra γ -záření se tedy provádí na témže vzorku několikrát a za určitých časových odstupů. V pozdějších měřeních můžeme pozorovat více zastoupených dříve žijících nuklidů.

V případě této metody je s ohledem na citlivost zapotřebí co největších toků tepelných neutronů. Zdrojem je většinou výzkumný jaderný reaktor. V ČR je jediným vhodným reaktorem pro aktivační analýzu reaktor LVR-15 v Ústavu jaderného výzkumu Řež. Energetické jaderné reaktory, jako např. v jaderné elektrárně Dukovany, nejsou pro tento účel vybaveny ozařovacími kanály. (26)

Neutronová aktivační analýza využívá poznatků, že složení různých artefaktů se liší zejména z hlediska obsahu minoritních a stopových prvků jak podle místa původu, tak i podle doby vzniku. Mnoho aplikací této metody se týká keramiky, zejména v řešení jejího původu. Keramika však není jediný vhodný artefakt pro analýzu. Podobně je na tom i zkoumání složení kamene, skla, kovů a slitin.

Některé prvky však nelze stanovit, protože reakcí s neutrony nevzniká nuklid, který se rozpadá za emise γ -záření (prvky s protonovým číslem 1 až 9, dále P, S, Y, Pb a Bi). Nevýhodou metody je i časová náročnost analýzy a nákladné zařízení. (27)

3.4 Aktivační analýza s nabitými částicemi (CPAA)

Metoda aktivační analýzy je založena na využití jaderných reakcí, kterými se vytvoří radioaktivní nuklidy z jader stabilních prvků, přítomných ve zkoumaném vzorku. Každý takto vzniklý radionuklid má charakteristické vlastnosti jako je energie a druh emitovaného záření i poločas rozpadu. K tomu, aby došlo k vytvoření radionuklidu, je potřeba bombardovat vzorek tokem aktivujících částic nebo fotonů. Podle druhu aktivujících částic je pak odtud aktivační analýza nabitými částicemi (charged particle activation analysis - CPAA). Pro použití CPAA (jako pro NAA) je nezbytné mít dostatečně mohutný zdroj a tím nejlepším je jaderný reaktor.

Nejrozšířenější varianta CPAA funguje na základě ostřelování vzorku vysoce energetickými protony, kdy se vytvoří radioaktivní nuklidy uvnitř materiálu zkoumaného vzorku. Tato metoda je vhodná pro kvantitativní stanovení stopových množství lehkých prvků, jako je kyslík, bor a dusík. Stanovuje tedy prvkovou koncentraci v povrchové vrstvě pevných vzorků. Identifikací těchto radionuklidů (měření poločasu rozpadu nebo energii emitovaného záření) nám vyjde kvalitativní analýza, zatímco měření aktivity nám vyjde kvantitativní analýza. Dosud byla CPAA úspěšně aplikovaná v řadě analytických problémů pro stanovení stopových koncentrací prvků ve velikosti této povrchové vrstvy. (28)

3.5 Rentgenfluorescenční analýza (RFA)

Jedná se o nedestruktivní metodu, jejíž použití se nemusí omezovat na laboratoř, ale lze ji s výhodou používat i v terénu. Často se používá ke studiu památek. S dostatečnou přesností dokáže stanovit chemické složení zkoumaných vzorků. RFA analýza má velkou přednost v tom, že je rychlá, přesná a nevyžaduje žádné chemické zpracování vzorků. Zkoumaný vzorek se v žádném případě nepoškozuje a může být v kapalné i pevné formě. Lze zkoumat i celé předměty, bez toho aniž by se odebíraly vzorky.

3.5.1 Využití metody

Metoda se uplatnila zejména u středověké a novověké keramiky s glazovanými povrchy. Významné výsledky dosáhla zejména u keramiky s bohatě malovanými dekory. Zde právě bylo možné provést celou řadu měření u nejrůznějších barev. Zabývá se také analýzou složení historických předmětů, což pomáhá jejich časovému zařazení, zjištění původu i ověření pravosti materiálu. Význam má i při zkoumání uměleckých děl, například složení barev. Dříve si malíři barvy míchali sami a to bylo pro ně typické. Toho se pak využívá při určení originality daného obrazu i restaurování.

3.5.2 Princip metody

Tato metoda je založena na měření charakteristického rentgenového záření vzbuzeného ozařováním zkoumaného vzorku. Zkoumaný vzorek ozařujeme buď X-zářením z rentgenové lampy, nebo zářením gama z vhodného radionuklidu. RFA využívá jednoho typu interakce ionizujícího záření s hmotou, konkrétně fotoefektu. K fotoefektu dochází většinou na slupce K, načež při přeskoky elektronů z vyšší slupky L na uvolněné místo dochází k emisi charakteristického X-záření. Jeho energie je jednoznačně určena protonovým číslem Z atomu. Spektrometrickou analýzou energie (vlnové délky) takto vzniklého fluorescenčního záření lze zjistit, které prvky jsou přítomné ve zkoumaném vzorku. Podle intenzity vzniklého fluorescenčního záření lze určit množství těchto prvků ve vzorku.

K detekci charakteristického X – záření se pro jednodušší měření používají scintilační detektory, avšak pro přesnější laboratorní analýzu je třeba použít polovodičový detektor s vysokým rozlišením. (29)

3.6 Emise záření vyvolané těžkými nabitými částicemi (PIXE)

Tato moderní analytická metoda umožňuje analyzovat elementární složení materiálu od sodíku až po uran s 5% přesností. Neanalyzuje lehké prvky (použití vysoce intenzivních MeV svazků iontů způsobí ztráty právě lehkých prvků, například vodík a

kyslík) a jde o poměrně drahou, neinvazivní bodovou analýzu. Neinvazivní je ovšem jen v případě, že analyzovaný objekt má natolik malé rozměry, že jej lze dopravit do laboratoře. Lze ji použít ke studiu povrchu objektu, kdy maximální hloubka analyzované vrstvy je 50 μm . V archeometrii se především používá pro analýzu kovů nebo pigmentů na bázi kovů. Již několik let tuto metodu používá obrazárna a museum Louvre.

Budicím zářením jsou zde protony (energie řádově MeV) a excitovanými částicemi pak ionty z povrchu analyzovaného materiálu, nejčastěji H^+ . Zdrojem protonů je urychlovač a právě díky tomu je dostupnost této metody velmi omezena. Na vzorek se nejčastěji používá proud protonů nebo α částic o energii 2-5 MeV. Svazek částic se vyvede z urychlovače a je dále fokusován primárním kolimátorem. Primární svazek částic se snažíme fokusovat na co nejmenší průměr (cca $10 \times 30 \mu\text{m}$), aby byl plně využit analytický potenciál PIXE. Komora vzorku je vybavena goniometrickým držákem vzorků, dovolujícím posuv ve směrech x, y, z. Nastavení polohy analyzovaného místa vyžaduje optický mikroskop a osvětlení vzorku pak vláknovou optiku. Uvnitř komory vzorku můžeme umístit několik detektorů. (30)

3.7 Elektronová mikrosonda (EMP)

Elektronová mikrosonda umožňuje získat údaje o chemickém složení povrchu zobrazeného elektronovým mikroskopem. Elektronový mikroskop je zařízení, které se od optického mikroskopu (využívajícího pro docílení zvětšení soustavu optických čoček) liší tím, že se používají nikoliv světelné paprsky, ale svazek elektronů.

Tato metoda navzájem spojuje elektronový mikroskop a rentgenový spektrometr. Svazek elektronů ze zdroje (například elektronová tryska) urychlený napětím až 50 kV je zaostřeno na plochu tuhého vzorku, kde elektrony proniknou do hloubky několika μm pod povrch vzorku. Po dopadu elektronů na povrch vzorku způsobuje takzvanou prvotní excitaci (vybuzení) elektronů v atomech vzorku. Současně nastává několik procesů: část elektronů je absorbována, část odražena a pro nás důležité je emise sekundárních elektronů (nepružné srážky) a emise rentgenového záření. Emitované primární

rentgenové záření vzniklé ve vzorku je analyzováno v rentgenovém spektrometru. Absorbované elektrony tvoří zhruba 50-90% celkového proudu elektronů. Odražené elektrony mají energii o něco menší než elektrony dopadající, ale řádově srovnatelnou. Sekundární elektrony mají energii ještě podstatně nižší. Průměr elektronového svazku je zhruba 1 μm , což umožňuje provádět téměř bodovou analýzu z vybraného místa na vzorku. EMP je u malých artefaktů nedestruktivní, problém nastává u větších artefaktů, kdy je nutný odběr vzorku. Tato metoda zjišťuje prvkové složení kovů, skla, keramiky, pigmentů a dalších. (31)

3.8 Termoluminiscenční datování (TL)

Metoda, která zjišťuje stáří keramických materiálů založená na jaderných procesech. Luminiscence je schopnost některých látek světélkovat po dodání energie různého typu. Při studiu termoluminiscence se měří světlo, emitované látkou při jejím ohřevu a zdrojem excitace je tepelná energie.

Obecně je používána na materiál, který prošel tepelným zpracováním při vysokých teplotách (vypalovaná keramika, cihly). Princip metody je v tom, že v některých pevných látkách mohou být působením ionizujícího záření vyraženy elektrony ze svých stabilních poloh v elektronových obalech a zachyceny v metastabilní poloze. Uvolní se opět při dodání energie zvnějšku, například ohřevem látky. Při následných přechodech mezi jednotlivými energetickými hladinami mohou tyto elektrony emitovat elektromagnetické záření, často ve viditelné oblasti. Počet zachycených elektronů je úměrný dávce záření, světelný tok je úměrný počtu zachycených elektronů. Dávka záření, kterou materiál obdržel a kterou můžeme změřit pomocí termoluminiscenční odezvy, je úměrná stáří předmětu od jeho vypálení. Je potřeba, aby materiál obsahoval látku, u které takové vhodné metastabilní stavy existují. Často se využívá křemen. Světelný signál vzniklý při ohřátí materiálu je úměrný celkové dóze radioaktivního záření, které je během své existence předmět vystaven. Tedy na obsahu těžkých radionuklidů jako jsou draslík, thorium a uran, v něm samotném i jeho okolí. Musíme také vědět, že předmět nebyl zahřát například při požáru (pak lze termoluminiscenční

metodu využít pro dataci tohoto požáru). V ideálním případě lze touto metodou dosáhnout přesnosti v datování s odchylkou $\pm 3-10 \%$. (8), (32)

3.9 Praktické měření

V této části jsem se zaměřila na rentgenfluorescenční metodu, konkrétně na mobilní analyzátor, právě pro její největší využití mezi archeology. Mobilní analyzátory archeologové často používají při své práci v terénu a v tom spočívá velké pozitivum. Zajímala mě právě bezpečnost při práci s těmito přístroji a provedla jsem měření, na kterém jsem zjistila, zda tato metoda má významná rizika z hlediska radiační ochrany či nikoliv.

K tomuto měření jsem použila mobilní analyzátor Thermo Scientific NITON XL2 GOLDD, který je k dispozici na Archeologickém ústavu Jihočeské univerzity.



*Obrázek 4: Mobilní analyzátor Thermo Scientific NITON XL2 GOLDD
(vlastní zpracování)*

Thermo Scientific NITON XL2 GOLDD

Americká firma Thermo Scientific se prezentuje modulárním systémem pro měření radioaktivity a zároveň je největším světovým výrobcem ručních spektrometrů. Mobilní analyzátory NITON byly vyvinuty pro přesnou, rychlou a nedestruktivní chemickou analýzu kovů, drahých kovů, plastů, půd, zemin, rud.

Primární zdroj u analyzátoru je minirentgenka 45kV se stříbrnou anodou. Hmotnost je pouze 1,3 kg, což je velké plus při manipulaci v terénu. Má barevný displej, který je prachu vzdorný a vodotěsný. Ovládá se pomocí dotykové obrazovky nebo čtyřsměrného tlačítka (software je v češtině). Analyzátor je na baterie, přičemž jedna vydrží 8 hodin a dodávají se 2 baterie. Velké plus jsem shledala i v tom, že naměřené výsledky se dají přenést do PC pro další zpracování. Má výkonný a rychlý výpočetní systém – 3 mikroprocesory. Více než 25 000 přístrojů po celém světě jsou zakoupeny právě NITON, což činí 76 % na světovém trhu.

Na druhé straně jsem musela adekvátně zvolit přístroj, který byl vhodný k tomuto měření. Vybrala jsem měřič dávkového příkonu FH 40G-10, který jsem zapůjčila z jaderné elektrárny Temelín (ETE).



Obrázek 5: Měřič dávkového příkonu FH 40G-10 (vlastní zpracování)

FH 40G-10

Tento přístroj slouží pro měření příkonu dávkového ekvivalentu. Standardní funkce je režim měření příkonu, ale dá se využít i v režimu čítače. Hmotnost přístroje je 410 g bez baterií, takže je velmi příjemný na obsluhu. Rozsah měření je 10 nSv/h – 1 Sv/h a typ detektoru je proporcionální čítací trubice. V režimu čítače jsou počítány pulsy vyvolané v rozmezí předvolené doby měření. Z těchto hodnot je vypočten dávkový příkon.

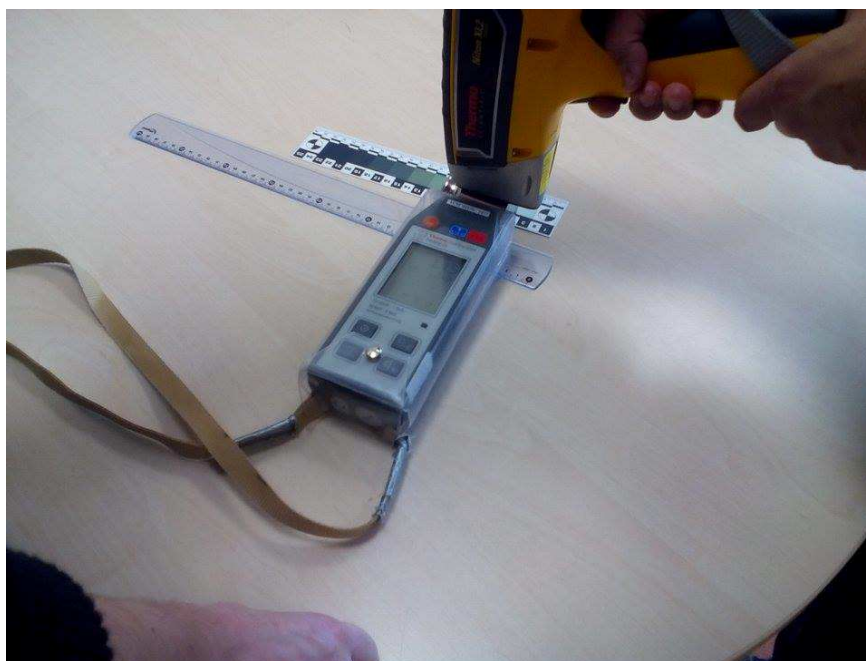
Za asistence PhDr. Jana Johna, Ph.D. jsem pomocí měřiče dávkového příkonu FH 40G-10 měřila příkon dávkového ekvivalentu u přístroje Niton XL2 GOLDD.

K samotnému měření jsme spektrometr kontaktně přiložili ke zkoumanému předmětu (ocelové závaží \varnothing 4 cm), na kterém jsme provedli analýzu složení. Současně jsem provedla měření dávkového příkonu přístrojem FH 40G-10 přes měřený předmět. Vybrala jsem více druhů předmětů s rozdílným průměrem a složením, abych zjistila závislost velikosti ionizujícího záření ze spektrometru za těchto hodnot.



Obrázek 6: Měření dávkového příkonu přístrojem FH 40G-10 (vlastní zpracování)

Měření jsem provedla i v závislosti na rozdílném úhlu postavení mobilního analyzátoru a měřiče dávkového příkonu.



*Obrázek 7: Měření dávkového příkonu přístrojem FH 40G-10 pod jiným úhlem
(vlastní zpracování)*

Konkrétní předměty byly použity bronzový meč, ocelové závaží o \varnothing 4 cm a stříbrná mince o \varnothing 1cm.



Obrázek 8: Měření mince, která leží na mobilním analyzátoru (vlastní zpracování)

Současně jsem zkoumala příkon dávkového ekvivalentu v závislosti na vzdálenosti od spektrometru a zkouška měření proběhla i bez zkoumaného předmětu (kolik spektrometr sám o sobě vyzařuje).



Obrázek 9: Vzdálenost měřiče od spektrometru 10 cm (vlastní zpracování)



Obrázek 10: Vzdálenost měřiče od spektrometru 30 cm (vlastní zpracování)

Naměřené hodnoty jsem vložila pro přehlednost do tabulky:

Tabulka 3: Výsledky měření (vlastní zpracování)

	Naměřená hodnota – FH 40G-10
Bronzový meč	kontaktně 700 $\mu\text{Sv/h}$
Ocelové závaží \varnothing 4 cm	kontaktně 220 $\mu\text{Sv/h}$
Stříbrná mince \varnothing 1 cm	kontaktně 2 mSv/h
Vzdálenost od spektrometru 10 cm	24,3 $\mu\text{Sv/h}$
Vzdálenost od spektrometru 20cm	21,3 $\mu\text{Sv/h}$
Vzdálenost od spektrometru 30 cm	18,4 $\mu\text{Sv/h}$
Vzdálenost od spektrometru 40 cm	12 $\mu\text{Sv/h}$
Vzdálenost od spektrometru 50 cm	8,43 $\mu\text{Sv/h}$
Spektrometr bez předmětu	kontaktně 124 mSv/h

Po tomto měření jsem udělala ještě zvláštní měření přímo na ruku člověka, který spektrometr obsluhoval. Zjistila jsem, že člověk držící spektrometr není vystaven radiační zátěži.

Nakonec jsem ještě změřila předmět před ozáření a po ozáření spektrometrem. Naměřené hodnoty se od sebe nijak nelišily a byly srovnatelné s přirozeným pozadím.

4 DISKUZE

Zkoumání a měření pomocí výše uvedených metod je jistě zajímavá práce. Shledala jsem na nich určitá pozitiva, která významně usnadňují práci zejména archeologům při objasňování historie a zasazování předmětů do kontextu časového datování. Metody, které používají jaderné procesy, jsou prakticky nezávislé na vnějších podmínkách, jako je teplota, tlak a vlhkost prostředí (poločas rozpadu není těmito veličinami nijak ovlivněn). Ale většinou jsou situovány do tomu přizpůsobených laboratoří. Velké plus patří i faktu, že nedestruktivní metody nijak nepoškozují vzorek, kterým může být významný artefakt a nebrání tak dalšímu použití v jeho nezměněné formě. Záření může proniknout i do míst jinak nepřístupných. Metody založené na pronikavém záření gama umožňují měření „do vnitra vzorku“ bez nutnosti jeho zničení. Většina radiačních metod se vyznačuje vysokou citlivostí, jako například neutronová aktivační analýza. Technika u těchto metod je na velmi vysoké úrovni, a tak je možné výsledky zpracovat včetně digitálního počítačového vyhodnocení.

Při radiouhlíkové metodě patří ^{14}C mezi radionuklidy významné z hlediska radiační ochrany, ale významná rizika tato metoda nepřináší. Jako zářič vykazuje tento izotop nízkou aktivitu a tím pádem má vysílané záření beta malou energii. Touto metodou měříme především přírodní radioaktivitu a žádná dodatečná, eventuálně indukovaná radioaktivita se změřit nedá.

U dalších typů emisního radiačního měření není používán vnější zářič, protože zdrojem záření je samotný vyšetřovaný objekt, který je radioaktivní. Radioaktivita je do zkoumaného vzorku buď zavedena ve formě radioindikátoru, nebo je uvnitř vzorku indukována ozařováním vhodným zářením, které vyvolá v jádrech vzorku jaderné reakce (původně neaktivní jádra se mění v radioaktivní). Takto je tomu u aktivačních analýz, zejména neutronové.

Často diskutovaná otázka se nabízí, zda se materiál stane radioaktivním po vystavení určitým druhem záření. Při ozáření daná látka absorbuje zářivou energii, kterou by mohla dále vyzařovat. Toto tvrzení je však ve většině případů chybné (i když někomu přijde logické) a při běžných aplikacích k tomu nedochází.

Vysvětlení je takové, že při ozáření zářeními X, β , γ o energiích menších než cca 10 MeV dochází k excitacím a ionizacím atomů ozařované látky, které jsou doprovázeny sekundárním zářením. Ozařovaný předmět tedy během expozice vydává sekundární záření – jeho intenzita je však jen zlomek procenta intenzity primárního svazku. Po ukončení expozice záření dochází téměř okamžitě k deexcitacím a látka vůbec nezáří. Z toho důvodu tedy pacient nezáří po rtg vyšetření ani po radioterapeutickém ozařování gama nebo X.

Při ozařování neutronovým zářením je z hlediska radiační ochrany složitější situace. Záření může vyvolat jaderné reakce a vzhledem k původně neradioaktivnímu materiálu mohou vznikat radionuklidy. Z tohoto hlediska se jedná o energii vyšší než cca 10 MeV. Tento materiál může i po skončení expozice zářením nějakou dobu zářit (materiál zaktivuje). To platí pro vzorky vystavené NAA, i slabě a krátkodobě září pacienti po radioterapii zářením vyšším než 10 MeV. Avšak intenzita tohoto záření exponenciálně klesá s rychlostí danou poločasem rozpadu daného radionuklidu a mírou jeho vylučováním z těla.

K těmto metodám bohužel nemáme žádné měření a odborná literatura také žádné výsledky neuvádí. Avšak z literárních pramenů se předpokládá, že člověk pracující s těmito metodami není vystaven značným dávkám, které by byla nějak významné z hlediska radiační ochrany. To je pochopitelné z toho důvodu, že pro měření je nutné indukovat jen malý počet radioaktivních jader, které, jak bylo zmíněno, se také rozpadají velmi rychle. Takže k rizikové expozici archeologa nedojde.

Z výsledků vlastního měření jsem došla k závěru, že ani předměty po rentgenfluorescenční analýze nezáří. Mince o \varnothing 1 cm prokazovala před ozářením spektrometrem stejnou hodnotu jako po ozáření (od pozadí se nijak nelišila).

Rentgenfluorescenční analýza k detekci charakteristického X záření používá scintilační detektory pro jednodušší měření. Zkoumaný vzorek nepoškozuje a nedochází k vytvoření umělé radioaktivity. Zároveň je rychlá a přesná a nevyžaduje žádné chemické zpracování vzorku. Je tedy vhodná i pro analýzu složení vzácných předmětů.

Z mých naměřených hodno, je dále patrné, že pro archeologa neexistují významná rizika z hlediska radiační ochrany při běžném manipulování s mobilním analyzátořem.

Při práci pana PhDr. Jana Johna, Ph.D s mobilním analyzátozem jsem mu změřila ruku, která přístroj obsluhovala a naměřené hodnoty se nijak nelišily od přirozeného pozadí. Samozřejmě se mobilní analyzátor NITON XL2 GOLDD musí používat v souladu s pokyny pro užívání. Tím je myšleno zbytečně nevystavovat sebe ani okolí úmyslným ozařováním z přístroje, jelikož naměřená hodnota 124 mSv/h může mít neblahý vliv na zdraví člověka z dlouhodobé expozice touto dávkou. Z tohoto hlediska není riziko zcela vyloučené. Archeolog, který by nedbal pokynům a vystavil kůži dávce z analyzátoru po dobu 1 minuty při každém analyzování předmětů, tak příkon dávky na kůži by byl 2,1 mSv/min. Dále bereme v úvahu, že ruka by byla exponována 20x do roka, úvazek dávkového ekvivalentu po dobu 1 roku by činil 42 mSv/rok. Tuto hodnotu mohu srovnat s obecným limitem pro obyvatelstvo, který je 50 mSv/rok, tedy by nepřekročil tento limit. Kdyby tuto metodu prováděl častěji a exponoval vždy delší čas, tak je patrné, že přesáhne limit 50 mSv/rok. Nicméně je nepravděpodobné, že by tato situace nastala, jelikož archeologové dodržují předepsané pokyny pro manipulaci a jsou s nimi obeznámeni. Z vyhlášky č.307/2002 Sb. o radiační ochraně v platném znění vyplývá, že všechna zařízení obsahující zdroj ionizujícího záření podléhají pro užívání v ČR schvalování ze strany SÚJB.

Z odborné literatury jsem dále zjistila, že všechny přístroje, které jsou využívány v archeologii, se sestavují tak, aby pro pracovníky nepředstavovaly rizika z hlediska radiační ochrany. Faktor, který jsem shledala jako nejdůležitější ze způsobů ochrany je ochrana vzdáleností. Na samotném měření, které jsem provedla, je prokázáno, že s klesající vzdáleností klesá i dávkový příkon, jelikož se jedná o bodový zdroj.

5 ZÁVĚR

Ionizující záření vyvolává ve společnostech určité obavy. Je lidskými smysly nevnímátné a může mít na zdraví negativní změny. V myšlení lidí je spjato s vojenskými činnostmi a nehodami v jaderných elektrárnách (Černobyl, Fukušima). Proto vyvolává mezi lidmi tajemnou hrůzu z nepoznaného nebezpečí, ne však zcela právem. Ionizující záření patří neodmyslitelně k pozemskému životu a doprovází celý vývoj života na Zemi.

IZ nám však přineslo od svého objevení německým fyzikem W.C. Röntgenem mnoho zajímavých a pro nás užitečných poznatků. Využívání radioaktivity umožnilo převratné změny v medicíně, zemědělství, průmyslu i archeologii a ochraně památek. Archeologové díky použití IZ získávají daleko ucelenější pohled do minulosti. Metody s IZ v archeologii dokáží určit stáří artefaktů, rozpoznat přesné složení vzorků a restaurovat historické památky.

Výzkumná otázka, na kterou jsem měla odpovědět v mé práci, byla: Existují při archeologických výzkumech významná rizika z hlediska radiační ochrany? Je nám známo, že při práci se zdroji IZ je důležitá radiační ochrana a důsledně se dbá na její dodržování. Z mého výpočtu, který jsem provedla na mobilním analyzátoru NITON XL2 GOLDD (rentgenfluorescenční metoda), jsem pomocí měřiče dávkového příkonu zjistila, že člověk obsluhující přístroj není vystaven radiační zátěži. Avšak samotná hodnota, kterou jsem naměřila kontaktně 124 mSv/h vydávaná spektrometrem je znepokojující z hlediska, že by pracovník nedbal pokynům bezpečného zacházení. Z odborné literatury jsem zjistila, že i při ostatních metodách používaných v archeologii, je důležité dodržovat způsoby radiační ochrany. U metod, které ke svému použití potřebují jaderný reaktor (neutronová aktivační analýza a aktivační analýza s nabitými částicemi), je zajištěn vyšší stupeň radiační ochrany v porovnání s mobilními analyzátory při práci v terénu.

6 LITERATURA

1. ŠKORPÍK, Jiří. Jaderná energie a ionizující záření. In: *Transformační technologie* [online]. Brno, 2013 [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: <http://www.transformacni-technologie.cz/jaderna-energie-a-ionizujici-zareni.html>. ISSN 1804-8293
2. KOLEKTIV AUTORŮ. Radioaktivita. In: *Radiobiologie* [online]. 2011 [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: <http://fbmi.sirdik.org/1-kapitola/13/132.html>
3. Sievert, becquerel, rentgen. Jak měříme radioaktivitu. In: *Atomová energie, zpravodajství - Portál Atominfo.cz* [online]. 2012 [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: <http://atominfo.cz/2012/05/sievert-becquerel-rentgen-jak-merime-radioaktivitu/>
4. KUSALA, Jaroslav. Radioaktivita slouží. In: *Jaderná energie* [online]. [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/nuklearni/k23.htm>
5. KLENER, Vladislav. *Principy a praxe radiační ochrany*. Praha: Státní úřad pro jadernou bezpečnost, 2000. ISBN 80-238-3703-6.
6. ULLMANN, Vojtěch. Jaderná a radiační fyzika. In: *V.:Astronuklfyzika* [online]. 2005 [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika2.htm>
7. ULLMANN, Vojtěch. Ionizující záření. In: *V.:Astronuklfyzika* [online]. 2005 [cit. 2016-04-29]. Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika6.htm>

8. ŠEDA, Josef. *Dozimetrie ionizujícího záření*. Praha: ČVUT, 1992. ISBN 80-01-00812-6.
9. KOLEKTIV AUTORŮ. Radioaktivita. In: *Radiobiologie* [online]. 2011 [cit. 2016-04-29]. Dostupné z: <http://fbmi.sirdik.org/1-kapitola/13/132.html>
10. Umělé zdroje. In: *Skupina ČEZ* [online]. ČEZ, a.s., 2007 [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: http://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/03/zdroje_5.html
11. HÁLA, Jiří. *Radioaktivita, ionizující záření, jaderná energie*. Konvoj, 1998. ISBN 80-85615-56-8.
12. KOLEKTIV AUTORŮ. Charakteristika ionizujícího záření. In: *Radiobiologie* [online]. 2011 [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: <http://fbmi.sirdik.org/1-kapitola/13/131.html>
13. Radiation. In: *Radiation Effects Research Foundation* [online]. 2007 [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: http://www.rerf.jp/radefx/basicno_e/radcell.htm
14. VAŇKOVÁ, Jana. *Léčba zářením*. Praha: Liga proti rakovině, 2004. ISBN 80-239-3599-2.
15. KOLEKTIV AUTORŮ. Závislost radioaktivity na druhu a tloušťce vrstvy stínícího materiálu. In: *Vzdálená školní laboratoř pro studium radioaktivity* [online]. Nadace ČEZ, 2011 [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: <http://kdt-38.karlov.mff.cuni.cz/shielding/theory.html>
16. KOLÁČEK, Bohumil. *Základy radiační ochrany: Učební texty pro přípravu personálu JE*. Brno, 2012.

17. KOLÁČEK, Bohumil. *Radiační ochrana pro vybrané pracovníky velmi významných zdrojů: Učební texty pro přípravu personálu JE*. Brno, 2012.
18. KONEČNÝ, Jiří. Radiační ochrana. In: *International Atomic Energy Agency* [online]. Austria: IAEA, 2014 [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/19/044/19044952.pdf
19. KLENER, Vladislav. *Hygiena záření*. Praha: AVICENUM, 1988. ISBN 08-087-88.
20. Radiační zátěž populace. In: *Měření elektrosmogu, geopatogenních zón a radiace v Brně, Praze a širším okolí* [online]. 2013 [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: <http://www.elektrosmog-zony.cz/radiace.html>
21. Vstup radonu do objektu a jeho chování uvnitř. In: *Státní úřad radiační ochrany* [online]. Praha: SÚRO, 2000 [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: <https://www.suro.cz/cz/prirodnioz/obecne-informace/radon-v-dome/vstup-radonu-do-objektu-a-jeho-chovani-uvnitř>
22. Vyhláška č. 307/2002 Sb., Státního úřadu pro jadernou bezpečnost o radiační ochraně. In: *Sbírka zákonů ČR*, ročník 2002, částka 113. Dostupné z: https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/vyhlasky/7_307_2002_Sb.pdf [cit. 2016-04-28]. ISSN 1211-1244
23. HLOŽEK, Martin. *Encyklopedie moderních metod v archeologii: Archeometrie*. Praha: Libri, 2008. ISBN 978-80-7277-230-8.

24. Radiouhlíkové datování: jak funguje nejrozšířenější datovací metoda. In: *Atomová energie, zpravodajství – portal Atominfo.cz* [online]. 2012 [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: <http://atominfo.cz/2012/11/radiouhlikove-datovani-jak-funguje-nejrozsirenejsi-datovaci-metoda/>
25. Radiocarbon Dating and Archaeology. In: *Beta Analytic Radiocarbon Dating* [online]. Miami, 2016 [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: <http://www.radiocarbon.com/archaeology.htm>
26. Neutronová aktivační analýza. In: *Centrum výzkumu Řež s.r.o.* [online]. Husinec - Řež, 2015 [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: <http://cvrez.cz/komerční-sluzby/ozarovaci-sluzby/neutronova-aktivacni-analyza/>
27. For chemical analysis: Neutron Activation Analysis. In: *The NMI3* [online]. 2012 [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: <http://nmi3.eu/neutron-research/techniques-for-/chemical-analysis.html>
28. Charged Particle Activation Analysis (CPAA). In: *S.H.I.Examination & Inspection,Ltd.* [online]. Japan [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: https://www.shiei.co.jp/english/cyclotron_cpaa.html
29. Jaderná fyzika a energetika: Rentgenfluorescenční analýza a studium památek. In: *3 pól - Magazín plný pozitivní energie* [online]. Simopt, s.r.o., 2014 [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: <http://www.3pol.cz/cz/rubriky/jaderna-fyzika-a-energetika/1703-rentgenfluorescencni-analyza-a-studium-pamatek>
30. Proton Induced X-ray Emission (PIXE). In: *EAI - Elemental Analysis* [online]. Elemental Analysis, 2015 [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: <http://www.elementalanalysis.com/services/proton-induced-x-ray-emission-pixe/>

31. Elektronová mikrosonda. In: *Ústav geologických věd: Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity* [online]. 2014 [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: <http://www.ugv.cz/sluzby/elektronova-mikrosonda/>
32. Fyzika a klasická energetika: Termoluminiscenční datování. In: *3 pól - Magazín plný pozitivní energie* [online]. Simopt, s.r.o., 2014 [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: <http://www.3pol.cz/cz/rubriky/fyzika-a-klasicka-energetika/736-termoluminiscenci-datovani>
33. Obecné informace o radioaktivitě a radiační ochraně. In: *FN v Motole* [online]. Praha: Fakultní nemocnice v Motole, 2012 [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: <http://www.fnmotol.cz/kliniky-a-oddeleni/cast-pro-dospele/klinika-nuklearni-mediciny-a-endokrinologie-uk-2-1/oddeleni-radiologicke-fyziky/obecne-informace-o-radioaktivite-a-radiacni-ochran/>
34. Deterministické účinky. In: *Radiobiologie* [online]. 2011 [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: <http://fbmi.sirdik.org/7-kapitola/75/752.html>
35. ULLMANN, Vojtěch. Vztah dávky a biologického účinku. In: *V.:Astronuklfyzika* [online]. 2005 [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: <http://www.astronuklfyzika.cz/RadiacniOchrana.htm>

7 SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Přehled dávek (33).....	27
Tabulka 2: Základní limity stanovené vyhláškou č. 307/2002 Sb. (22)	33
Tabulka 3: Výsledky měření (vlastní zpracování).....	52

8 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Křivka deterministických účinků (34)	25
Obrázek 2: Křivka stochastických účinků (35).....	26
Obrázek 3: Znázornění závislosti aktivity uhlíku ^{14}C na čase (24)	39
Obrázek 4: Mobilní analyzátor Thermo Scientific NITON XL2 GOLDD (vlastní zpracování).....	46
Obrázek 5: Měřič dávkového příkonu FH 40G-10 (vlastní zpracování)	48
Obrázek 6: Měření dávkového příkonu přístrojem FH 40G-10 (vlastní zpracování).....	49
Obrázek 7: Měření dávkového příkonu přístrojem FH 40G-10 pod jiným úhlem (vlastní zpracování).....	50
Obrázek 8: Měření mince, která leží na mobilním analyzátoru (vlastní zpracování).....	50
Obrázek 9: Vzdálenost měřiče od spektrometru 10 cm (vlastní zpracování)	51
Obrázek 10: Vzdálenost měřiče od spektrometru 30 cm (vlastní zpracování)	52