



STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Přirozená radioaktivita hornin v okolí brněnské aglomerace

<i>AUTOR</i>	<i>Tomáš Lefner</i>
<i>ŠKOLA</i>	<i>Gymnázium Brno-Řečkovice</i>
<i>KRAJ</i>	<i>Jihomoravský</i>
<i>ŠKOLITEL</i>	<i>RNDr. Václav Vávra, Ph.D.</i>
<i>OBOR</i>	<i>5. Geologie a geografie</i>

Prohlášení

Prohlašuji, že svou práci na téma Přírozená radioaktivita hornin v okolí brněnské aglomerace jsem vypracoval samostatně pod vedením RNDr. Václava Vávry, Ph.D. a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Dále prohlašuji, že tištěná i elektronická verze práce SOČ jsou shodné a nemám závažný důvod proti zpřístupnění této práce v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a změně některých zákonů (autorský zákon) v platném znění.

V Brně dne 20. 2. 2014

Podpis:

Masarykova univerzita



Ústav geologických věd



Jihomoravský kraj



Poděkování

Děkuji svému externímu konzultantovi RNDr. Václavu Vávrovi Ph.D. za odborné vedení mé práce a Mgr. Zdeňku Votavovi za cenné připomínky a rady.

Dále bych chtěl poděkovat Jihomoravskému kraji a JCMM za finanční podporu, díky níž bylo možné tuto práci uskutečnit.

Anotace

Práce je zaměřena na studium přirozené radioaktivity hornin. V teoretické části je shrnut význam a vlastnosti radioaktivity, způsoby měření radioaktivního záření, dále pak vliv a následky tohoto záření na lidský organismus. Také je zde shrnuta stavba geologického podloží zájmové oblasti v blízkosti brněnské aglomerace. V praktické části se zabývá měření přirozené radioaktivity prvků vybraných geologických jednotek a podle spektra záření i určení jejich podílu v horninách za pomoci gamaspektrometru PGIS. Výsledky byly zpracovány v programu Microsoft Excel a byly vyhodnoceny hodnoty průměru, minimální a maximální hodnoty, směrodatnou odchylku a dále celkový dávkový příkon u všech měřených typů hornin. Výsledky byly porovnány a bylo určeno potenciální nebezpečí poškození lidského organismu přirozeným zářením.

Abstract

The thesis is focused on natural radioactivity of rocks. In theoretical part is summarized meaning and properties of radioactivity, options of measuring radiation, influence and aftermath of this radiation to human organism. There is also summarized structure of geological bedrock in area of interest, which is situated near to agglomeration of Brno. In practical part is thesis interested in measuring of natural radiation of elements which are located in rocks of these geological units and based on radiation spectrum also destination of their portion in rocks with assistance of gamma spectrometer PGIS. Results were processed in program Microsoft Excel and also were evaluated values like average, minimal and maximal value and total dose rate in all measured kinds of rocks. Results were compared and also was determined potential danger of damaging human organism from natural radiation.

Obsah

1 Úvod	6
2 Rešerše	7
2.1 Radioaktivita a typy radioaktivních přeměn.....	7
2.1.1 Příčiny a mechanismus radioaktivních přeměn.....	7
2.1.2 Přeměna alfa.....	7
2.1.3 Přeměny typu beta	8
2.1.4 Přeměna gama a vnitřní konverze.....	8
2.2 Účinky radioaktivity na živé organismy	10
2.2.1 Negativní dopady radioaktivity	10
2.2.2 Využití radioaktivity pro léčbu	17
2.3 Detekce radioaktivního záření.....	20
2.4 Geologická stavba studované oblasti	22
2.4.1 Brněnský masiv.....	22
2.4.2 Devonská bazální klastika	23
2.4.3 Oblast Moravského krasu	24
2.5 Přirozená radioaktivita moravskoslezské části Českého masivu	25
3 Metodika	26
4 Výsledky.....	28
5 Diskuze.....	32
6 Závěr	34
7 Použitá literatura	35

1 Úvod

Radioaktivita je schopnost některých izotopů se samovolně rozpadat (přeměňovat), doprovází ji ionizující záření. Intenzita tohoto záření je v závislosti na geologickém podloží různá a při vyšších hodnotách může mít negativní dopad na lidské zdraví. Větší negativní dopad radioaktivního záření můžeme předpokládat v hustě osídlených oblastech jako např. v brněnské aglomeraci a jejím okolí. Cílem mé práce bylo měření přirozené radioaktivity geologického podloží (hornin) na vybraném území mezi Brnem a obcí Ochoz u Brna. V této oblasti je poměrně komplikovaná geologická stavba a vyskytuje se zde několik výrazně odlišných horninových typů, se kterými se můžeme setkat i na území města Brna. Výsledky měření přirozené radioaktivity budou navzájem porovnány pro jednotlivé horninové typy a bude zhodnocen možný negativní dopad na člověka. Získané výsledky bude možno využít nejen k pouhému zmapování množství záření v různých typech hornin, ale také ke stanovení velikosti případného rizika poškození lidského organismu.

2 Rešerše

V rešerši jsou shrnuty poznatky o radioaktivitě, jejích účincích a způsobech měření a geologické skladbě studované oblasti

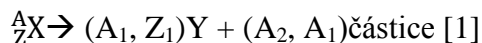
2.1 Radioaktivita a typy radioaktivních přeměn

Radioaktivita je děj, kde se jeden nestálý nuklid přemění samovolně na jiný nuklid, stabilní, či nestabilní. Z celkových více než 2000 známých nuklidů je jen 266 stálých, tudíž většina podléhá přeměně. Ta může být buď samovolná – přírodní, nebo uměle vyvolaná člověkem.

2.1.1 Příčiny a mechanismus radioaktivních přeměn

Při radioaktivní přeměně dochází k rozpadu nestabilních jader a to několika různými způsoby. Podle konkrétního rozpadového mechanismu rozeznáváme tři skupiny radioaktivních rozpadů: alfa, beta a gama. S rozpadem radioaktivního jádra je spojena emise energetického záření, které může dosahovat různých intenzit. Některé prvky mají jen jeden, jiné i více stabilních izotopů. U těchto prvků vedou příslušná protonová čísla ke stabilním jádrům v kombinaci s více hodnotami N a poměr N/Z se může měnit v jistém rozmezí, aniž by jádra ztratila stabilitu. Například u stabilních izotopů kyslíku ^{16}O , ^{17}O a ^{18}O roste N/Z od 1,00 do 1,25.

Jestliže složení jádra vybočí z optimálního rozmezí poměru N/Z, tedy má-li jádro pro určité protonové číslo příliš málo nebo mnoho neutronů, stává se jádro radioaktivním a samovolně se přeměňuje, většinou na jiné jádro a menší částici:

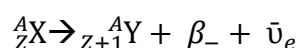


2.1.2 Přeměna alfa.

Jedná se o proud jader atomů helia, letících až 10% rychlostí světla. Proniká vrstvou vzduchu o tloušťce několika centimetrů a velmi tenkými kovovými lístky a lze jej odstínit obyčejným papírem, samotné záření má velkou energii a je tedy nebezpečné. Nuklid vznikající alfa přeměnou má o 2 nižší protonové číslo než mateřský prvek a vzhledem k původnímu postavení tohoto mateřského prvku v periodické soustavě prvků je posunut o 2 místa vlevo. [6]

2.1.3 Přeměny typu beta

Je přibližně stokrát pronikavější, než záření alfa, má však menší ionizační účinky. Je to proud elektronů, nebo pozitronů (u radioaktivity beta+, což je většinou jen umělá radioaktivita), jejichž rychlost může dosáhnout až 99% rychlosti světla. Tyto elektrony se uvolňují z neutronů, ze kterých se stávají protony. Tím se snižuje jejich poměr N/Z směrem k hodnotě nutné pro existenci stabilního jádra. Záření proniká materiály s nízkou hustotou a k jejich odstínění je potřeba kovový plech o tloušťce alespoň 1 mm. [5]



2.1.4 Přeměna gama a vnitřní konverze

Jádro vzniklé radioaktivní přeměnou se velice často vyskytuje v excitovaném stavu. Je tomu tak proto, že při změně počtu nukleonů nebo poměru mezi nimi, která je důsledkem předcházející přeměny, se nukleony ve vzniklém jádru často nevyskytují hned v nejnižších možných energetických stavech. Následuje reorganizace nukleonů do energeticky výhodnějšího stavu, tedy deexcitace jádra. Nadbytečné energie se pak jádro nejčastěji zbavuje emisí jednoho nebo několika fotonů elektromagnetického záření gama. Při emisi fotonu jde o přechody mezi stavy s diskrétní hodnotou energie, proto mají emitované fotony vždy určitou energii a spektrum gama záření je čárové, podobně jako třeba u alfa záření.

Emisi fotonu z excitovaného stavu jádra vždy provází změna jaderného spinu, protože foton má spin roven jedné. Přechody se změnou spinu $|\Delta I| = 1$ jsou nejvíce pravděpodobné. Nazývají se dovolené a jsou nejčastější a nejrychlejší. Doba života excitovaných stavů se v takovém případě pohybují v rozmezí 10^{-16} až 10^{-10} s. Velmi rychlé jsou také přechody s $|\Delta I| = 2$ (10^{-11} až 10^{-4} s). V obou těchto případech jsou tedy fotony gama záření emitovány v podstatě současně s předcházející přeměnou alfa nebo beta. Jde o tzv. okamžitou emisi gama záření. Pro její rychlost pozorujeme stejný poločas jako pro předcházející přeměnu.

U radioaktivních přeměn těžších jader se často stává, že mezi excitovaným a základním stavem vzniklého jádra leží jedna nebo i více dalších energetických hladin. V takovém případě deexcitace nastává (třeba i postupnou emisí několika fotonů) tak, že se uplatňují pouze nejpravděpodobnější přechody, tedy přechody s $|\Delta I| = 1$ nebo 2.

Přechody vyžadující $|\Delta I| > 2$ mají mnohem menší pravděpodobnost. Jsou označovány jako zakázané. Pokud není jiná možnost deexcitace (neexistuje jiná nižší volná hladina, na níž by se mohl uskutečnit přechod tak, aby se $|\Delta I|$ rovnalo 1 a projevuje se to delší dobou života excitované hladiny (10^{-3} s až roky). Emise fotonů se pak řídí vlastním poločasem, který nezávisí na poločasu předcházející přeměny. Tento případ je nazýván opožděná emise gama záření. Nuklid v excitovaném jaderném stavu s delším poločasem rozpadu gama se nazývá jaderný izomer (je označován písmenem „m“ u nukleonového čísla).

U n esféric kých jader, která mohou vykonávat rotační pohyb se kromě nukleonové (hladinové) deexcitace setkáváme i s deexcitací rotační. Základnímu i nukleonově excitovanému stavu přísluší soustava kvantových rotačních stavů a přechod mezi vyššími a nižšími stavy provází emise dalších fotonů gama záření.

Emise gama záření z excitovaných jader je běžná a prakticky velice významná. Slouží k určení aktivity a identifikaci nuklidů emitujících gama záření, některé takové nuklidy (např. ^{60}Co , ^{137}Cs , $^{192\text{m}}\text{Ir}$) jsou používány jako zdroje gama záření pro různé účely.

Alternativní způsob deexcitace jádra, běžný u jaderných izomerů, je vnitřní konverze. Je to přímý, nezářivý přenos excitační energie z jádra na orbitální elektron. Proces je umožňován překrytím vlnových funkcí orbitálního elektronu a excitovaného jádra. Orbitální elektron, který takto nabyt energie, je z atomu uvolňován jako tzv. konvertovaný elektron. Jeho kinetická energie je dána rozdílem excitační energie jádra a vazební energie elektronu. Na rozdíl od částic β . mají tedy konvertované elektrony diskrétní energii.

Pokud je spin excitovaného stavu totožný se spinem stavu základního, a mezi oběma stavy přitom nejsou žádné hladiny, je vnitřní konverze jediný možný způsob deexcitace jádra, protože jednotkový spin fotonu nedovoluje přechod s $\Delta I=0$. [3]

2.2 Účinky radioaktivity na živé organismy

Účinky radioaktivity rozumíme jejich vliv na lidský organismus, který je buď pozitivní, nebo negativní. Ve většině případů ionizující záření organismu škodí, ale v jistých výjimečných případech se dá využít i k léčbě.

2.2.1 Negativní dopady radioaktivity

Počátky studia biologických účinků ionizujícího záření na člověka sahají do počátku dvacátého století. Brzy po objevu rentgenového záření a jeho zavedení do lékařské praxe se totiž ukázalo, že dochází k poškození kůže na ozářených místech lidského těla. Účinky ionizujícího záření se projevují v určité míře u všech druhů živých organismů. Závažnost těchto účinků a hodnota dávky záření, která je vyvolává, závisí na druhu organismů. Většinou jde o účinky negativní, jsou však známé i případy, kdy jde o pozitivní změny.

Pozorované účinky ionizujícího záření mají svůj počátek vždy v dějích, které vyvolává ionizující záření v buňkách. Buňka představuje vodný roztok solí a nízkomolekulárních látek, ve kterém jsou dispergovány látky makromolekulární. Z tohoto hlediska rozlišujeme přímý a nepřímý účinek záření na buňku. Přímým účinkem rozumíme změnu biologicky důležité makromolekuly přímým zásahem částic ionizujícího záření nebo sekundárním elektronem při ozařování rentgenovým, nebo gama zářením. Přímý účinek je pokládán za závažný hlavně v případě nukleových kyselin, které záření poškozuje depolymerací, štěpením vodíkových vazeb mezi komplementárními bázemi a dalšími ději. Nepřímý účinek souvisí s radiolýzou vody a rozumí se jím změny způsobené hlavně radikály, hydratovaným elektronem a peroxidem vodíku. O tomto mechanismu svědčí mnoho poznatků. Například je známo, že enzymy v roztoku jsou vůči záření mnohem citlivější než ve vysušeném stavu.

Na úrovni molekul jsou za nejzávažnější pokládány změny, které ionizující záření vyvolává ve struktuře a biosyntéze DNA. Ať jde o účinek přímý nebo nepřímý, je jakýkoliv zásah do biochemického cyklu DNA závažný, protože následně negativně ovlivňuje syntézu enzymů, které jsou nezbytné pro mnoho dalších procesů, a to včetně těch, které řídí syntézu samotné DNA. K poškození buňky pak přispívají nejen špatně syntetizované enzymy (nemohou vykonávat svoji funkci), ale i vznikající bílkoviny, které působí na buňku toxicky a jsou jí cizí. Vyššími dávkami záření jsou způsobovány také změny v propustnosti buněčných membrán. Molekulární změny se po jisté době projevují jako pozorovatelné změny v buňkách – poruchy dělení, štěpení a jiné změny chromozómů, případně i smrt buňky po jednom nebo několika děleních. Poškození buněk je přitom závislé především

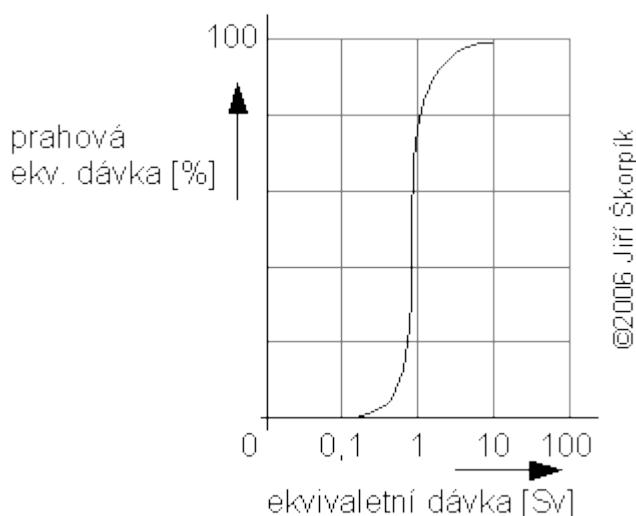
na rozmnožovacích schopnostech buňky. Vliv ionizujícího záření na buňku je tím výraznější, čím má buňka větší schopnost k tomu, aby se rozmnožovala, a čím méně je diferenciována. Proto jsou organismy vůči záření nejcitlivější na počátku vývoje, zvláště v počátečních stádiích buněčného dělení vajíčka, narušovaného zářením při procesech regulujících diferenciaci buněk. Buňky, které se nerozmnožují nebo které se dělí pomalu, jsou mnohem více odolné vůči záření a odumírají teprve při působení poměrně velkých dávek záření. Při extrémně vysokých dávkách hynou buňky již během ozařování důsledkem štěpení vnitrobuněčných bílkovin (molekulární smrt).

Biologické účinky ionizujícího záření jsou závislé také na fyzikálních faktorech. Především jde o dávku záření, která představuje celkovou energii, kterou záření sdělilo tkáni nebo organismu. Buňky mají však jistou schopnost poškození enzymaticky opravit. Opravné mechanismy se mohou projevit jen tehdy, pokud není přisun energie do buněk příliš rychlý. Proto je celkový účinek záření závislý také na dávkovém příkonu. V podstatě to znamená, že při určité dávce záření je poškození menší, pokud je tkáň nebo organismus touto dávkou ozářen ne najednou, ale je-li dávka rozprostřena rovnoměrně po delší dobu, nebo rozdělena na několik menších dávek s časovými prodlevami mezi nimi (frakcionace dávky). V časových prodlevách při frakcionaci, respektive během ozařování při menším příkonu dávek, se pak mohou uplatnit opravné procesy, při nichž speciální enzymy opravují poškozenou strukturu DNA. Účinek záření na tkáň je také závislý na druhu ionizujícího záření, což souvisí s lineární ionizací. Při určité dávce záření je poškození tím závažnější, čím větší je lineární ionizace, protože větší hustota ionizace na jednotce dráhy částice působí větší lokální poškození tkáně a buněk. Tato skutečnost je vyjadřována dávkovým ekvivalentem a ekvivalentní dávky, veličiny odvozené od dávky záření. Dávkový ekvivalent ($H=QD$) je definován jako součin dávky záření D v uvažovaném budě tkáně a jakostního faktoru Q .

Pravděpodobnost škodlivých účinků způsobených určitou ekvivalentní dávkou je pro různé tělesné orgány a tkáně různá. Proto se při hodnotě radiačního rizika u jednotlivých orgánů ještě násobí tkáňovým faktorem w_T , který bere v úvahu tuto skutečnost. Pro nejcitlivější orgány a tkáně je faktor w_T : gonády 0,20, žaludek, červená kostní dřeň a tlusté střevo 0,12, štítná žláza a játra 0,05, kůže 0,01. Součet ekvivalentních dávek, které jsou vážené s ohledem na radiační citlivost orgánů a tkání pro všechny ozářené orgány a tkáně, se nazývá efektivní dávka.

Obecně má záření na lidský organismus spíše negativní vliv. Výjimkou je tzv. hormeze a využití ionizujícího záření k léčbě nádorových onemocnění, základní klasifikace účinků záření je založena na pravděpodobnosti, s jakou se projeví po ozářením poškození.

Z tohoto hlediska se rozdělují účinky na nestochastické (deterministické) a stochastické (nahodilé).



Obrázek 1. Závislost poškození na ekvivalentní dávce. [9]

Nestochastické účinky jsou takové, které se projeví po ozáření celého těla, nebo určité tkáně, nejčastěji jednorázově, takovou ekvivalentní dávkou záření, aby v zasaženém jedinci vyvolala s vysokou pravděpodobností klinicky pozorovatelné účinky během poměrně krátké doby po ozáření. Za těchto podmínek se klinicky pozorovatelný účinek projeví proto, že v ozářených tkáních je současně postiženo větší množství buněk za podmínek, kdy se nemohou uplatnit opravné procesy. Závislost pravděpodobnosti výskytu určitého poškození na ekvivalentní dávce záření má esovitý charakter (obrázek 1) a je pro ni charakteristická určitá prahová hodnota. Menší ekvivalentní dávky než je prahová hodnota daný typ poškození nepůsobí. Křivka vyjadřuje pravděpodobnost výskytu určitého účinku při jednorázovém ozáření skupiny více osob příslušnou ekvivalentní dávkou. Za prahovou je pokládána dávka, která vyvolá příslušné poškození u 1-5% ozářených osob. K těmto účinkům se řadí:

Akutní nemoc z ozáření – nastává pouze za výjimečných okolností, kdy dochází k jednorázovému ozáření celého těla vysokými dávkami záření. Podle závažnosti se projeví poškození krevtovorných orgánů, trávicího ústrojí nebo centrálního nervového systému. Nemoc se projevuje u většiny lidí po ozáření ekvivalentní dávkou 2 Sv (Sievert) prahová hodnota je okolo 1 Sv a závisí na individuálních okolnostech. Průběh této nemoci má 3 fáze. V prvních dnech se objevují nevolnost, skleslost, bolesti hlavy, zvracení a různě závažné změny v krevním tlaku závislé na stupni ozáření. Pak následuje období latence (částečné ustupování příznaků), které je tím kratší, čím větší bylo ozáření. Konečně se dostavuje období, kdy jsou všechny počáteční příznaky plně rozvinuty a přistupuje padání vlasů, vnitřní krvácení a zvýšená citlivost vůči infekcím. Při ozáření ekvivalentní dávkou do 6 Sv převládá

hematologická forma nemoci (poškození kostní dřeně a krvetvorby), při dávkách vyšších se přidává i forma střevní, při které odumírají buňky střevní výstelky, období latence se zkracuje a závažné poškození se projevuje během 4-6 dní po ozáření. Pro střevní formu jsou charakteristické krvavé průjmy a poruchy funkce střev. Pravděpodobnost úmrtí je asi 80%, při 6 Sv, při 10 Sv se už blíží 100%. Při ozáření menšími dávkami nastává postupné zlepšování po 6-8 týdnech. U lidí, kteří nemoc z ozáření přežijí, dochází k uzdravení za různě dlouhou dobu závisící na závažnosti ozáření. Často jsou i tak vyléčení lidé postiženi dlouho přetrvávajícími následky, jako poruchy krvetvorby, poruchy funkce pohlavních orgánů, neplodnost, zvýšená vnímavost k infekcím, trvalá slabost, únava a zvýšené riziko nádorových onemocnění. Ozáření ekvivalentní dávkou větší, než 50 Sv způsobuje nervovou formu nemoci projevující se zmateností, psychickou dezorientací, bezvědomím a křečemi. Během několika hodin dochází ke smrti v důsledku oběhového kolapsu, zástavy dýchání a poruch mozku.

Dalším účinkem je akutní lokální poškození kůže. Jedná se o nejčastější typ poškození při nehodách se zdroji záření. Označuje se jako radiační dermatitida. Podle závažnosti ozáření rozlišujeme různé formy, od zarudnutí kůže až po hlubší poškození kožní tkáně a vznik vředů, které se obtížně hojí. Prahová dávka je okolo 3 Sv a výrazně se zvyšuje při frakcionaci dávky.

Dále poškození plodu – vyvíjející se lidský zárodek je vůči záření velmi citlivý a to zejména v období mezi třetím a osmým měsícem, kdy probíhá tvorba orgánů. Poškození závisí na velikosti dávky a na období vývoje, ve kterém došlo k ozáření. Děti narozené matkám, které byly ozářeny při těhotenství, bývají postiženy mikrocefalií, očními defekty, rozštěpem patra a celkovým zaostáváním (mentální retardace, zakrsllost). Zde je prahová dávka poměrně nízká – 0,05 Sv. Proto se těhotné ženy mají podrobovat rentgenovému vyšetření v břišní krajině jen v mimořádných případech.

Pak také poruchy plodnosti – ty nemají ostře vymezenou prahovou dávku. U mužů dochází při ozáření ekvivalentními dávkami 0,1–1 Sv k přechodné aspermii a trvalá aspermie se projevuje od 3 Sv. Ženy jsou z tohoto hlediska vnímavé méně. Hodnoty nižší, než 1,5 Sv nevyvolávají žádnou odezvu, trvalou sterilitu mladších žen působí s 60–70% pravděpodobností dávky větší než 2,5 Sv.

Poslední kategorií je zákal oční čočky. Ten má dlouhou dobu latence, prahová dávka je mezi 1,5 a 2 Sv a velmi závisí na frakcionaci dávky.

Stochastické účinky jsou důsledek poškození malého počtu buněk, popř. i jediné buňky. Mohou se projevit po jednorázovém ozáření, které je podprahová z hlediska nestochastických účinků nebo při chronickém ozařování těla, nebo určité tkáně malými

dávkami. Podprahové dávky nevyvolají v krátké době po ozáření žádné klinicky pozorovatelné účinky, ale mohou s jistou pravděpodobností způsobit poškození, které se projevuje za dlouhou dobu po ozáření. Stejný charakter má výskyt pozdních následků po léčbě nádorů ozařováním, kdy se sice ozařuje poměrně vysokými dávkami záření, ale zasažena je jen malá část těla v místě, kde se nachází nádor. Ke stochastickým účinkům patří leukémie, vznik nádorových onemocnění a genetické poškození další generace. Délka latentního období je uváděna u leukémie 5 – 20 roků, u nádorových onemocnění 10 – 40 roků. Stochastický charakter účinků podprahových dávek záření spočívá v tom, že ve skupině ozářených osob se neobjeví u všech jedinců, a nikdy nelze říci u koho. Pro stochastické účinky je charakteristické, že pravděpodobnost vzniku poškození je tím menší, čím menší dávkou byla skupina ozářena a rostoucí dávka záření ovlivňuje pouze pravděpodobnost vzniku poškození, ne jeho závažnost. Proto lze stochastické účinky odhalit jen při sledování větších skupin ozářených osob.

Při ozáření větší dávkou je pravděpodobné, že se v ozáření populaci po určité době objeví zřetelně zvýšený výskyt poškození, který lze jednoznačně připsat vlivům ozáření. Jako příklady takových výrazných stochastických účinků se dá uvést zvýšený výskyt leukémie mezi osobami, které přežily exploze atomových zbraní v Japonsku, zvýšený výskyt leukémie mezi osobami, které byly z léčebných důvodů ozařovány v okolí páteře, zvýšený výskyt rakoviny štítné žlázy mezi obyvateli Marshallových ostrovů, kteří v období zkoušek atomových zbraní v Tichomoří konzumovali potravu zamořenou radioaktivními látkami, zvýšený výskyt rakoviny štítné žlázy mezi dětmi na Ukrajině a v Bělorusku které byly vystaveny vyššímu příjmu radioaktivních izotopů jódu po havárii černobylského reaktoru a zvýšený výskyt rakoviny plic mezi horníky uranových dolů.

Takové zjevné stochastické účinky lze použít k výpočtu míry rizika vzniku určitého poškození. Míra rizika se vyjadřuje jako absolutní roční riziko, což je pravděpodobnost výskytu určitého onemocnění u jedné osoby během jednoho roku při ozáření ekvivalentní dávkou 1 Sv.

Při ozáření dávkou menší než 0,2 Sv můžeme očekávat, že záření vyvolá pouze stochastické účinky. Skutečné riziko malých dávek dnes nelze stanovit, lze pouze odhadnout pravděpodobný počet osob v ozářené populaci, u kterých se poškození může objevit. Přesto, že díky opravným mechanismům je vznik poškození při malých dávkách záření velmi málo pravděpodobný, převládá dosud při odhadu rizika z ozáření malými dávkami konzervativní přístup. Ten předpokládá, že stochastické účinky mohou být v krajním případě způsobeny mutací i jediné zasažené buňky, tedy že závislost výskytu poškození při malých dávkách je

bezprahová. Podle této koncepce neexistuje sebemenší spodní hranice dávky, pod kterou by poškození nemohlo nastat. I když není známo, zda závislost účinku na malých dávkách záření je nebo není lineární, konzervativní přístup ve snaze nepodcenit riziko stochastických účinků, používá lineární závislost a navíc ještě předpokládá, že se vliv malých dávek při chronickém ozařování sčítá, ignoruje tedy opravné procesy.

Při výpočtu rizika pro větší skupinu osob se vyskytuje součin ekvivalentní dávky a počtu ozářených osob. Tuto veličinu nazýváme kolektivní ekvivalentní dávka. Koncepce veličiny vychází z lineární extrapolace a konzervativního hodnocení rizika. Podle této koncepce je za jinak stejných podmínek pro určitou kolektivní ekvivalentní dávku pravděpodobnost biologického rizika stejná, tedy například ve skupině 10^5 osob ozářených dávkou 1 Sv je stejná jako ve skupině 10^6 osob ozářených dávkou 0,1 Sv.

Po již delší dobu je ale bezprahový a lineární model účinků malých dávek záření vystavován značné kritice. Ta vychází z toho, že mechanismus, kterým se normální buňka může přeměnit ve zhoubnou a posléze se rozvinout v rakovinový nádor, představuje složitý vícestupňový proces, během kterého se poškození DNA může opravit. V takovém případě se buňka může uzdravit nebo dokonce získat proti záření vyšší odolnost. Kritici bezprahového a lineárního modelu proto zastávají názor, že při složitosti buněčných procesů je účinek nízkých dávek záření v podstatě nepředvídatelný. Odmítají vyjadřovat přímkou závislost poškození na dávce. Bezprahovost a extrapolaci účinků vysokých dávek do oblastí nízkých dávek pokládají za pochybné a říkají, že vysoké kolektivní dávky získané násobením nepatrných dávek milióny ozářených lidí jsou pouze čísla, nemající reálný význam.

Mnoho údajů, potvrzujících tento názor, přinesla konference Americké jaderné společnosti roku 1994. Porovnáváním výskytu nádorových onemocnění u významně ozářených populací s populacemi neozářenými se ukázalo, že při ozáření dávkou pod 0,2 Gy (Gray, jednotka absorbované dávky záření v soustavě SI) nelze prokázat žádné škodlivé účinky, tedy vznik dodatečných případů rakoviny. Několik případů, které toto potvrzují: mezi osobami, které přežily atomové bombardování a byly ozářeny dávkami většími než 0,2 Gy byla zjištěna menší úmrtnost na rakovinu a nebyl pozorován žádný výskyt leukémie; u britských radiologů s odhadovanou celoživotní dávkou 1 – 5 Gy, ani u radiologických techniků americké armády ozářených dávkou přibližně 0,5 Gy nebyl zjištěn nadměrný výskyt rakoviny; u více než 28 tisíc pracovníků amerických jaderných loděnic ozářených ekvivalentní dávkou větší než 0,005 Sv byla zjištěna celková úmrtnost nižší o 24 %; kanadské ženy, které byly vyšetřovány na tuberkulózu rentgenovým zářením, vykazují při dávkách 0,15 – 0,25 Gy nižší než běžnou úmrtnost na rakovinu; v sedmi amerických státech na

Koloradské plošině, kde jsou dávky z přirozeného záření třikrát větší, než je celoamerický průměr, je úmrtnost na rakovinu o zhruba 15 % nižší, než je americký průměr; u stálých obyvatel radonových lázní je výskyt rakoviny a jiných nemocí nižší než normální. Mimoto je znám také tzv. ochranný efekt, nebo také adaptivní odezva. Je to zvýšená odolnost buněk vůči záření, pokud byly tyto buňky dříve ozářeny malými dávkami. Tak například v lidských leukocytech nejdříve ozářených dávkou 0,02 Gy a teprve potom dávkou 0,15 Gy byl pozorován poloviční výskyt chromozómových aberací, než u leukocytů přímo ozářených dávkou 0,15 Gy.

Dnes skutečné důkazy o přímé škodlivosti malých dávek záření neexistují a žádná statisticky významná studie o vlivu dávek do 0,2 Gy předpoklad lineárního a bezprahového růstu rizika vzniku rakoviny nepodporuje. Zdá se, že při současném stavu vědomostí nikdo neví, zda malé dávky záření jsou vůbec člověku nebezpečné. Pokud představují jisté riziko, jeví se toto riziko jako bezvýznamné a rozhodně ne větší, než jsou běžně přijímaná rizika lidských činností a mnoha jiných faktorů. Z tohoto důvodu je problematické, jestli má vůbec nějaký reálný význam odhadovat počet poškození při ozáření malými dávkami lineární extrapolací s použitím hodnot absolutního rizika získaných extrapolací z účinků větších dávek. V každém případě je nutno mít na paměti, že vypočítané množství poškození znamená pouze pravděpodobnost a nikoliv jistotu, že se skutečně tolik případů poškození projeví. Nelze ovšem vyloučit, že ve spojení s dalšími nepříznivými faktory jako jsou vrozené dispozice, životní návyky (kouření, životospráva) nebo přítomnost karcinogenů nemohou malé dávky záření ke vzniku nádorových onemocnění přispívat.

S těmito onemocněními úzce souvisí tzv. hormeze, tj. stimulující účinky malých dávek záření. Takové účinky známe u různých živých organismů. Jeden z prvních, kdo hormezi pozoroval, byl biolog Stoklasa, který v roce 1913 popsal zvýšenou fixaci dusíku bakteriemi *Azotobacterchroococcum*, které byly pod vlivem záření solí uranu. U některých druhů rostlin vyvolávají dávky rentgenového nebo gama záření menší nebo rovné 1 Gy urychlení klíčení semen, vzcházení, odnožování a růst, dřívější květenství a dozrávání, popř. zvýšenou produkci semen a zelené hmoty. Předpokládá se, že je to způsobeno biologicky aktivními látkami, které se ve velmi malých koncentracích tvoří v buňkách účinkem záření a které urychlují dělení buněk. Z pokusů na savcích se dá uvést zřetelné prodloužení života myší, které byly po celý život vystaveny osm hodin denně dávce 1 mGy. U lidí se hormeze projevuje léčivými účinky radioaktivních koupelí v lázních, ve kterých vyvěrají prameny radioaktivních vod (Jáchymov a řada lázní v jiných zemích). Mnohaletá klinická praxe ukázala, že léčebné kúry zmírňují příznaky různých onemocnění (revmatismus, infekční onemocnění nervového systému, degenerativní změny obratlů) a mají příznivý vliv na různé

metabolické a fyziologické procesy, např. na vylučování močové kyseliny nebo na sekreci žluči játry. Přisuzuje se to vlivu malých dávek záření z dceřiných produktů radonu na imunitní mechanismy, aktivaci genů a jiné děje. [3]

2.2.2 Využití radioaktivity pro léčbu

Skutečnost, že buňky s neaktivnějším metabolismem jsou vůči ionizujícímu záření nejcitlivější, již dlouhou dobu využíváme k léčení zhoubných nádorů. Je to jedna z nejdůležitějších metod léčby nádorových onemocnění. K ozařování slouží záření buď ze zdroje umístěného vně pacienta, nebo z radionuklidového zdroje uvnitř v těle pacienta. Podle toho se rozeznává vnitřní a vnější ozařování.

Ze způsobů vnějšího ozařování je nejčastějším způsobem teleterapie, tj. dálkové ozařování. Běžné jsou například kobaltové zářiče. Záření gama z ^{60}Co má energii 1,17 a 1,31 MeV a proniká k nádorům uloženým hlouběji v lidském těle. Podobný účinek má brzdné záření betatronu s energií 4-25 MeV, které vzniká při absorpci urychlených elektronů v kovovém terči. Cesiové zářiče (gama záření z ^{137}Cs o energii 0,66 MeV) se používají k ozařování nádorů uložených maximálně 5 cm pod povrchem těla. Pro dálkové ozařování ložisek na povrchu těla, případně v malé hloubce pod kůží jsou vhodné elektrony urychlené v lineárních urychlovačích (energie 7-20 MeV). Elektrony jsou pro povrchové ozařování výhodné, protože jejich dosah ve tkáni je výrazně kratší, než u gama záření, veškerou energii odevzdávají těsně pod povrchem kůže a zdravá tkáň ve větší hloubce není zasažena. K metodám vnějšího ozařování na povrchu nebo těsně pod povrchem patří kontaktní terapie, kdy je na povrch těla přikládán plošný beta zářič (^{32}P nebo ^{90}Sr).

Při vnitřním ozařování je radioaktivní zdroj záření zaváděn do těla pacienta. V brachyterapii je zářič zaváděn přirozenými tělními dutinami do těsného kontaktu s nádorovým ložiskem. Metoda je běžná v léčbě močového měchýře a nádorů dělohy. Jako zářiče jsou používány ^{60}Co , ^{137}Cs nebo ^{192}Ir ve formě drátků nebo perliček, ^{226}Ra ve formě hermeticky zapouzdřené radnaté soli a ^{252}Cf jako zdroje neutronů. Neutronové záření je výhodné pro ozařování nádorů, které jsou méně citlivé na gama záření.

Při léčbě chronických kloubových onemocnění (artritida, záněty) se osvědčilo vpravit radioaktivní nuklid přímo do kloubní dutiny. Používají se ^{90}Y , ^{169}Er , ^{186}Re a ^{198}Au v koloidní formě. Například koloidní ^{198}Au obsahuje částice zlata o rozměru 5–20 nm, stabilizované v roztoku glukózou a želatinou. Koloidní forma radioaktivního nuklidu je výhodná, protože z kloubu neuniká a neohrožuje zdravé části organismu. Koloidní ^{198}Au se používá

i k ozařování metastáz v lymfatických uzlinách. Vpravovat radionuklidový zářič přímo do postižené tkáně lze i metabolickým procesem. Metoda je označována jako endoterapie a je typická pro léčbu nádorových onemocnění štítné žlázy. Pacientovi se podává roztok Na^{131}I , radioaktivní izotop jódu se zachytí ve štítné žláze a tam ozařuje nádorovou tkáň. Z ostatních metabolických procesů lze uvést podávání ^{32}PO nebo ^{89}Sr , nebo nověji také komplexů ^{186}Re nebo ^{153}Sm s organickými fosfáty. Tyto preparáty se používají při léčbě kostních metastáz, popř. k tišení bolestí způsobených těmito kostními metastázemi. V poslední době jsou intenzivně studovány možnosti tzv. radioimunoterapie. V této metodě je radioaktivní nuklid vázán na monoklonální protilátku nebo receptorový ligand a v této formě se v organismu selektivně váže na specifické antigeny nebo receptory v nádorových buňkách. Uvádí se, že vysoká specifická cílové tkáně pro značenou protilátku nebo receptorový ligand je nadějná pro léčbu drobných rozestých metastáz, které nelze operativně odstranit.

Dávky, kterými se nádory ozařují, se nejčastěji pohybují v rozmezí 50 až 60 Gy. Aby došlo k co nejmenšímu poškození zdravé tkáně mezi zdrojem záření a nádorem, případně v blízkosti nádoru, a mohly by se projevit opravné mechanismy a celková dávka se většinou frakcionuje po 2 Gy. To znamená, že je-li například třeba ozářit dávkou 60 Gy, ozařuje se třicetkrát po 2 Gy. V ozařovací praxi však panuje značná variabilita a to podle typu nádoru a zkušenosti lékařů. Část celkové dávky lze například frakcionovat a částí ozářit jednorázově.

Nevýhodou nejčastěji používané teleterapie zářením gama je exponenciální charakter zeslabování záření, který způsobuje, že je ozařován nejen terčový nádor, ale i zdravé tkáně mezi zdrojem záření a nádorem a dokonce tkáně uložené hlouběji. Aby se nežádoucí ozařování zdravých tkání co nejvíce eliminovalo, je nádorová tkáň – pokud je to možné – ozařována z více směrů. I tak má ale tato terapie své nežádoucí účinky. Kromě častých reakcí organismu (kožní reakce, vypadávání vlasů při ozařování vlasaté části hlavy, potlačení krevetvorby při ozařování nádorů v určitých oblastech těla), může u vyléčených pacientů po mnoha letech latence dojít ke vzniku dalšího nádorového onemocnění. Proto se již delší dobu zkouší ozařování jinými částicemi s cílem specificky zasáhnout převážně terčový nádor při minimálním poškození dalších tkání. Tyto snahy se ubírají více směry.

První z těchto směrů je ozařování urychlenými protony. Protony mají velký lineární přenos energie a nejvíce energie odevzdávají tkáni před koncem své dráhy. Volbou energie protonů lze přitom dosáhnout toho, aby maximum Braggovy křivky (vyjadřuje závislost specifické ionizace na hloubce průniku nabitě částice do látky), a tedy i oblast maximálního předávání energie protonů tkáni, leželo právě v místě nádoru; například při energii 180 MeV je dosah protonů ve tkáni 15 cm. Průběh absorpce protonů podle Braggovy křivky současně

zajišťuje, že tkáň mezi povrchem těla a nádorem jsou ozářeny méně než při použití gama záření a tkáň ležící hlouběji než nádor už nejsou ozářeny vůbec. Při ozařování pomalu rostoucích nádorů ve tkáních s nedostatkem kyslíku, které jsou odolné vůči protonům i gama záření, se v Japonsku začíná zkoušet ozařování svazkem urychlených iontů uhlíku $^{12}\text{C}^{6+}$, které mají značně vysoký přenos energie.

Druhý způsob se provádí ozařováním svazkem záporných pionů. Jsou to nestálé částice s dobou života $2,6 \cdot 10^{-8}$ s, které vznikají v podstatě v každém terci při ozařování protony o energii vyšší než 500 MeV. Vzniklé piony mají energii několik desítek MeV, takže i přes krátkou dobu života urazí dráhu mnoha metrů, než zaniknou. Při průchodu látkou se chovají jako jiné těžké nabitě částice a jejich dosah v lidském těle lze opět ovlivnit velikostí tak, aby zanikaly v oblasti nádoru. Účinek pionů na nádorovou tkáň je značně zesílen procesy, které probíhají při zániku těchto pionů. Při zpomalení je pion, jakožto hadron, zachycen atomovým jádrem, při čemž se uvolní energie odpovídající jeho klidové hmotnosti, což je zhruba 140 MeV. Jádro se tak po absorpci pionu nachází ve vysoce excitovaném stavu a tříští se na protony, neutrony, částice alfa a těžší jádra (Li, Be, B). V místě nádoru tak vzniká velké množství kladných částic, které veškerou energii odevzdávají v nádorové tkáni.

Vysoká lineární ionizace a absorpce podle Braggovy křivky se mísí i ve třetí metodě, kterou je bórová terapie. Tato metoda využívá produktů reakce $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$, která probíhá přímo v nádorové tkáni. Pacientovi se podává sloučenina obsahující bór, která se metabolickými procesy koncentruje selektivně přímo v nádorové tkáni. Nádor se pak ozařuje pomalými neutrony, jejichž energie se vybírá podle hloubky uložení nádoru. Částice alfa a jádra ^7Li pak díky své velké lineární ionizaci ničí nádorové buňky, kde vznikají, a okolní tkáň zůstává neovlivněna. Metoda je ve vývoji, hledají se sloučeniny bóru vhodné pro rozdílné typy nádorů. Jako nadějně vypadají například $\text{Na}_2\text{B}_{12}\text{H}_{11}\text{SH}$ pro nádory mozku a p-boronofenylalanin pro zhoubné melanomy.

Všechny tři metody jsou používány v klinické praxi a v několika zemích buď ve střediscích jaderného výzkumu, kde jsou k dispozici urychlovače částic pro protonovou a pionovou terapii, resp. Jaderný reaktor pro bórovou terapii, případně v nemocnicích vybavených urychlovačem. [3]

2.3 Detekce radioaktivního záření

Ionizující záření není možno vnímat lidskými smysly, informace o jeho přítomnosti a množství lze získat pouze nepřímo na základě procesů, které záření při vstřebání ve vhodné látce vyvolá. Důsledky těchto procesů se pak převádějí elektronicky na různé pozorovatelné signály.

Zařízení na elektronický způsob detekce ionizujícího záření se skládá z několika částí. Citlivou částí je detektor záření. Tam se absorbuje záření a energie sdělená detektoru je přeměněna na optické nebo elektrické signály. Podobně pracující detektory vyžadují napájení vysokým napětím. Elektrické signály, které vycházejí z detektoru je vždy potřeba ještě elektronicky upravit, případně je také možno je třídit podle energie. Takto zpracované signály jsou pak přiváděny na registrační jednotku, která pracuje buď v pulsním, nebo integrujícím režimu. V pulsním se registruje signál vyvolaný každou částicí, která je absorbována v detektoru a na výstupní čtecí jednotce se zobrazují jednotlivé částice jako číselný údaj, který postupně narůstá. Toto zařízení se nazývá čítač impulsů. Měření se pak ukončí buď po uplynutí doby měření zvolené předem, nebo zaregistrování rovněž předem zvoleného počtu impulsů, který se poté přepočítává na počet impulsů za časovou jednotku. Běžně používané detektory ale ve většině případů neměří ionizační záření se stoprocentní přesností. To proto, že se měřená látka nenachází uvnitř detektoru, ale vně, což způsobuje, že ne všechny částice jsou detektorem zachyceny. Poté platí vztah pro četnost R , že $R = \eta A$, přičemž η je účinnost měření a A je aktivita v Bq. Při měření za stejných podmínek ovšem často stačí jen četnost a účinnost a aktivitu není nutné vědět.

V integrujícím režimu se sčítají účinky, které vyvolají všechny částice dopadající do detektoru, a na čtecí obrazovce se zobrazuje přímo počet impulsů za určitou časovou jednotku. Tento způsob je používán v přístrojích pro měření dávek záření – dozimetry, pro rychlé zjišťování přítomnosti radioaktivity a pak také v přístrojích pro kontrolu kontaminace radioaktivními látkami. Dozimetry jsou konstruovány tak, že udávají přímo dávku záření, místo četnosti, nebo také dávkový příkon.

U některých detektorů je vzniklý elektrický signál závislý na energii měřeného ionizujícího záření. Je toho využíváno k identifikaci radioaktivních nuklidů emitujících záření alfa nebo gama, protože jejich energie záření je u každého nuklidu jiná a tím radioaktivní nuklidy charakterizuje. V případě, že dopadají na detektor současně částice různých energií, vycházejí z detektoru napěťové impulsy o různé velikosti. Zařízení, které je dokáže rozlišit podle výšky, se nazývá analyzátor výšky impulsů a tvoří základ spektrometru záření.

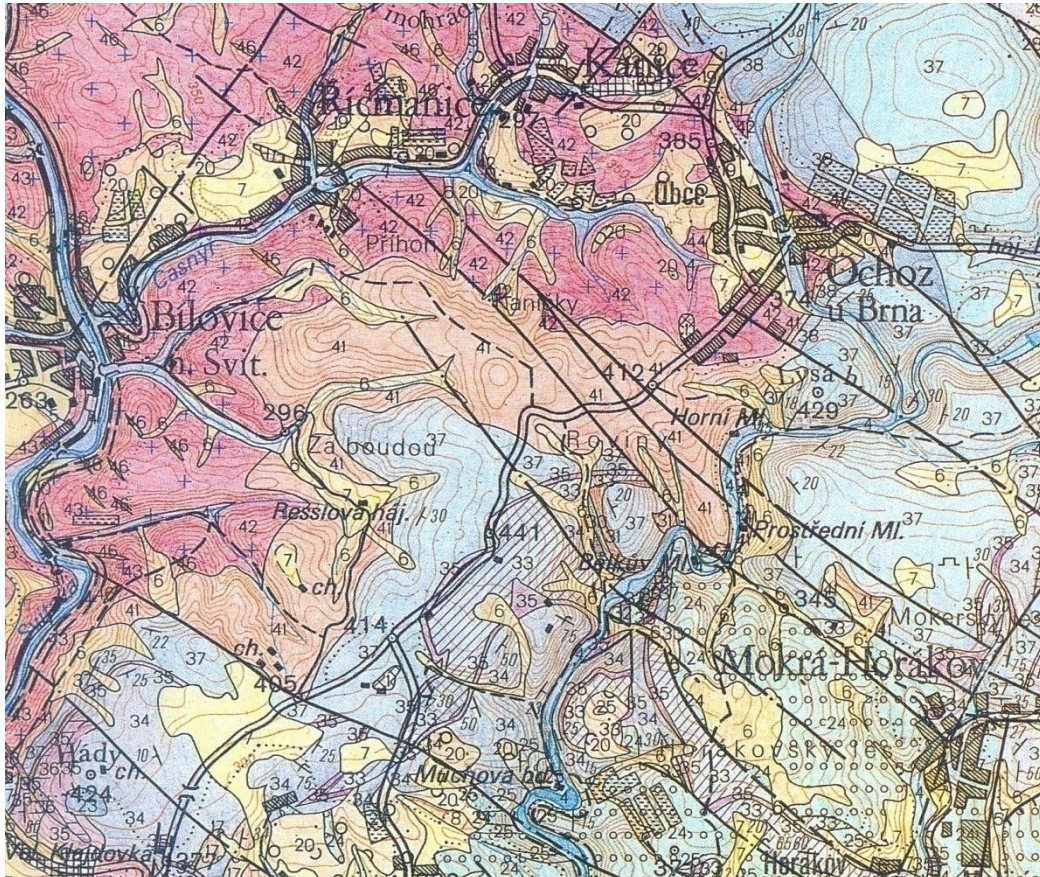
Z impulsů, které vznikají v detektoru, analyzátor vybere impulsy v určitém rozmezí výšky, které odpovídá určitému rozmezí energie záření, nazývaného měřicí kanál. V jednoduchém, tzv. jednokanálovém spektrometru lze impulsy registrovat vždy jen v jednom nastavení kanálu, tzn. registrovat částice jen s konkrétní energií záření. Pokud je třeba měřit při více energiích, je nutné provést měření více, při nichž je kanál postupně nastaven na požadované hodnoty energie. V mnohokanálových spektrometrech se celý rozsah výšek impulsů rozdělen na určitý počet měřících kanálů, v nichž probíhá měření současně. Výsledky jsou ukládány do paměti, odkud se mohou zobrazovat jako spektra alfa, případně gama záření.

Teoretické spektrum záření gama je čárové. Skutečné spektrum obsahuje kromě linií, které odpovídají energiím fotonů, také spojitou složku. Ta vzniká jako důsledek absorpce záření gama Comptonovým rozptylem. Linie, která odpovídá původní energii fotonu, tzv. fotopík, se ve spektru objevuje jen v případě, že se detektoru sdělí celá energie fotonu, tj. když je foton v detektoru úplně absorbován. Při tom nezávisí na tom, že se tak stalo fotoefektem, který byl předcházen opakovaným Comptonovým rozptylem. Pokud však Comptonův foton z detektoru unikne, z původní energie je sdělena jen část a vzniká impuls mající menší výšku. Část energie odnášenou unikajícími Comptonovými fotony, je při absorpci jednotlivých fotonů gama záření různě velká, proto mají odpovídající impulsy různou výšku. To se projeví jako Comptonovo kontinuum před fotopíkem. Ve spektrech složitějších směsí radioaktivních nuklidů, se Comptonovo kontinua jednotlivých linií slévají do souvislého spektra, kde se vyskytují fotopíky charakteristické pro jednotlivé radioaktivní nuklidy. Comptonovo kontinuum může být potlačeno použitím většího detektoru, kde je pravděpodobnost úniku Comptonových fotonů nižší.

Pravděpodobnostní charakter radioaktivní přeměny způsobuje jistý rozptyl výsledků při měření ionizujícího záření. To je dobře vidět při opakovaném měření aktivity, kdy získáváme výsledky rozložené kolem skutečné hodnoty, kterou ovšem nelze zjistit. Čím větší počet impulsů zaznamenáváme, tím je chyba měření způsobená tímto rozptylem menší. Je to významné především u vzorků s nízkými aktivitami, které se vyskytují například při datování uhlíkovou metodou nebo při stanovení radioaktivity ve vzorcích životního prostředí. V těchto případech je nutno vzorky měřit i mnoho hodin, aby byly chyby měření přijatelné a tedy výsledky statisticky významné. [3]

2.4 Geologická stavba studované oblasti

Geologická stavba území mezi Brnem – Líšní, Bílovicemi nad Svitavou, Kanicemi a Ochozem u Brna je poměrně komplikované a podílí se na ní několik geologických jednotek (obrázek 2). Nejstarší z nich vznikla koncem proterozoika a bývá označována jako brněnský masiv. Ostatní horniny jsou mladší a pocházejí z konce staršího paleozoika (devonu) a řadí se k moravskoslezskému paleozoiku v této oblasti označovanému jako Moravský kras.



Obrázek 2. Geologická mapa studované oblasti (Čtyrská, 1995). Vysvětlivky čísel: 37 – vilémovské vápence, 33 – hádko – říčské vápence, 41 – bazální klastické souvrství a 42 – biotický granodiorit typu Blansko. [8]

2.4.1 Brněnský masiv

Brněnský masiv je tvořen krystalickými, převážně magmatickými horninami, které vznikly v období kadomské orogeneze. Patří spolu s dalšími povrchovými výskyty pod vyšší geologické jednotky označované nejčastěji jako brunovistulikum. To se rozkládá přibližně mezi polským Krakovem na severu, Dunajem na jihu, Západními Karpaty na východě a na západě končí v podloží maldubinika a moravika. Na povrch vystupuje brněnský masiv

v trojúhelníkovém tělese přibližně mezi Miroslaví, Brnem a Boskovicemi. Do současné geologické podoby se brněnský masiv dostal během variské orogeneze, při které došlo ke střetu několika menších kontinentů s brunovistulíkem. Brněnský masiv je ještě dále dělen horninami centrálního bazického pásma na východní a západní část, které se od sebe liší především chemickým složením magmatických hornin. [1]

Na stavbě oblast mezi Brnem a Ochozem u Brna se podílí část brněnského masivu, která je tvořena amfibolicko-biotitickým granodioritem blanenského typu. Tyto horniny jsou šedé, místy narůžovělé, tmavě skvrnitě a mají masivní texturu. Vykazují poměrně vysokou hustotu a magnetickou susceptibilitu. V granodioritech jsou jako hlavní horninotvorné minerály zastoupeny plagioklas (asi 57,3 %), křemen (15,8 %), K-živce (14,3 %), biotit (1,3 %) a amfibol (2,2 %). Jako vedlejší nebo akcesorické jsou přítomny chlorit, titanit, apatit a zirkon (9,1 %). [2]

2.4.2 Devonská bazální klastika

Devonská bazální klastika představují kontinentální nebo lagunární sedimenty, vznikající za teplého klimatu typického střídáním vlhkých období s aridními. Na bázi spodnodevonských souvrství vystupují zrnité arkóзовé pískovce s vložkami jílovito-písčitých břidlic. Arkóзовé pískovce jsou představovány rudohnědými, středně až hrubě zrnitými hamity se středně až hrubě zrnitou psamitickou mikrostrukturou. Mikroskopicky se skládají z křemene, plagioklasů, vzácnějších K-živců a také slíd. Pojivo má petromiktní charakter. Tvoří je jemně vláknité agregáty muskovitu, sericitu, chloritu a také vzácnějšího biotitu. Vzácnější součástí pojiva jsou i zhruba 0,05 mm velká zrna křemene a karbonáty. Pojivo vykazuje zřetelné stopy deformace, které se projevují jeho proudovitým uspořádáním kolem součástí klastické složky. Rezavě hnědé jílovito-písčité (jílovito-arkóзовité) břidlice s obsahem epidotu jsou součástí charakteristických sedimentů těchto oblastí. Jsou složeny z jílových minerálů, křemene, plagioklasů a epidotu, vzácně bývá přítomen i chlorit a muskovit. Od okolních sedimentů nejsou ostře odděleny, avšak s přibýváním zrn klastické složky do těchto sedimentů pozvolna přecházejí nebo se s nimi pravidelně střídají. Pískovců, které mohou místy nabývat i drobového charakteru, přibývá směrem do nadloží, zatímco břidlice postupně mizí. V pískovcích se začínají objevovat i polohy růžově fialových drobnozrnných slepenců s křemítem. Tyto sedimenty v nejvyšších zachovaných polohách následně zcela převládají a pískovce v nich vytvářejí již jen pořadné vložky.

Slepence zde mají monomiktní až oligomiktní charakter. Obsahují téměř výhradně dokonale zaoblené křemenné valouny (82-100 %) o maximální velikosti 8-10 cm, vzácněji i drobnější valouny šedých grafitových kvarcitů (14 %), lyditů a černo zelených rohovců (4 %). Tmel těchto slepenců je petromiktní, jen vzácněji čistě křemitý. [10]

2.4.3 Oblast Moravského krasu

Moravský kras tvoří součást Dražanské vrchoviny a má podobu pruhu o šířce 3–5 km a délce 25 km. Hlavní horninový typ tvoří devonské vápence, rozdělené do dvou souvrství (macošské a líšeňské). Vápence vznikaly sedimentací v mělkém okrajovém moři tropického klimatu.

Od křídly (konec druhohor) podléhají vápence Moravského krasu procesům rozpouštění a vzniku krasových jevů jako např. jeskyně, krápníková výzdoba, závrtý.

Sedimentární pokryv vápenců Moravského krasu se skládá místy z mořských jílu, které sem byly naplaveny během středního miocénu. Ve čtvrtohorách ukládaly podzemní toky v jeskyních říční sedimenty jako písky, písčité šterky nebo prachové uloženiny. Během chladných období čtvrtohor se na povrchu krasové oblasti ukládaly spraše, které byly často transportovány srážkovými vodami do podzemních dutin. Během nejmladšího období čtvrtohor docházelo ke hromadění kamenitých a svahových sedimentů pod skalními stěnami, které často zakrývaly ústí jeskyní (Muller et al, 2000).

Jeskynní systémy Moravského krasu vznikaly během různých období třetihor a čtvrtohor. V paleogénu vytvořily vodní toky první horizontální jeskyně, ke kterým patří například horní patro Sloupsko-šošůvských jeskyní, Holštejnská jeskyně nebo Pekárna. Během spodního miocénu převládala povrchová eroze vodních toků, která vytvořila kaňonovitá údolí nazývaná žleby. Při zahlubování žlebů vznikaly ve svazích kaňonů jeskyně. Ke konci spodního miocénu nabývá na intenzitě tektonický neklid způsobený pokračujícím vrásněním Karpat, což vytvořilo rozsáhlé jeskynní systémy, jako třeba Amatérská jeskyně nebo systém Rudického propadání. Na okrajích Moravského krasu vyhloubily vodní toky poloslepá údolí odvodňovaná ponorovými jeskyněmi.

Vápence Moravského krasu jsou horniny mírně odlišného složení, stavby a geneze. Vyčleňují se různé typy, např. vápence vilémovické, lažánecké, křtinské nebo hádko-říčské. Převládajícím minerálem je kalcit, který ve většině případů vznikl rekrystalizací schránek původních organismů, které se při vzniku hornin usazovaly na mořském dně. V některých

typech vápenců je zvýšený podíl klastických částic, zejména drobných zrn křemene nebo jílových minerálů. [4]

2.5 Přírozená radioaktivita moravskoslezské části Českého masivu

Přírozená radioaktivita hornin Českého masivu byla studována v řadě prací, např. Manová, Matolín (1995). Okolí brněnské aglomerace spadá do geologické jednotky označované jako moravskoslezská oblast, která se vyznačuje nižší radioaktivitou krystalinických hornin, než je obvyklé v ostatních oblastech Českého masivu.

Magmaticky diferencované těleso brněnského masivu kadomského stáří vykazuje nízké obsahy radioaktivních prvků u všech bazických i kyselých typů ($K < 2\%$, $U = 1-2$ ppm, $Th = 4-7$ ppm) a nízké pole dávkového příkonu záření gama ($Da = 35-75$). Shodné vlastnosti mají například i granitoidy v podloží Hornomoravského úvalu. Pro dyjský masív byly určeny hodnoty $Da = 45-65$ ($K = 1,5$; $U = 1-2$; $Th = 10-12$). Nízkou radioaktivitou ($Da = 45-75$) se projevují také horniny svratecké a dyjské klenby.

Areál nízké radioaktivity vytváří území silezika s keprnickým krystalinikem se svory ($K = 1 - 2$, $U = 1$, $Th = 2-5$), pararulami ($K = 1 - 1,5$, $U = 1 - 4$, $Th = 4 - 6$) a ortorulami ($Da = 35-75$, $K = 1-2$, $U = 2 - 3$, $Th = 3 - 4$), spolu s desenským krystalinikem s vysokým podílem křemene a také s malým zastoupením K-živců ($Da = 35 - 60$). K nízké radioaktivitě regionu přispívají i amfibolitové masivy jesenický ($Da = 35$, $K = 1,1$, $U = 1,7$, $Th = 4,0$) a sobotínský. Šumperský granodiorit ($Da = 75 - 95$) je částečně zakryt pokryvnými sedimenty.

Žulovský masív je dělen na bazičtější okrajový typ ($Da = 45 - 90$, $K = 2$, $U = 2 - 4$, $Th = 6 - 9$) a převládající granit vykazující aktivitu $Da = 75 - 110$ ($K = 2 - 3,5$, $U = 2 - 4$, $Th = 7 - 11$). Moravskoslezské paleozoikum, zastoupené flyšoidním souvrstvím devonu a spodního karbonu Dražanské vrchoviny a Nížkého Jeseníku, tvoří v moravskoslezské oblasti lokálně zvýšené pole radioaktivity ($Da = 60 - 90$). Obsahy radioaktivních prvků jsou vyšší i u mladších karbonských sedimentů. [7]

3 Metodika

Měření bylo prováděno terénním gamaspektrometrem PGIS-2-128 (obrázek 3) s 2,1 litrovým NaI(Tl) detektorem (výrobce PICO ENVIROTEC INC. Kanada) v oblasti mezi Ochozem u Brna, Bílovicemi nad Svitavou a Brnem – Líšní (obrázek 2).



Obrázek 2. Mapa okolí studované oblasti. Zdroj: www.mapy.cz

Používaný gamaspektrometrie mobilní a každou vteřinu změří energetické spektrum, ze kterého vyhodnotí obsahy U, Th a K.. Ty se poté s pomocí systému GPS přiřazují k zeměpisným souřadnicím, které jsou vyznačovány na mapě s barevným spektrem podle velikosti naměřeného záření. Vyhodnocení dat bylo provedeno základními statistickými metodami v programu MS Excel.

Postup začal vytipováním trasy měření na vybraném typu hornin (viz obrázky 4-6), kde bylo poté zaznamenáno 519 měření v případě bazálních devonských klastik, 1044 u granodioritů brněnského masivu, 836 u vilémovských vápenců a 511 v případě hádkoříčských vápenců (příklad viz tabulka 1).



Obrázek 3. Přístroj PGIS s nímž bylo prováděno měření

RECS_fid	Lat_deg	Lon_deg	TC_cps	cK_PCT	cU_PPM	cTh_PPM	Dose_nGy
844	49,24554	16,71358	362	2,44	0,87	5,34	61,49
845	49,24555	16,71359	327	2,29	1,14	4,56	61,84
846	49,24555	16,7136	288	2,22	2,66	3,56	59,59
847	49,24557	16,71362	383	2,24	2,58	4,05	63,12
848	49,24557	16,71363	323	2,19	2,28	3,7	63,18
849	49,24558	16,71364	343	2,12	1,89	4,53	63,53
850	49,24559	16,71366	345	2,2	2,5	5,36	63,94
851	49,24561	16,71367	301	2,14	1,74	6,37	62,43
852	49,24561	16,71368	341	1,98	2,08	5,21	62,37

Tabulka č. 1 – ukázka zápisu dat

4 Výsledky

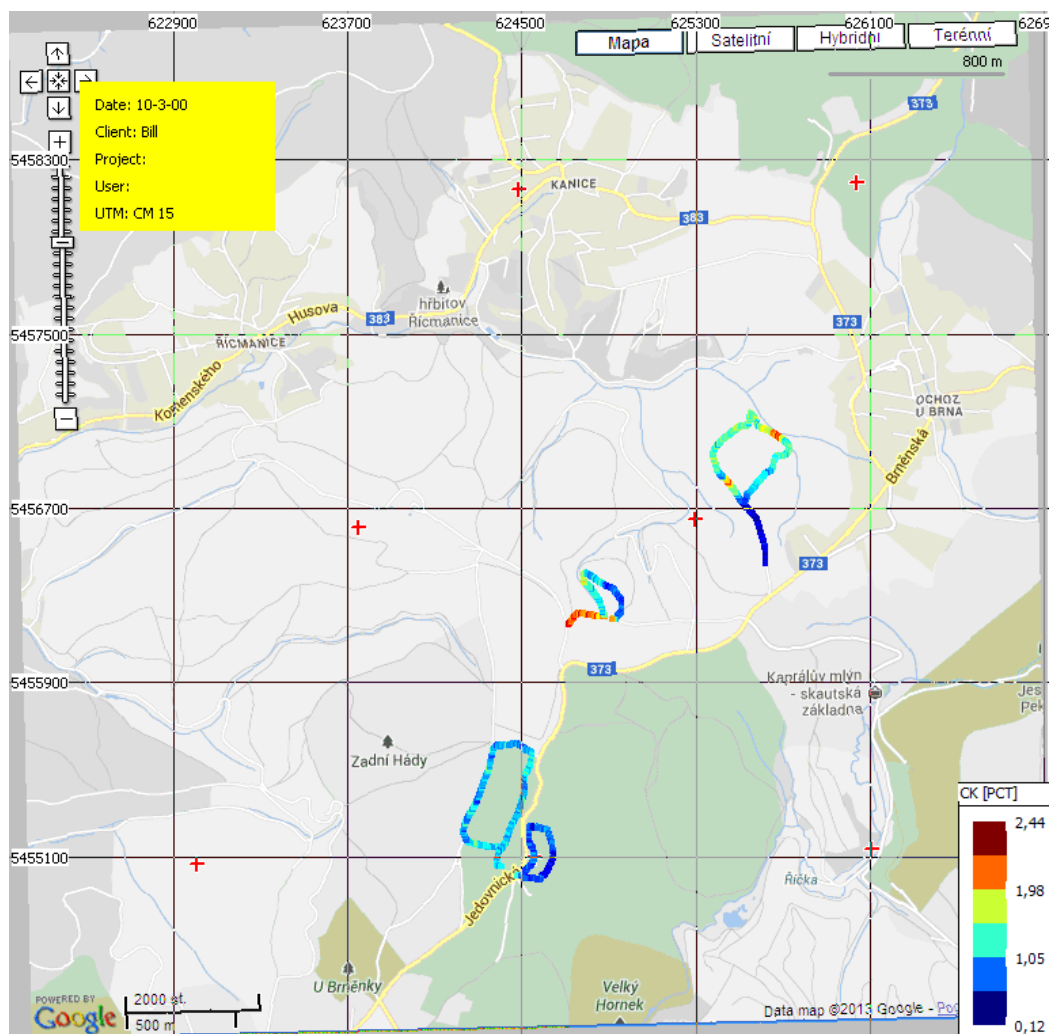
Během terénní měření byla získána dat odpovídající obsahu draslíku (hm. %), uranu (ppm) a thoria (ppm) v podložních horninách brněnského masivu, bazálních devonských klastik, vilémovských vápenců a hádsko-říčských vápenců. Kromě toho byl získán údaj pro celkový dávkový příkon přirozeného radioaktivního záření (nanogray za hodinu). Z více než 3500 měření byly vyhodnocovány u jednotlivých lokací hodnoty jako aritmetický průměr, maximální hodnota, minimální hodnota a směrodatná odchylka (tabulka 2).

	K				U			
	Průměr	Maximum	Minimum	Směr. Odch.	Průměr	Maximum	Minimum	Směr. Odch.
Brněnský masiv	1,00	2,33	0,12	0,43	2,06	5,11	0,25	0,78
Bazální klastika	1,15	2,44	0,27	0,53	1,94	3,95	0,58	0,66
Vilémovické vápence	0,85	1,34	0,38	0,17	1,71	4,43	0,41	0,55
Hádsko-říčské vápence	0,58	1,26	0,22	0,17	1,75	4,33	0,54	0,65

	Th				Dávkový příkon			
	Průměr	Maximum	Minimum	Směr. Odch.	Průměr	Maximum	Minimum	Směr. Odch.
Brněnský masiv	4,99	12,48	0,12	2,33	47,58	65,32	18,17	14,7
Bazální klastika	5,27	11,8	0,73	1,99	48,81	66,58	26,5	12,66
Vilémovické vápence	4,23	10,31	1,46	1,33	39,34	52,73	30,02	4,17
Hádsko-říčské vápence	4,56	8,46	1,24	1,37	35,85	51,97	22,98	5,96

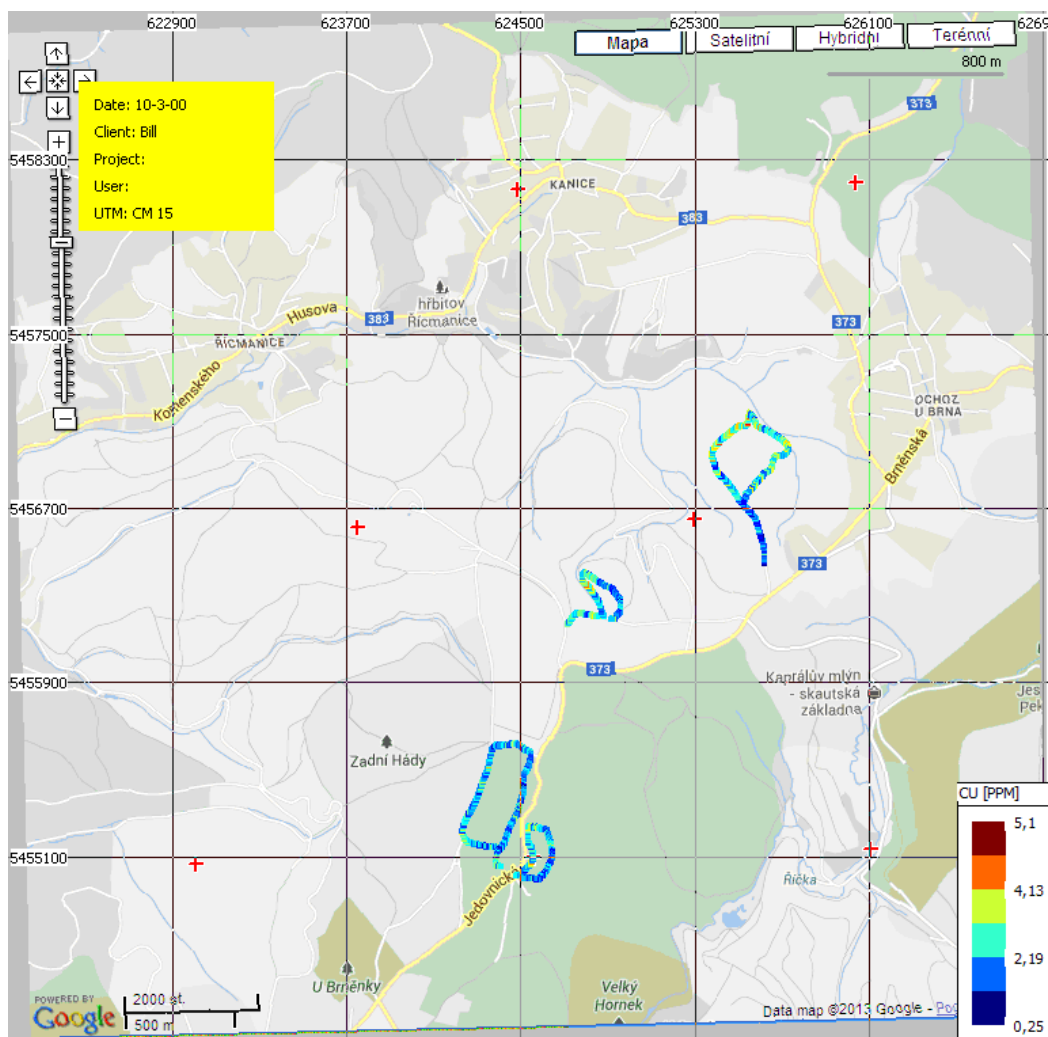
Tabulka 2. Výsledky terénních měření gamaspektrometrem PGIS.

Na granodioritech typu Blansko, které jsou součástí brněnského masivu, byl stanoven průměrný obsah draslíku 1,0 % s maximální hodnotou 2,33 % a minimální 0,12 %. V případě devonských bazálních klastik byl naměřený průměr 1,15 %, nejvyšší hodnota 2,44 % a nejnižší hodnotou 0,27 %. U vilémovických vápenců byla průměrná hodnota 0,85 %, nejvyšší 1,34 % a nejnižší 0,38 %. Hádsko-říčské vápence obsahovaly průměrně 0,58 %, maximálně 1,26 % a minimálně 0,22 %. Výsledné profily stanovení draslíku při terénním měření jsou na obrázku 4.



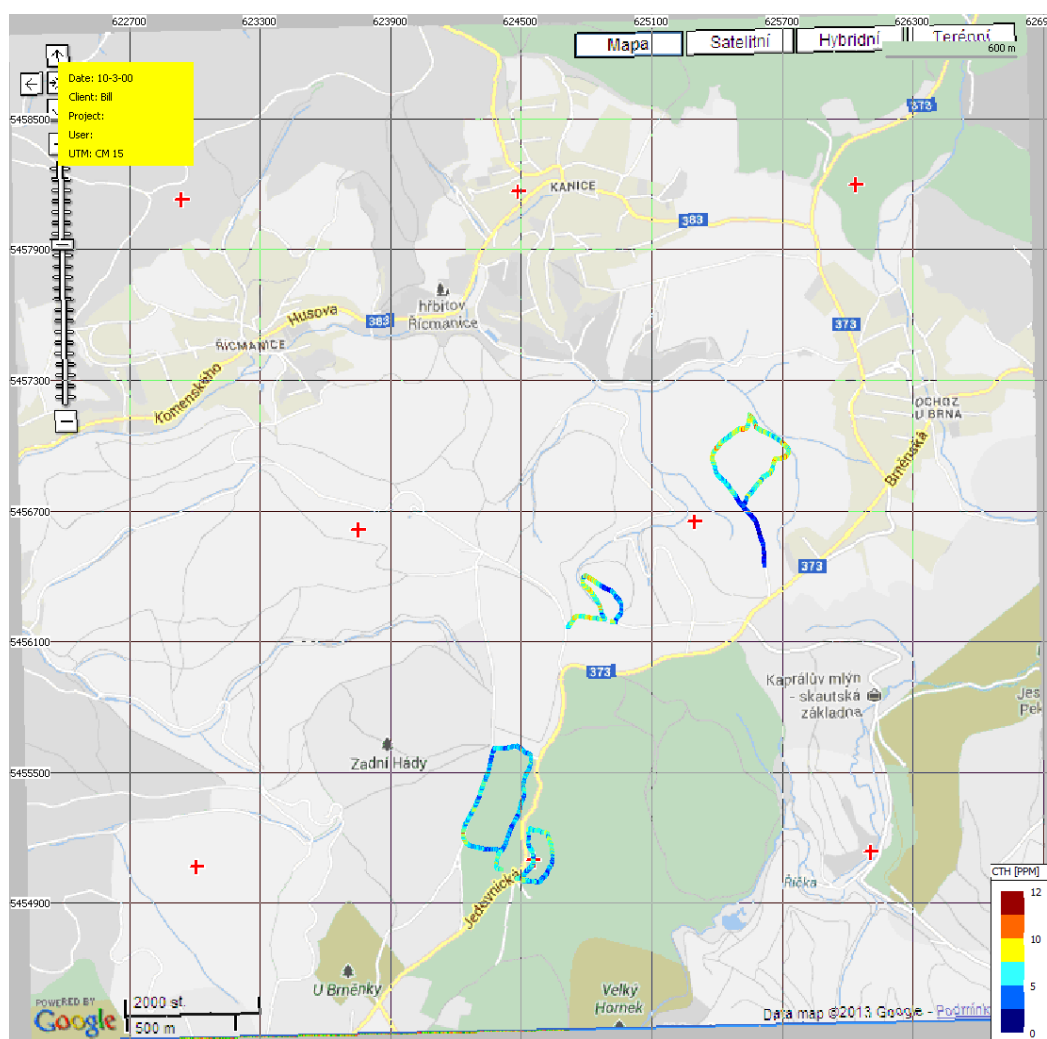
Obrázek 4. Výsledky měření pro draslík

Průměrný obsah uranu byl u granodioritů typu Blansko 2,06 ppm, maximální 5,11 ppm a minimální 0,25 ppm. U devonských bazálních klastik byla průměrná hodnota 1,94 ppm, nejvyšší 3,95 ppm a nejnižší 0,58 ppm. U Vilémovických vápenců byl průměr 1,71 ppm, nejvyšší hodnota 4,43 ppm a nejnižší 0,41 ppm. Průměrnou hodnotou u Hádko-říčských vápenců bylo 1,75 ppm, nejvyšší 4,33 ppm a nejnižší 0,54 ppm. Výsledné profily stanovení uranu při terénním měření jsou na obrázku 5.



Obrázek 5. Výsledky měření pro uran

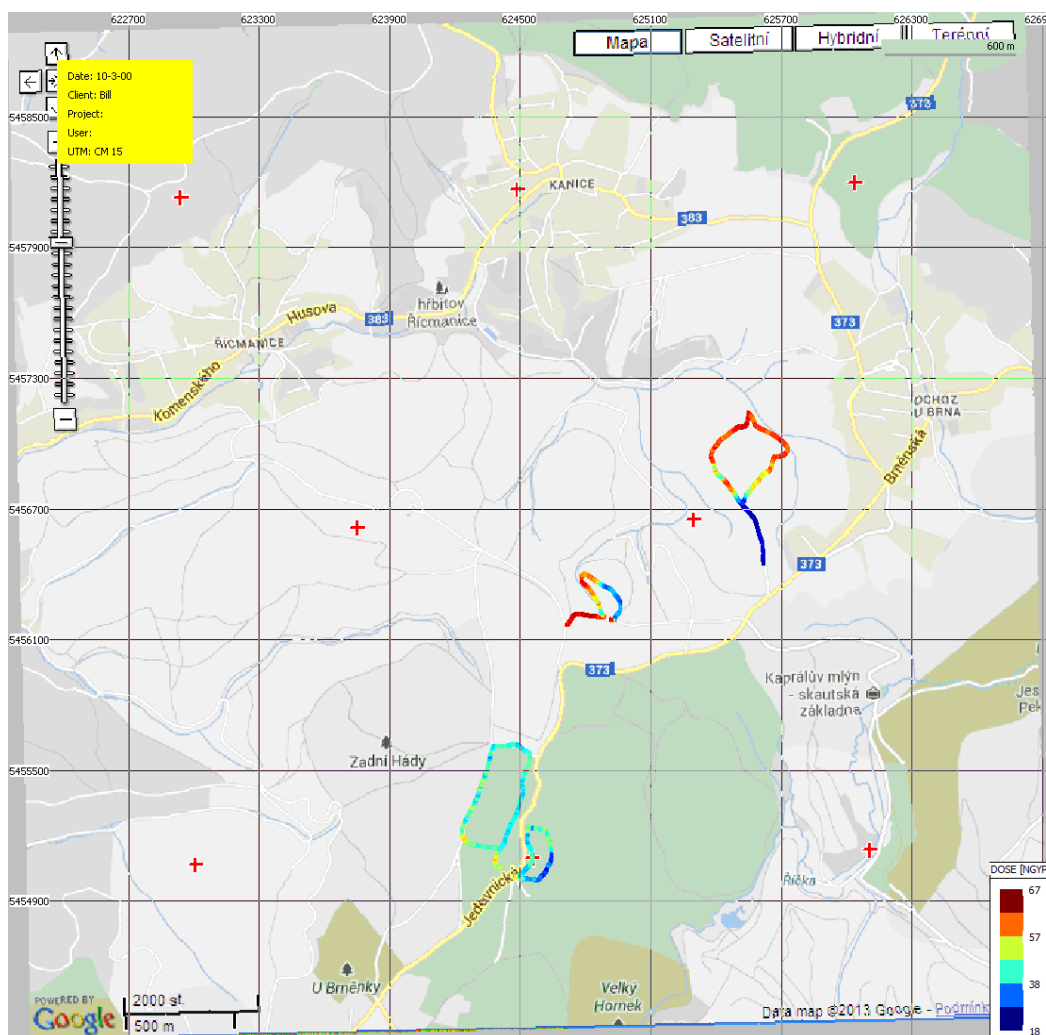
Průměrný obsah thoria byl u granodioritů typu Blansko 4,99 ppm, maximum 12,48 ppm a minimum 0,12 ppm. V případě devonských bazálních klastik byla průměrná hodnota 5,27 ppm, nejvyšší 11,8 ppm a nejnižší 0,73 ppm. U vilémovických vápenců byl průměr 4,23 ppm, maximum 10,31 ppm a minimum 1,46 ppm. Hádsko-říčské vápence měly průměrný podíl thoria 4,56 ppm, maximální 8,46 a minimální 1,37 ppm. Výsledné profily stanovení thorium při terénním měření jsou na obrázku 6.



Obrázek 6. Výsledky měření pro thorium

5 Diskuze

Na základě porovnání jednotlivých terénních měření můžeme vyvodit následující závěry. Nejvyšší průměrné hodnoty draslíku byly naměřeny v profilu bazálních devonských klastik (1,15 %), zatímco nejnižší hodnoty byly zaznamenány v hádsko-říčských vápencích (0,58 %). Nejvyšší obsahy uranu byly zaznamenány v granodioritech brněnského masivu (2 ppm) a nejnižší hodnoty byly změřeny ve vilémovických vápencích (1,7 ppm). Nejvyšší hodnoty thoria vykazují devonská bazální klastika (5,3 ppm) naopak nejnižší hodnoty můžeme zaznamenat u vilémovických vápenců (4,2 ppm). Celkový dávkový příkon měřených hornin (obrázek 7) má nejvyšší hodnotu u bazálních devonských klastik (66,6 nGy/h) a granodioritů brněnského masivu (65,3 nGy/h).



Obrázek 7. Výsledky měření dávkového příkonu

Hodnoty stanovené terénním gamaspektrometrem byly ve všech měřených profilech relativně nízké. Obsahy měřených prvků souvisí s minerálním složením jednotlivých hornin. Vysoké obsahy draslíku odpovídají horninám s vyšším obsahem minerálů, které ve své struktuře mají draslík zabudovaný, zejména K-živce a slídy. Prvky uran a thorium jsou nejčastěji vázány v akcesorických minerálech, většinou jen ve stopovém množství (zirkon, apatit, monazit, xenotim). Provedeme-li porovnání obsahu měřených prvků v horninách s jejich průměrnými obsahy v zemské kůře, můžeme konstatovat, že ve všech měřených profilech jsou zastoupeny v podprůměrném množství. Obsahy v zemské kůře jsou u draslíku uváděny 2,35 %, u uranu 2,7 ppm a u thoria 9,6 ppm.

V porovnání s hodnotami uváděnými v publikaci Štecla et al (1965), svědčí naměřené údaje o větším podílu uranu a thoria, ovšem nižším obsahu draslíku, než tomu bylo v jejich práci. Obecně jsou ale výsledky podobné.

Velmi nízký je i dávkový příkon všech měřených horninových typů. Za hranici nebezpečného dávkového příkonu se považuje hodnota 1 mGy/h a nejvyšší naměřená hodnota u bazálních klastik činila pouhých 66,58 nGy/h, což je zhruba 15000x nižší dávkový příkon, než který by mohl být nebezpečný lidskému organismu.

6 Závěr

Práce se zabývá studiem přirozené radioaktivity vybraných typů hornin. Terénním gamaspektrometrickým měřením byly stanoveny obsahy thoria, uranu a draslíku v horninách 3 různých geologických jednotek v okolí brněnské aglomerace.

V teoretické části práce jsem popsal podstatu radioaktivity, typy radioaktivního záření, pozitivní i negativní účinky záření na lidský organismus a způsoby měření radioaktivity. Podal jsem stručnou charakteristiku hornin zájmových geologických jednotek, tedy brněnského masivu, bazálních devonských klastik vilémovických a hádko-říčských devonských vápenců Moravského krasu.

V praktické části jsem se seznámil s činností gama spektrometru, a provedl terénní měření v e vybraných oblastech na horninách brněnského masivu, bazálních devonských klastik, vilémovských a hádko-říčských vápencích. Z naměřených dat byl získán přehled o zastoupení draslíku, uranu a thoriu a v jednotlivých horninových typech. Nejvyšší podíl draslíku a thoria byl zaznamenán v bazálních devonských klastikách, nejvyšší zastoupení uranu bylo naměřeno v granodioritech brněnského masivu.

Naměřené hodnoty představují nižší zastoupení studovaných prvků, než je v průměru obvyklé v horninách zemské kůry. Společně s naměřenými hodnotami dávkového příkonu nepředstavují žádné nebezpečí pro případné poškození lidského organismu. Studované horniny tak vykazují běžný stupeň přirozené radioaktivity a jejich výskyt v těsné blízkosti brněnské aglomerace nepředstavuje žádné riziko.

7 Použitá literatura

- [1] Müller P., Novák Z., et al. (2000): Geologie Brna a okolí. Český geologický ústav, Praha. 92 stran
- [2] Štelcl J., Svoboda L., Hájek J., Hrouda F., Musilová L., Staněk J., Weiss J. (1974): Exkurzní profil granodiority brněnského masívu. Universita J.E. Purkyně, Brno. 34 stran
- [3] Hála J. (1998): Radioaktivita, ionizující záření, jaderná energie. Konvoj, Brno. 311 stran.
- [4] Slouka L., Sedláčková M., Voženílek V., Kostkan V. (2002): Národní parky a chráněné krajinné oblasti České republiky. Univerzita Palackého, Olomouc. 156 stran
- [5] Klikorka J., Hájek B., Votinský J., et al. (1989): Obecná a anorganická chemie. SNTL – Nakladatelství technické literatury, Praha. 592 stran
- [6] Vacík J., et al. (1990): Přehled středoškolské chemie. Státní pedagogické nakladatelství, Praha. 365 stran
- [7] Manová M., Matolín M. (1995): Radiometrická mapa [online], Dostupné z URL: http://www.geology.cz/demo/cd_geocr500/stranky/p_radiometricka.html
- [8] Čtyroká J., Dvořák J., Kadlec J., Brzobohatý R., Opletal M. (1955): Soubor geologických a účelových map. Český úřad geodetický a kartografický, Kutná hora.
- [9] Škorpík J. (2013): Radioaktivita a vliv ionizujícího záření [online], Dostupné z URL: <http://www.transformacni-technologie.cz/radioaktivita-a-vliv-ionizujiciho-zareni.html>
- [10] Zádrapa M., Štelcl J., Chromý S., Friáková O., Karásek J., Roupec P., Demek J., Melichar R., Hubatka F., Hanžl P.: Mineralogicko – petrologický exkurzní průvodce po území Moravy a Slezska [online], Dostupné z URL: http://pruvodce.geol.morava.sci.muni.cz/Babi_lom/Babi_text.htm