

**Univerzita Karlova v Praze
Přírodovědecká fakulta**

Učitelství geologie



Mgr. Petr Jarka

**Datování minerálů uran-polymetalické mineralizace
Jánské žíly, Příbram-Březové Hory, ČR, metodou alfa-
spektrometrického stanovení radioaktivních nerovnováh
izotopových párů uranové rozpadové řady
(odborná část)**

**Radioaktivita v přírodě a její využití v geologických
vědách (didaktická část)**

***The dating of the minerals of uranium-polymetallic
mineralization of the Jánská vein, Příbram-Březové Hory,
ČR, using alpha-spectrometric determination of the
radioactive disequilibrium of isotope pairs of uranium
decay series (technical part)***

***Radioactivity in nature and its utilization in the
geological sciences (didactical part)***

Rigorózní práce

Praha 2011

PROHLÁŠENÍ:

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze dne 12.10.2011

Mgr. Petr Jarka v.r.

.....

ABSTRAKT

Předkládaná rigorózní práce pojednává o distribuci a determinaci přírodních radionuklidů v primární i sekundární mineralizaci Jánské žíly, která se nachází na uran-polymetalickém ložisku Březových Hor patřícího do příbramského polymetalického revíru.

Mineralizace této žíly je velice pestrá hlavně u sekundárních uranových, Pb a U-Pb fází, z nichž některé pochází dokonce přímo ze současnosti nebo jen z doby nedávno minulé.

Předmětem výzkumu bylo stanovení obsahu radioizotopů ve vzorcích minerálů primární i sekundární mineralizace pomocí metod nedestruktivní a destruktivní alfaspektrometrie. Na principu radioaktivních nerovnováh a poměru izotopů $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ bylo prováděno datování vytipovaných minerálů sekundárních fází.

Metoda nedestruktivní alfaspektrometrie byla vybrána pro svou jednoduchost jako vhodná pro kvalitativní analýzu velkého souboru vzorku. Při kvantifikaci výsledků nedestruktivní alfaspektrometrie byly spočteny aktivity a koncentrace radioizotopů souboru vzorků, poměry izotopů $^{238}\text{U}/^{226}\text{Ra}$ a $^{210}\text{Po}/^{226}\text{Ra}$. Metoda byla verifikována na referenčních materiálech CRM 129-A (oxid uranu) a BL-5 (uranová ruda).

Koncentrace uranu a uranových ekvivalentů dceřiných radionuklidů se ve zkoumaných minerálech pohybují v širokém rozmezí 0,0066 % U (galenit) po 82,8 % U (uraninit). Mnoho sekundárních minerálů není v radioaktivní rovnováze (U>Ra), opačný případ (Ra>U) se vyskytl pouze v jediném případě (amorfní Mn-oxidy).

Ze souboru nedestruktivně měřených vzorků byla vybrána skupina deseti sekundárních minerálů uranu pro další zpracování metodou destruktivní alfaspektrometrie a následnému datování stáří metodou $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$.

Při destruktivní alfaspektrometrii byla použita separace uranové a thoriové frakce pomocí chromatografického extrakčního činidla UTEVA[®] za použití vnitřního standardu izotopů $^{232}\text{U}/^{228}\text{Th}$. Metoda byla optimalizována a verifikována na rovnovážném standardu HU-1 (Harwell uraninite). Vypočítaná stáří sekundárních minerálů uranu se pohybují v širokém rozmezí 6,2 ($\pm 0,9$) ka pro lodevit až po 199,4 ($\pm 46,1$) ka pro kasolit. Tři vzorky byly v radioaktivní rovnováze (stáří nejméně nad 155 ka). Stejný soubor byl pak opakovaně proměřen a získané výsledky kvantifikovány. Tato kvantifikace přispěla ke snížení standardní neurčitosti stanovení a ke zpřesnění výsledků datování.

Zajímavý je výskyt minerálů s neobvyklou izotopickou asociací. Minerál jarosit koncentruje přednostně dceřiné izotopy rozpadové řady ^{235}U (^{227}Ac a ^{223}Ra). Mladý minerál beudantit koncentruje izotopy ^{230}Th a ^{210}Po . Z izotopového páru $^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$ bylo vyčísleno jeho stáří 69,3 ($\pm 16,1$) roků a aktivita ^{210}Po indikuje stáří 108,1 ($\pm 9,0$) let. Metodou ^{210}Pb bylo rovněž vyčísleno stáří mladého widenmannitu na 115,9 ($\pm 15,6$) let.

SUMMARY

The thesis deals with distribution and determination of natural radionuclides occurred in primary and secondary mineralization of Jánská vein, which represents the part of uranium – polymetallic deposit of Březové Hory, Příbram polymetallic district.

Mineralization of the vein is very variable, especially that of secondary U, Pb and U-Pb phases presence. Moreover, some of the phases have the origin in present or recently passed times.

The aim of the investigation was to determine the contents of radioisotopes in the primary and secondary mineralization with the help of non-destructive and destructive methods of alpha spectrometry. The dating of secondary mineral phases was provided on the basis of radioactive disequilibrium of $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ radionuclides.

Non-destructive alpha spectrometry was selected for its simplicity as a method eligible for qualitative analyses of the enormous number of samples. During the quantification of the results of non-destructive alpha spectrometry, the activities, radioisotopic concentrations and isotopic ratios of $^{238}\text{U}/^{226}\text{Ra}$ and $^{210}\text{Po}/^{226}\text{Ra}$ were calculated. The method applied on the whole set of samples was verified by reference materials CRM 129-A (uranium oxide) and BL-5 (uranium ore).

Uranium and uranium equivalent concentrations of its daughter products in studied minerals range from 0,0066 % U (galenite) to 82,8 % U (uraninite). Most of the secondary minerals is not in radioactive equilibrium ($\text{U} > \text{Ra}$), on the contrary $\text{Ra} > \text{U}$ occurred in one case only (amorphous Mn oxides).

Group of ten secondary U-minerals was selected from the set of samples studied by non-destructive method. These samples were set out for other measurements using destructive alpha spectrometry and consequently for dating by $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ isotopic method.

Separation of uranium and thorium fraction by UTEVA[®] sorbent together with the application of internal standard of $^{232}\text{U}/^{228}\text{Th}$ isotopes was used for destructive alpha spectrometry. The method was optimized and verified on the standard HU-1 (Harwell uraninite) in radioactive equilibrium. Wide range of calculated ages of secondary uranium minerals occurs, e.g. 6,2 ($\pm 0,9$) ka for lodovite and 199,4 ($\pm 46,1$) ka for kasolite. Three of the samples were in radioactive equilibrium (minimal age over 155 ka). The occurrence of minerals with abnormal isotopic association is very interesting. The mineral jarosite contain daughter isotopes of disintegration series of ^{235}U (^{227}Ac and ^{223}Ra) as a priority. ^{230}Th and ^{210}Po isotopes were identified in young mineral beudantite. Its age was dated on 69,3 ($\pm 16,1$) years by the isotopic pair $^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$, the activity of ^{210}Po indicates the age of 108,1 ($\pm 9,0$) years. Also the age of young widenmannite was calculated on 115,9 ($\pm 15,6$) years using ^{210}Pb method.

OBSAH:

1. ÚVOD.....	1
2. ALFASPEKTROMETRICKÉ METODY STANOVENÍ PŘIROZENÝCH RADIONUKLIDŮ V GEOLOGICKÝCH MATERIÁLECH	2
2.1. Současný stav alfaspektrometrie	2
2.1.1. Přeměna alfa	2
2.1.2. Princip alfaspektrometrie.....	3
2.1.3. Použití alfaspektrometrie v geologických vědách.....	3
3. ZKOUMANÁ LOKALITA A STUDOVANÉ VZORKY	5
3.1. Geologie Jánské žíly	5
3.2. Charakteristika zkoumaných vzorků	5
3.2.1. Odběr vzorků	5
3.2.2. Primární fáze	6
3.2.3. Sekundární fáze	6
4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	8
4.1. Aparatura	8
4.2. Použité standardy a referenční materiály	9
4.2.1. Standardy	9
4.2.2. Referenční materiály	10
4.3. Nedestruktivní alfaspektrometrie	17
4.3.1. Výběr vzorků	17
4.3.2. Příprava vzorků	17
4.3.3. Podmínky měření	17
4.4. Kvalitativní hodnocení výsledků nedestruktivní alfaspektrometrie	17
4.5. Kvantitativní hodnocení výsledků nedestruktivní alfaspektrometrie	19
4.5.1. Koeficient citlivosti	19
4.5.1.1. Stanovení koncentrace uranu na okně ^{238}U	20
4.5.2. Vliv emanace na vyhodnocení vzorku	23
4.5.3. Použité standardy a referenční materiály	25
4.5.3.1. Standard PUI	25
4.5.3.2. Opakovaná měření vybraného vzorku standardu PUI.....	25
4.5.3.3. Standard UO_2	26
4.6. Destruktivní alfaspektrometrie	27
4.6.1. Výběr vzorků pro destruktivní alfaspektrometrii	27
4.6.2. Příprava vzorků pro destruktivní alfa spektrometrii	28
5. VÝSLEDKY STANOVENÍ AKTIVIT RADIONUKLIDŮ A STÁŘÍ VZORKŮ	30
5.1. Výsledky nedestruktivní alfaspektrometrie kvalitativní	30
5.1.1. Hodnocení spekter získaných metodou nedestruktivní alfaspektrometrie	31
5.2. Výsledky nedestruktivní alfaspektrometrie kvantitativní	33
5.3. Mladé vzorky s obsahem ^{210}Po	39
5.3.1. Výpočet modelového stáří ^{210}Pb	39
5.4. Vyhodnocení vzorků s neobvyklou asociací radionuklidů	41
5.5. Výsledky destruktivní alfaspektrometrie	43
5.5.1. Separace standardu HU1 a výpočet poměru $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$	43
5.5.2. Výpočet stáří metodou $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$	44

6. DISKUSE	46
7. ZÁVĚR	50
8. LITERATURA	51

SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

- Obrázek 1: Schéma tunelového efektu při průniku α částice potenciálovou bariérou.
- Obrázek 2: Časová rozmezí použití různých izotopových párů k datování
- Obrázek 3: Blokové schéma zapojení aparatury.
- Obrázek 4: Model čárového spektra rovnovážného uranu s přírodním izotopickým poměrem.
- Obrázek 5: Alfasppektrum standardu PU1 ve stavu radioaktivní rovnováhy.
- Obrázek 6: Alfasppektrum standardu $UO_{2,22}$ ve stavu radioaktivní nerovnováhy.
- Obrázek 7: Přehled naměřených koncentrací uranu u referenčního materiálu BL5 s deklarovaným obsahem 7,09%.
- Obrázek 8: Přehled naměřených koncentrací uranu u referenčního materiálu CRM 129-A s deklarovaným obsahem 84,77%.
- Obrázek 9: Alfasppektrum vzorku kasolitu ve stavu radioaktivní rovnováhy.
- Obrázek 10: Alfasppektrum zeuneritu ve stavu radioaktivní nerovnováhy.
- Obrázek 11: Vymezení ROI pro ^{214}Po a grafické znázornění velikosti FWHM.
- Obrázek 12: Graf závislosti FWHM ^{214}Po na účinnosti detekce (koeficientu citlivosti).
- Obrázek 13: Graf závislosti stripping koeficientu α pro okno ^{238}U na FWHM píku ^{214}Po naměřené na řadě standardů PU1.
- Obrázek 14: Graf závislosti stripping koeficientu α pro okno ^{210}Po na FWHM píku ^{214}Po naměřené na řadě standardů PU1.
- Obrázek 15: Graf závislosti FWHM ^{238}U na FWHM ^{214}Po .
- Obrázek 16: Přehled naměřených koncentrací uranu opakovaného měření u standardu PU1 s deklarovaným obsahem uranu 71,47%.
- Obrázek 17: Graf závislosti FWHM ^{238}U na účinnosti detekce (koeficient citlivosti).
- Obrázek 18: Separovaný standard HU1 ze zkušební série měřený metodou destruktivní alfaspektrometrie, uranová frakce.
- Obrázek 19: Separovaný standard HU1 ze zkušební série měřený metodou destruktivní alfaspektrometrie, thoriová frakce.
- Obrázek 20: Hmotnostní aktivity izotopů ^{226}Ra a ^{210}Po ve vzájemném poměru u souboru vzorků měřených metodou nedestruktivní alfaspektrometrie..
- Obrázek 21: Hmotnostní aktivity izotopů ^{238}U a ^{226}Ra ve vzájemném poměru u souboru vzorků měřených metodou nedestruktivní alfaspektrometrie.
- Obrázek 22: Spektrum widemannitu pořízené metodou nedestruktivní alfaspektrometrie.
- Obrázek 23: Spektrum beudantitu pořízené metodou nedestruktivní alfaspektrometrie.
- Obrázek 24: Spektrum jarositu pořízené metodou nedestruktivní alfaspektrometrie.
- Tabulka 1: Použité standardy pro nedestruktivní alfaspektrometrii.
- Tabulka 2: Navážky nerovnovážného standardu $UO_{2,22}$.
- Tabulka 3: Navážky rovnovážného standardu PU1.
- Tabulka 4: Použité referenční materiály.
- Tabulka 5: Navážky rovnovážného referenčního materiálu BL 5.
- Tabulka 6: Výsledky měření referenčního materiálu BL5.
- Tabulka 7: Navážky nerovnovážného referenčního materiálu CRM 129-A.
- Tabulka 8: Výsledky měření referenčního materiálu CRM 129-A.
- Tabulka 9: Rovnovážný standard PU1.
- Tabulka 10: Opakované měření standardu PU1.
- Tabulka 11: Standard $UO_{2,22}$.
- Tabulka 12: Přehled vzorků pro destruktivní alfaspektrometrii.
- Tabulka 13: Kvalitativní vyhodnocení spekter získaných metodou nedestruktivní alfaspektrometrie.
- Tabulka 14: Kvantifikace výsledků nedestruktivní alfaspektrometrie.

Tabulka 15: Hmotnostní aktivity souboru vzorků analyzovaných pomocí metody nedestruktivní alfaspektrometrie

Tabulka 16: Vstupní hodnoty a výsledky výpočtu krajního členu uraninitu, jeho hmotnostní aktivity ^{210}Pb a hmotnostní aktivity čistého radiogenního olova.

Tabulka 17: Naměřené hodnoty a výsledky výpočtu modelového stáří ^{210}Pb u widemmannitu a beudantitu.

Tabulka 18: Výsledky nedestruktivní alfaspektrometrie u minerálů se zvláštní asociací izotopů.

Tabulka 19: Kvantifikace výsledků nedestruktivní alfaspektrometrie minerálu beudantitu.

Tabulka 20: Tabulka standardů pro destruktivní alfaspektrometrii.

Tabulka 21: Tabulka výsledků stanovení stáří metodou $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$.

Tabulka 22: Tabulka výsledků stanovení stáří metodou $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ – opakované měření.

Tabulka 23: Schéma sukcese primární a sekundární mineralizace Jánské žíly.

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č.I: Příprava vzorků pro měření metodou nedestruktivní alfaspektrometrie.

Příloha č.II: Vývoj pozadí alfa-detektoru v průběhu měření.

Příloha č.III: Tabulka naměřených hodnot pozadí detektoru.

Příloha č.IV: Příprava vzorků pro měření metodou destruktivní alfaspektrometrie.

Příloha č.V: Tabulka navážek vzorků pro měření metodou nedestruktivní alfaspektrometrie.

Příloha č.VI: Alfa spektra vzorků Jánské žíly – nedestruktivní alfaspektrometrie.

Příloha č.VII: Model výpočetní tabulky pro vyhodnocení spekter pořízených metodou nedestruktivní alfaspektrometrie.

Příloha č.VIII: Kvantifikace spekter vzorků minerálů Jánské žíly naměřených metodou nedestruktivní alfa-spektrometrie.

PODĚKOVÁNÍ

Autor této práce by rád a s potěšením poděkoval Mgr. Viktoru Goliášovi Ph.D. za trpělivost a pomoc při realizaci této práce, dále bych chtěl poděkovat Mgr. Pavlu Škáchovi a Jakubu „Horrráku“ Plášilovi za sběr a separaci vzorků pro měření, Mgr. Tomáši Ondovčínovi za pomoc s matematickým fitováním spekter, Mgr. Radku Procházkovi za výpočetní podporu při řešení problému výpočtu stáří a Marii Fayadové za technickou pomoc při laboratorních galejích.

Neméně vřele by též vyjádřil veliké díky GAAV, která uvolněním finančních prostředků umožnila realizaci projektu „**Přerozdělení radioaktivních prvků a izotopů olova při společném zvětrávání polymetalické a uranové mineralizace Jánské žíly, Příbram – Březové Hory, ČR; č. projektu: KJB 301110602**“ a přispěla tak ke zdaru celé práce.

1. ÚVOD

Tato rigorózní práce je součástí výzkumného projektu „Přerozdělení radioaktivních prvků a izotopů olova při společném zvětrávání polymetalické a uranové mineralizace Jánské žíly, Příbram – Březové Hory, ČR“, zpracovávaného ve spolupráci s Mgr. Pavlem Škáchou a dalšími, jehož záměrem je výzkum distribuce radionuklidů v primární a sekundární mineralizaci Jánské žíly, polymetalického ložiska Březových Hor patřícího do příbramského polymetalického revíru.

Mineralizace tohoto ložiska je velice pestrá hlavně v případě sekundárních fází, u kterých lze předpokládat různě vysoké stáří a z nichž některé mohou být recentního původu jako důsledek rozsáhlých důlních prací v oblasti.

Stanovení přirozených radionuklidů je prováděno pomocí metody nedestruktivní alfaspektrometrie, kdy lze z dosažených výsledků zjistit distribuci radioizotopů v minerálech, radioaktivní rovnováhy, jejich aktivitu a u některých vzorků sekundární mineralizace, zejména v případě nerovnovážných mladších fází, také určení jejich stáří pomocí různých metod, využívajících radioaktivních nerovnováh mezi radionuklidy uranové rozpadové řady způsobených geochemickými ději při alteraci starých a krystalizaci nových minerálních fází.

Cílem této práce je zjištění radioizotopického složení minerálních fází primární a sekundární mineralizace, procentuálního zastoupení radionuklidů a datování sekundárních minerálních fází. Podobný výzkum ještě nebyl v ČR prováděn. Nyní se naskýtá jedinečná možnost provést podrobný radioanalytický výzkum a datování zvětrávacích procesů této uran-polymetalické mineralizace v zóně hypergeneze.

2. ALFASPEKTROMETRICKÉ METODY STANOVENÍ PŘIROZENÝCH RADIONUKLIDŮ V GEOLOGICKÝCH MATERIÁLECH

2.1. Současný stav alfaspektrometrie

2.1.1. Přeměna alfa

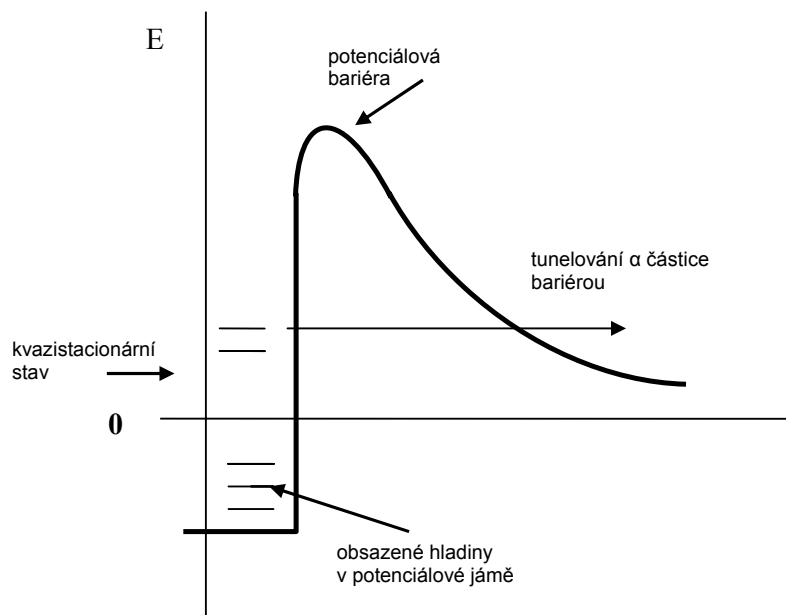
Při této přeměně emituje jádro rozpadajícího se radionuklidu kladně nabitou částici α obsahující dva protony a dva neutrony, která odpovídá jádru Helia.

např.: $^{226}\text{Ra} \rightarrow ^{222}\text{Rn} + ^4\text{He} (\alpha)$

Přeměna α se vyskytuje převážně u přirozených i umělých radionuklidů těžších prvků, kdy se v jejich jádrech projevuje silné odpuzování protonů. Základní stav neumožní jádru emitovat volné nukleony, protože se nacházejí na hladinách se zápornou energií (tzv. potenciálová jáma). Pokud v jádře dojde ke spojení dvou protonů a dvou neutronů v částici α , dochází ke vzniku tzv. kvazistacionárního stavu, ve kterém má částice α v důsledku uvolnění vazebné energie větší kladnou energii. I tato energie je však nedostatečná pro překonání potenciálové bariéry, neboť např. u ^{226}Ra by byla potřeba energie větší než 23 MeV, avšak energie emitované α částice při rozpadu ^{226}Ra je výrazně nižší, cca 4,8 MeV. Pokud by α částice musela překonat potenciálovou bariéru, pak by také její energie musela být o hodně vyšší než ve skutečnosti je. Přesto k emisi dochází. Kvantová mechanika existenci alfa přeměny vysvětluje vlnovým charakterem α částice, který umožňuje její průnik potenciálovou bariérou z kvazistacionárního stavu i tehdy, kdy: $E_\alpha < B$

Dochází tak k tzv. tunelovému efektu, kdy se částice „protuneluje“ potenciálovou bariérou a opustí jádro s mnohem menší energií, než by jinak k překonání bariéry potřebovala.

Tyto podmínky platí u jader s hmotnostním číslem větším než 140. Při rozpadu α také dochází díky ochuzení jádra o $2p^+$ a $2n^0$ ke změně poměru protonů a neutronů, čímž dochází k posunu směrem ke stabilitě.



Obrázek 1: Schéma tunelového efektu při průniku α částice potenciálovou bariérou.

U lehčích jader má α částice i v kvazistacionárním stavu velmi nízkou energii, leží hluboko v potenciálové jámě a pravděpodobnost jejího průniku bariérou je mizivá (Hála, 1998).

Rychlost alfa záření dosahuje maximálně jen 10% rychlosti světla. Vzhledem k relativně velkým rozměrům heliových jader je průchodnost alfa záření hmotou silně omezena. Doběh alfa částic ve vzduchu je řádově v cm, v minerálech a horninách z nich složených jde jen o setiny mm. Alfa částice mají velmi silnou ionizační schopnost. Uvádí se, že jediná alfa částice, která ve vzduchu urazí dráhu 1 cm, vytvoří asi 10 000 iontových párů. (<http://www.geoinformatics.upol.cz>)

2.1.2. Princip alfaspektrometrie

Alfaspektrometrie je radiometrická metoda jež se používá k detekci energií emitovaných alfa částic. Emitované záření α má pro každý radionuklid (α -zářič) svoji specifickou energii, jejíž změřením je umožněno poměrně přesné určení izotopu ve vzorku. Na rozdíl od emise gama má každý radionuklid pouze jednu emisní alfa linii, případně blízký dublet.

Zařízení umožňující detekci alfa záření musí být svou konstrukcí přizpůsobené všem specifickým, jež měření alfa částic představuje. Patří k tomu např. konstrukce detektoru, kdy je potřeba vzít v potaz malou propustnost alfa částice hmotou. S tím souvisí i příprava vzorků, často rozhodující je pro optimální výsledek co nejtenčí nanesení vrstvy vzorku na disk (nekonečně tenké vrstvy).

Detektor a vzorek se nejčastěji umísťují do vakuované komory proti sobě. Ve vakuu se výrazně zvýší dolet částice, neboť se sníží počet jejích srážek s okolními molekulami vzduchu, které degradují její energii a dochází tak k rozmytí výsledného spektra.

Předzesílený signál z detektoru je dále vyhodnocován multikanálovým analyzátozem, který je nastaven na měření určitého rozsahu energií. Tento rozsah je pak dále dělen na různý počet stejně velkých kanálů. Pokud částice alfa narazí do detektoru, její energie je změřena a následný impuls je přiřazen do odpovídajícího kanálu. Vzniká tak spektrum energií, podle kterého lze zjistit nejen izotopické složení zkoumaného vzorku, ale např. i aktivitu, či lze alfaspektrometrii použít i k datování stárí metodou poměrů aktivit různých izotopů. V minulosti se k detekci emisí alfa částic často používaly také ionizační komory, proporcionální či scintilační detektory (Majer, 1981)

V současnosti se k detekci alfa záření používají nejčastěji polovodičové detektory (Ivanovich et al., 1992). Jejich princip je založen na funkci křemíkové či germaniové diody (typu n – p nebo p – n) s napětím přiloženým v závěrném směru. V polovodiči dochází ke vzniku ochuzené vrstvičky, ve které se nenachází ani volné elektrony, ani tzv. „díry“, o elektrony ochuzené atomy. Nabité částice při interakci s hmotou ztrácejí energii coulombovskými interakcemi s jádry a elektrony absorbujících materiálů. Podstatná je interakce s elektrony, protože tím dochází k jejich excitaci z valenčního orbitálu do vodivostního pásu a následné tvorbě páru elektron – „díra“. Elektron směřuje ke kladnému pólu, zatímco atom ochuzený o valenční elektron („díra“) k zápornému. Tento proces způsobí krátkodobé zvýšení vodivosti absorbujícího materiálu a následný proudový impuls zesílený nízkošumovým zesilovačem (ORTEC, 1994). Zesílené impulsy, které mají pro každý radionuklid charakteristickou energii jsou v multikanálovém analyzátozem zařazeny do příslušného energetického kanálu. Vzniká tak charakteristické spektrum.

2.1.3. Použití alfaspektrometrie v geologických vědách

Alfaspektrometrické metody mají v geologických vědách široké pole využití. Používají se jak na stanovení obsahů radionuklidů v nejrůznějších druzích geologických materiálů, tak pro datování různými typy izotopů a izotopových párů v případech radioaktivního disequilibria.

Jako příklady lze uvést alfa spektrometrický výzkum radioaktivních nerovnováh (destruktivní alfaspektrometrie) spodně proterozoických křemenných konglomerátů zrudněných Au-U mineralizací těžených na Witwatersrandu (Carl a Meyer 1984). Ti zjistili vznik nerovnováhy při loužení a navětrání konglomerátového materiálu při povrchu způsobené částečným vyloučením uranu.

V dalším případě Sill (1977) analyzoval destruktivně alfaspektrometricky rudy a produkty úpravárenského procesu z různých lokalit. Tento autor optimalizoval chemické procedury pro determinaci různých radionuklidů (izotopy uranu, ^{230}Th , ^{231}Pa , ^{228}Th) a porovnal výsledky s gama spektrometrickým stanovením.

Zatímco chemické procedury umožňují oddělení měřených radionuklidů z celkového vzorku a výsledná data jsou relativně snadno interpretovatelná, je metoda nedestruktivní alfaspektrometrie z tohoto úhlu pohledu popelkou. Složitá interpretace relativně komplexních a statistickými chybami zatížených spekter není jednoduchá. Velmi delikátní je zejména příprava „nekonečně tenkých“ vzorků ze suspenze analyzovaného materiálu.

Na výhody této metody a možnosti jejího užití v případě kvalitativního rozboru uranových a thoriových rudních vzorků upozorňuje Moučka (1968).

Z jiného konce uchořeli problematiku nedestruktivní alfaspektrometrie Killeen a Carmichael (1976). Tito autoři použili naopak nekonečně tlusté vzorky uranových rud, kde experimentální spektra byla tvořena „schody“ přibývajících s klesající energií radionuklidů. Jako první se však pokusili matematicky modelovat tvary těchto spekter a fitovat do experimentálních dat. Tento způsob jim umožnil odhalit radioaktivní nerovnováhu v analyzovaných vzorcích.

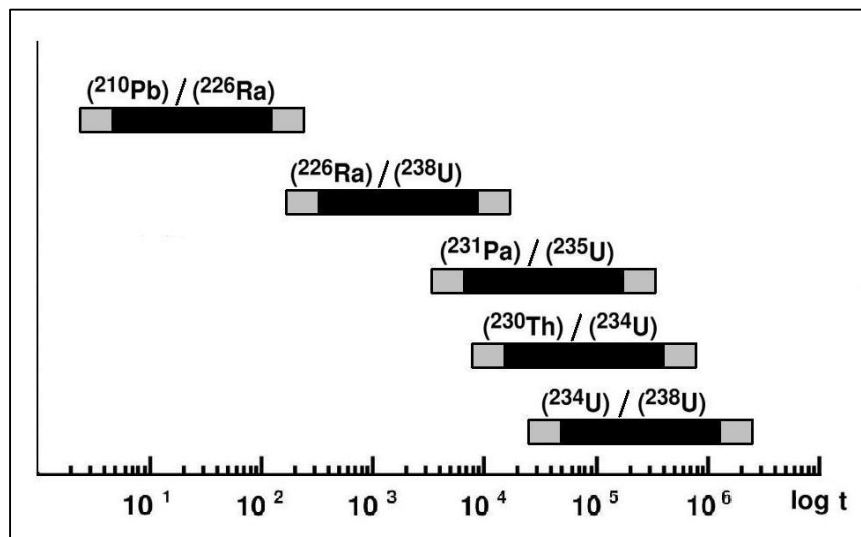
Problematiku nedestruktivní alfaspektrometrie oživil ve své diplomové práci Fejgl (2003). Tento autor znovu potvrdil vhodnost nasazení a robustnost této metody v případě bohatších (rudních) vzorků jako kvalitativní a rychlé analytiky. Nastínil směry dalšího řešení a cest, které byly v předkládané práci dále rozvinuty zejména z hlediska možnosti kvantitativního hodnocení naměřených spekter a verifikace pomocí mezinárodních referenčních materiálů.

Datování nerovnováh uranové rozpadové řady

Metody datování pomocí nerovnováh dceřiných radionuklidů uranové řady jsou v geologických vědách široce rozšířeny. Jsou aplikovány v oblasti výzkumů mořských a organogenních sedimentů, mladých vulkanitů a zejména speleothém (Bourdon ed. 2003).

Použití různých radionuklidů a jejich párů pro datování ve své bakalářské práci vhodným způsobem shrnul Zahradník (2005), kdy upozornil na nejpoužívanější z nich a uvedl příklady z geologické praxe. V rozpadové řadě uranu lze vymezit několik izotopových párů, které pokrývají velmi široký časový interval (obrázek 2) od datování $^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$ v rádech desítek a prvních dvou stovek let až po pár $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ dosahující intervalu až 2×10^6 let.

Jedním z nejpoužívanějších izotopových párů je $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$. Těmito izotopy byly datovány nejrůznější, obvykle karbonátové materiály: jeskynní sintry (speleotémy), mladé kalcitové hydrotermální žíly a další kvartérní precipitáty (Richards a Dorale 2003). Tato metoda je však velmi dobře použitelná i pro uranové sekundární minerály.



Obrázek 2: Časová rozmezí, použití různých izotopových párů k datování. Sestaveno podle Richards, Dorale (2003). Převzato ze: Zahradník (2005)

Datováním uranových sekundárních minerálů metodou $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ z několika švédských lokalit se zabývali Löfvendahl a Holm (1981). Zjistili různá stáří fází, od nižších než 10 000 let až po rovnovážné vzorky (více než 300 000 let) a vyloučení uranu při povrchu. Zabývali se rovněž časovou korelací zalednění a fází rozvoje sekundární mineralizace, signifikantní souvislosti však nenalezli.

Nikoliv alfaspektrometricky, nýbrž metodou $(\text{U}+\text{Th})\text{-}^4\text{He}$ byly datovány vzorky goethitů a limonitů z devíti lokalit ve Schwarzwald, Harzu a Duryňska. Byly stanoveny stáří od permských (primárních minerálů) až po kvartérní (u novotvořených limonitů) (Lippolt et al. 1998).

Moderně jsou izotopy ^{230}Th a ^{234}U stanovovány pomocí hmotnostní spektrometrie s termální ionizací (TIMS), která má v běžných případech nižší analytické chyby stanovení a tudíž dosáhne i časově „dále“, ale neobejde se rovněž bez předchozí chemické separace radionuklidů (Bourdon ed. 2003). Přístroj pro měření těchto radionuklidů však v ČR prozatím k dispozici není. Alfaspektrometrie však poskytuje rovněž velmi dobré údaje s neporovnatelně nižšími přístrojovými nároky.

3. ZKOUANÁ LOKALITA A STUDOVANÉ VZORKY

3.1. Geologie Jánské žíly

Březohorský rudní revír je situován ve vzdáleném exokontaktu středočeského plutonického komplexu. Rudní žíly zde pronikají jednak kambrickým a také proterozoickým horninovým pásmem (Bambas 1990). Kambrické pásmo hornin, kde je koncentrováno největší množství žil, je tvořeno převážně drobnými, pískovci a slepenci. Sedimenty prorážejí hojně diabasové žíly, které mají mocnost až několik desítek metrů, a které jsou často sledovány mladšími rudními žilami vystupujícími po stejných trhlinách (Bambas 1990). Revír je možné rozdělit na 3 menší ložiska: centrální březohorské, černojské a bohatínské.

Centrální březohorské ložisko bylo důlními díly otevřeno do hloubek až přes 1,5 km. Jánská žíla je situovaná v kambrickém pásmu hornin v centrálním březohorském ložisku mezi doly Anna a Vojtěch. Směrně byla vysledována až na délku 200 metrů. Byla dobývána v intervalu od 1. až na 18. patro, kde žíla ztrácí mocnost a neobsahuje již žádné ekonomicky významné zrudnění. Její výplň se skládá převážně z křemene, barytu a karbonátů, rudní výplň charakterizuje galenit, sfalerit, ušlechtilé stříbrné rudy, pyrit a uraninit. Okolí žíly je často slabě hydrotermálně postižené, je patrné vybělení hornin a místy výrazná hematitizace, zvláště v jižních úsecích dnes přístupné části žíly na 1. i 2. patře. (Škácha 2007)

Polymetalické zrudnění Pb-Zn-Cu lze klást do doby chladnutí plutonických mas a postorogenní hydrotermální aktivity. Zrudnění oblasti je vázáno na poruchové zóny a v některých případech sleduje i průběh žilných vulkanitů. Oblast je význačná mineralogicky pestrým složením rudních žil i velkým množstvím sekundární mineralizace. Uranové minerály poskytly radiometrické údaje o stáří mineralizace 250 – 290 mil. let, což odpovídá permu. (Chlupáč, 2002)

3.2. Charakteristika zkoumaných vzorků (Škácha 2007)

3.2.1. Odběr vzorků

Vzorky pro výzkum byly získány jednak ze starých sběrů, jednak ze záchranného odběru uskutečněného na Jánské žíle (důl Prokop, Březové Hory).

Archivní vzorky byly získány z minerálů uložených ve sbírkách Hornického muzea v Příbrami, Národního muzea v Praze, Mineralogického muzea Přírodovědecké fakulty UK, pavilonu Františka Pošepného (sbírky VŠB v Ostravě) a soukromých sbírek. Dále byly vzorkovány přístupné části Jánské

žíly na úrovni 1. a 2. patra s laskavým svolením o.z. DIAMO SUL (Příbram). Vzhledem k tomu že se jednalo o technicky náročné akce, byl odběr vzorků proveden na etapy. Byla provedena radiometrická revize chodeb na úrovni 1. patra, poté na úrovni 2. patra centrálního březohorského ložiska. Byly zkoumány hlavně sledné chodby po Jánské žíle a jejich blízké okolí a přístupné dobývky. Vyhledávání radioaktivních vzorků bylo prováděno terénním radiometrickým přístrojem RP11 se scintilační sondou RS 107. Po prohlédnutí vzorků pod binokulární lupou a předběžné identifikaci fází byla místa, odkud pocházely zajímavé vzorky, opakovaně navštívena a bylo odebráno větší množství materiálu. Při návštěvách důlních děl byla hlavní pozornost soustředěna na výskyty uraninitu a polymetalického zrudnění, kde byl předpoklad vzniku zajímavých sekundárních fází. Samotný odběr vzorků byl prováděn Pavlem Škáchou, Jakubem Plášilem, Mgr. Viktorem Goliášem Ph.D. a dalšími. Po sběru byla provedena separace a přesná mineralogická identifikace metodou práškové RTG difrakce. Pro výzkum byly separovány a vybrány pokud možno monominerální fáze.

3.2.2. Primární fáze

Uraninit je převládajícím minerálem uranového zrudnění. Vytváří černé až 2 cm mocné výplně žilek, méně často ledvinité agregáty s typickým polokovovým leskem.

Studiem vzorků bylo zjištěno, že část uraninitu z Jánské žíly obsahuje galenit, který byl nejprve považován za radiogenní. Tyto vzorky pocházejí z rudního sloupu, který je soustředěn okolo Jánské šachty a který byl v minulosti intenzivně dobýván na polymetalické zrudnění. Následným výzkumem na ICP-MS, bylo však ověřeno že Pb v dispergovaném galenitu není radiogenního původu. Studiem na elektronové mikrosondě bylo zjištěno, že se galenit vyskytuje v zónách a velikost jednotlivých galenitových zrn se pohybuje okolo několika μm . Dále byly zkoumány menší výskyty uraninitu z rudního sloupu v jižní části Jánské žíly, kde uranové zrudnění doprovází pouze rudy Cu a galenit zde nebyl zjištěn ani historicky dobýván. Tyto uraninity již neobsahují galenit, který by byl detekovatelný elektronovou mikrosondou a neprojevuje se ani v RTG záznamu. Avšak při pokusu o stanovení chemického stáří se opět projevil výrazný obsah neradiogenního olova (Škácha 2007).

Galenit je nejčastějším rudním minerálem. Vytváří hrubě zrnité i jemnozrné agregáty soustředěné do až několik cm mocných žilek. Přestože je galenit jedním z nejhojnějších minerálů na celém březohorském ložisku, krystaly tvořil spíše výjimečně a to platí i pro Jánskou žílu. Mladší generace galenitu se vyskytuje společně s uranovým zrudněním a po puklinách je často prorůstána práškovitými agregáty anglesitu. Přestože je značná část galenitu starší než uraninit je zcela zřejmé, že na Jánské žíle je i mladší polymetalická složka, kterou představuje také tento mikroskopický galenit. Podle chemických analýz je zřejmé, že tato generace galenitu neobsahuje téměř žádné Ag.

3.2.3. Sekundární fáze

Amorfní U-Pb oxidy se vyskytují ve formě tzv. gummitů ve společnosti uraninitu jako až několik cm velké kusové agregáty žluté až oranžové barvy s lasturnatým lomem a skelným leskem. Místa byly nalezeny i U-Pb oxidy vzniklé recentními pochody na puklinách galenitové žiloviny na 2. patře. Podle provedených chemických analýz je patrné, že některé U-Pb oxidy obsahují někdy až x procent vanadu. Doposud nebyl popsán žádný samostatný vanadový minerál z březohorského ložiska, ale nově byl zjištěn pravděpodobně carnotit v materiálu údajně pocházejícího z haldy Jánské šachty (sbírky HM Příbram).

Anglesit vytváří převážně recentní práškovité agregáty žluté až nazelenalé barvy, které vznikají v řádu několika měsíců v okolí uranového a polymetalického zrudnění (vlastní pozorování in situ). Vzácněji byly zjištěny práškovité agregáty vzniklé recentně na puklinách galenitu a až 0,5 mm velké dokonale vyvinuté čiré lesklé pseudokubické krystaly v dutinách galenitové žiloviny (Škácha 2007).

Autunit a metaautunit se vyskytují na trhlinách rozvětralého uraninitu společně s pyritem ve formě kulovitých agregátů až 0.5 mm velkých tvořených z dokonale vyvinutých tabulkovitých krystalů žlutozelené barvy. Byly nalezeny pouze na rudním sloupu v jižní části Jánské žíly na úrovni 2. patra. Ačkoliv jde celkově o poměrně hojný sekundární uranový minerál, vyskytuje se v revíru velmi vzácně a staršími autory nebyl zjištěn.

Beudantit byl nalezen ve formě světle hnědých měkkých drobných až 0,5 mm velkých práškovitých agregátů se sametově lesklým povrchem na puklinách a v dutinách křemenné žiloviny na 1. patře Jánské žíly. Asociuje s plumbojarositem, od kterého není makroskopicky rozeznatelný, metalodévitem a metazeuneritem.

Cerusit se vyskytuje velmi hojně ve formě až 2,5 cm velkých sloupcovitých až tabulkovitých krystalů šedé až tmavě hnědé barvy se silným leskem v dutinách limonitizované žiloviny. Mladší generace vytváří drobné lesklé krystaly v společnosti uranového zrudnění. Agregáty cerusitu jsou křehké a mají lasturnatý lom. Při hledání příčin hnědého fantomového zabarvení některých krystalů bylo studiem elektronovou mikroskopem (anal. J. Sejkora) zjištěno, že krystaly jsou chemicky zcela homogenní.

Jarosit vytváří hojně měkké mazlavé povlaky na stěnách důlních chodeb, které jsou pravděpodobně recentního stáří. Na jižním rudním sloupu byly také nalezeny jarosity se zvýšenou radioaktivitou.

Kasolit se vyskytl na Jánské žíle v několika formách. Starší generace vytváří kusové agregáty žluté barvy ve společnosti widemannitu typicky gummitového charakteru. Tento typ představuje in situ vzniklý produkt alterace uraninitu. Dále asociuje s pyromorfitem a cerusitem. Mladší generace byla zjištěna na 2. patře ve formě dobře vyvinutých radiálně paprscitých agregátů zelené barvy vyskytující se v doprovodu galenitu, sfaleritu, markazitu, pyritu a uraninitu (Škácha a Sejkora 2001). Kasolit vytváří masy o velikosti až 2x2x1 cm složené z nepravidelně srůstajících radiálně paprscitých agregátů o velikosti 2-4 mm, tyto agregáty jsou neprůhledné a mají olivově zelenou až kanárkově žlutou barvu. Agregáty kasolitu jsou značně kompaktní a vykazují tvrdost podle Mohse cca 4 – 5; na jednotlivé krystaly se rozpadají až po vynaložení relativně značného mechanického tlaku. Dále byly nově nalezeny bohaté výskyty žlutých radiálně paprscitých a tabulkovitých krystalů v dutinách křemenné žiloviny, případně jako povlaky na puklinách horniny v jejím okolí nebo samostatné žilky v asociaci s cerusitem a pyromorfitem. Patří k nejhodnějších uranovým minerálům na lokalitě. Zajímavé jsou zejména vzorky na kterých se společně vyskytují perfektně krystalované kasolity, které narůstají na krystalovaný pyrit (lokalita. 2J2).

Masuyit byl nalezen velmi vzácně ve formě jehlicovitých, rovnoběžně srostlých krystalů narostlých v tenkých kůrách na volném zvětralém kameni v základce Jánské žíly na 1. patře dolu Prokop. Podložka je tvořena ze zcela přeměněného uraninitu. Masuyit má červenooranžovou barvu, světle oranžový vryp, je křehký a měkký.

Metalodévit byl zjištěn poměrně vzácně na jediném místě na úrovni 1. patra v asociaci s metazeuneritem. Vytváří vzácně drobné tabulkovité krystaly a agregáty těchto krystalů do velikosti až 0,2 mm světle žluté barvy, častěji kulovité agregáty do velikosti až 1 mm na trhlinách sfaleritové žíly v blízkosti žíly uraninitu. Často byly také nalezeny dvojčatné srostlice. Asociuje s metazeuneritem a vzniká působením vodních roztoků na uraninit, pyrit a sfalerit.

Podle výsledků RTG difrakce bylo zjištěno, že plně hydratovaná fáze je za atmosférických podmínek nestabilní a postupnou dehydratací z ní vzniká přechodná fáze a další dehydratací pak fáze, která je známa jako metalodévit. Projevuje se to hlavně ve ztrojení bazální difrakce. Na získání RTG záznamu byl použit vzorek, který byl exponován cca 6 měsíců při teplotách okolo 25 °C. RTG záznam již odpovídá publikovaným datům pro metalodévit.

Metatorbernit se vyskytuje jako málo mocné zelené povlaky na limonitu (Ondruš a Hyršl 1989).

Zeunerit a metazeunerit se vyskytl ve formě dokonale vyvinutých drobných krystalů sytě zelené barvy narostlých na trhlinách pyritu ve společnosti uraninitu, seskupených do srostlic, častěji vytváří kulovité agregáty ve společnosti metalodévit. Podle pozorování in situ je možné říci, že metazeunerit vzniká v místech s vyššími koncentracemi uranu než metalodévit.

Mn oxidy byly zjištěny velmi hojně v silně přeměněných částech žíly jako až několik mm mocné povlaky a krápníky černé barvy. Často se také vyskytl jako skelně lesklé povlaky narostlé recentně na stěnách chodeb. Jako zdroj manganu je uvažován siderit a nebo okolní horniny. Chemickou analýzou byl zjištěn místy podstatný obsah Pb. Takové složení odpovídá jediné známé fázi a to minerálu coronaditu, RTG difrakcí však nebyl potvrzen.

Pyromorfit je typickým produktem oxidace galenitu. Byl nalezen poměrně hojně na Jánské žíle převážně ve formě atypických kanárkově žlutých a světle zelených jehlicovitých krystalech do velikosti 0,5 mm, které skládají až 2 cm dlouhé krápníkovité agregáty. Na stejném místě byly zjištěny i pseudomorfózy pyromorfitu po cerusitu ve formě až 3 mm velkých dutých trojčatných srostlic složených ze žlutých až bílých jehlicovitých krystalů. Obecně lze říci, že výskyty pyromorfitu doprovázejí výskyty cerusitu i sekundárních minerálů uranu. Byl nalezen na 1. i 2. patře (lokality 1J1, 1J2, 2J1). Vyskytuje se typicky v místech, kde je žíla silně rozložená vlivem proudění descendentních meteorických roztoků. Ze starých nálezů pocházejí velmi dobře omezené soudečkovité krystaly pyromorfitu z úrovně 7. patra dolu Anna (sbírky hornického muzea Příbram). Podle provedených chemických analýz (anal. J. Sejkora) je patrné že krystaly pyromorfitu jsou zonální a kromě klasického pyromorfitu se vyskytuje ještě Ca – pyromorfit. Normální pyromorfit lze vyjádřit chem. vzorcem $(\text{Pb}_{4,98}, \text{Ca}_{0,37})_5(\text{Cl}_{0,90}|\text{PO}_4)_{2,98}$ a Ca – pyromorfit $(\text{Pb}_{4,58}, \text{Ca}_{0,37}, \text{Zn}_{0,01})\Sigma 4,96(\text{Cl}_{0,83}|\text{PO}_4)_{2,99}$.

Widenmannit je vzácný trikarbonát uranilu a olova, který se na Jánské žíle vyskytuje v několika typech. Starší typ asociuje s kasolitem a vytváří kusové agregáty až do velikosti 1 cm šedé a béžové barvy gummitového charakteru, nebo práškovité agregáty na ploše až několika cm² béžové barvy ve směsi s kasolitem a v asociaci s cerusitem a pyromorfitem. Mladší typ byl zjištěn na 2. patře Jánské žíly ve formě recentně vzniklých sloupcovitých krystalů světle žlutozelené barvy do velikosti až 0,15 mm, vyskytující se na puklinách uraninitu a polymetalické žiloviny.

Zinkzippeit vytváří nepravidelně polokulovité agregáty o velikosti 0,2 - 0,8 mm a jejich náhodné shluky na ploše až 2 x 5 mm, je oranžově žlutý až oranžový a pod binokulárním mikroskopem vykazuje zřetelně krystalický charakter. Agregáty mají zemité až rozptýleně skelný lesk a nevykazují fluorescenci v krátko- ani dlouhovlnném UV záření. Jednotlivé krystaly zink-zippeitu jsou zpravidla jen nedokonale vyvinuté, sloupečkovité až čočkovité; jejich velikost se pohybuje v rozmezí 10 - 40 μm a náhodně srůstají do bohatých krystalických agregátů (Sejkora et al. 2003). Kulovité agregáty jsou velmi křehké a měkké a narůstají na úlomky hydrotermálně slabě metamorfované droby, která je proniknutá tenkou žilkou sfaleritu.

4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

4.1. Aparatura

Pro stanovení radionuklidů a jejich spekter byla použita aparatura sestavená z těchto součástí: Polovodičový detektor Canberra PIPS 450 mm², předzesilovač Ortec 142A a multikanálový analyzátor **Canberra series 10 plus**.

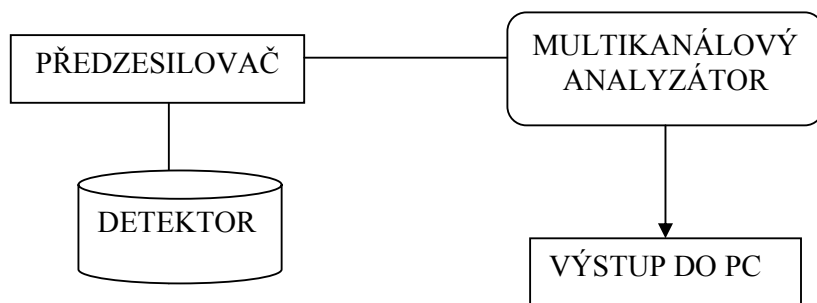
Detekce α -spekter byla prováděna pomocí polovodičového detektoru Canberra PIPS umístěného v podtlakové komoře konstruované Ivo Hlásenským. Komora byla vakuována membránovou vývěvou VM40D firmy Lavat Chotutice.

Multikanálový analyzátor **Canberra series 10 plus** byl nastaven na tyto parametry:

- ▶ paměť: 1st quarter memory = prvních 1024 kanálů z 4096 možných
- ▶ amplitudové zesílení: **Amp gain** – nastavena hodnota 45,0 +/- 1 tak, aby zvolená paměť (1024 kanálů) odpovídala rozsahu energií přirozených emisí α -částic (2-10 MeV)
- ▶ polarita vstupních pulsů: kladná = **Input positive**
- ▶ proudový impuls: rychlý = **TC – fast**
- ▶ dolní diskriminační hladina: SCA:LLD – 2,2% slouží k odstranění nízkoenergetického šumu, nastavena na 2,2% rozsahu
- ▶ horní diskriminační hladina: SCA:ULD – 110% nastavena na 110% rozsahu
- ▶ počet kanálů AD převodníku: ADC gain – 1024 kanálů
- ▶ napětí detektoru: HVPS 40V

Kalibrace a kontrola kalibrace byla prováděna pomocí α -zářiče ^{241}Am – ^{239}Pu emitující α -částice o energiích 5,485 MeV pro ^{241}Am a 5,156 MeV pro ^{239}Pu (Radionuclide – Handbook for Laboratory Workers in Spectrometry, Radiation Protection and Medicine, 2003). Pík odpovídající energii 5,156 MeV se nachází na kanále číslo 520 (+/- 1), energii 5,485 MeV odpovídá kanál 554 (+/- 1) ze zvoleného rozsahu 1024 kanálů. Analyzátor Canberra series 10 plus je vybaven programem pro výpočet kalibrační rovnice dle zadaných parametrů. Pomocí tohoto programu byla kalibrace spočtena takto: $E [\text{keV}] = (\text{CH\#} * 9,794) + 54,06$

Data z analyzátoru byly převedeny pomocí programu CanbPlus (Mgr. Petr Nakládal) ve formě textového souboru do PC a zpracována do finální podoby v programu MS Excel.



Obrázek 3: Blokové schéma zapojení aparatury.

4.2. Použité standardy a referenční materiály pro alfa nedestruktivní

4.2.1. Standardy

Pro stanovení radionuklidů pomocí nedestruktivní alfaspektrometrie byly použity standardy ve stavu radiochemické rovnováhy, tak i nerovnovážné.

Jako hlavní standard ve stavu radioaktivní rovnováhy byl použit PU1. Jedná se o separovaný uraninit z příbramského uranového ložiska s přírodním izotopickým poměrem a s obsahem uranu 71,47%

(analyzován volumetricky Fejglem 2003). U tohoto standardu byl gama spektrometricky stanoven koeficient emanace, který je blízký nule: $K_{em} = -0,57 (\pm 1,01\% [2 \text{ sigma}])$

Tabulka 1: Použité standardy pro nedestruktivní alfaspektrometrii.

označení	charakteristika	původ	obsah U	počet připravených vzorků	poznámka
PU-1	uranitový koncentrát	Příbram, jáma 16	71,47%	14	rovnovážný
UO2.22	U-nat. oxid	VZUP Mníšek	81,54%	8	nerovnovážný

Tabulka 2: Navážky rovnovážného standardu PU1. Nejprve byly váženy prázdné disky a to vždy pětkrát, poté byly na disky nanášeny vzorky standardu a opět stejným způsobem zváženy. V tabulce jsou vyčísleny navážky [mg] a neurčitost vážení vyjádřená v [mg] a [%].

STANDARD PU 1															
vzorek	prázdné														
	PU1	PU1	PU1	PU1	PU1	PU1	PU1	PU1	PU1	PU1	PU1	PU1	PU1	PU1	PU1
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15
	standard	standard	standard	standard	standard	standard	standard	standard	standard	standard	standard	standard	standard	standard	standard
1	2,97768	2,95948	2,98231	2,8951	2,95512	2,96537	2,95538	2,96478	2,98152	2,95648	2,84087	2,958	2,95366	2,95027	2,95807
2	2,97767	2,95949	2,9823	2,89509	2,95513	2,96536	2,95538	2,96478	2,98152	2,95648	2,84087	2,95799	2,95366	2,95027	2,95807
3	2,97767	2,95949	2,9823	2,8951	2,95512	2,96537	2,95537	2,96477	2,98151	2,95648	2,84086	2,958	2,95365	2,95026	2,95807
4	2,97767	2,9595	2,98231	2,8951	2,95513	2,96537	2,95537	2,96477	2,98152	2,95648	2,84087	2,95799	2,95366	2,95027	2,95807
5	2,97768	2,95949	2,9823	2,8951	2,95512	2,96537	2,95536	2,96478	2,98151	2,95648	2,84086	2,95799	2,95366	2,95026	2,95806
průměr	2,977674	2,95949	2,982304	2,895098	2,955124	2,965368	2,955372	2,964776	2,981516	2,95648	2,840866	2,957994	2,953658	2,950266	2,958068
std.	4,9E-06	6,32E-06	4,9E-06	4E-06	4,9E-06	4E-06	7,48E-06	4,9E-06	4,9E-06	0	4,9E-06	4,9E-06	4E-06	4,9E-06	4E-06
vzorek	plné														
	PU1	PU1	PU1	PU1	PU1	PU1	PU1	PU1	PU1	PU1	PU1	PU1	PU1	PU1	PU1
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15
	standard	standard	standard	standard	standard	standard	standard	standard	standard	standard	standard	standard	standard	standard	standard
1	2,97801	2,95971	2,98246	2,89521	2,95523	2,96549	2,95545	2,96495	2,98166	2,95666	2,84192	2,959	2,95413	2,95073	2,95844
2	2,97802	2,9597	2,98247	2,89522	2,95523	2,96549	2,95546	2,96496	2,98166	2,95666	2,84193	2,959	2,95414	2,95073	2,95844
3	2,97802	2,9597	2,98246	2,89522	2,95523	2,9655	2,95546	2,96496	2,98166	2,95667	2,84193	2,959	2,95413	2,95073	2,95844
4	2,97802	2,95971	2,98247	2,89521	2,95522	2,9655	2,95545	2,96496	2,98166	2,95666	2,84193	2,959	2,95413	2,95074	2,95843
5	2,97801	2,95971	2,98246	2,89521	2,95522	2,9655	2,95546	2,96496	2,98166	2,95666	2,84193	2,95899	2,95413	2,95074	2,95844
průměr	2,978016	2,959706	2,982464	2,895214	2,955226	2,965496	2,955456	2,964958	2,98166	2,956662	2,841928	2,958998	2,954132	2,950734	2,958438
std.	4,9E-06	4,9E-06	4,9E-06	4,9E-06	4,9E-06	4,9E-06	4,9E-06	4E-06	0	4E-06	4E-06	4E-06	4E-06	4,9E-06	4E-06
navážka [mg]	0,342	0,216	0,16	0,116	0,102	0,128	0,084	0,182	0,144	0,182	1,062	1,004	0,474	0,468	0,37
std. [mg]	0,0098	0,0112	0,0098	0,0089	0,0098	0,0089	0,0124	0,0089	0,0049	0,0040	0,0089	0,0089	0,0080	0,0098	0,0080
std. [%]	2,9	5,2	6,1	7,7	9,6	7,0	14,7	4,9	3,4	2,2	0,8	0,9	1,7	2,1	2,2

Jako standard ve stavu radioaktivní nerovnováhy (neobsahuje dceřiné radionuklidy za ^{234}U) byl použit oxid uranu o vzorci $\text{UO}_{2,22}$ s přírodním izotopickým poměrem a s obsahem uranu 81,54% (analyzován volumetricky Fejglem 2003). Typické spektrum je uvedeno na obrázku 6.

4.2.2. Referenční materiály

Byla prováděna řada měření potenciálně použitelných referenčních materiálů. V prvním sledu byl vybrán soubor 5-ti referenčních materiálů: CRM 6-A, proterozoický uraninit s certifikovaným obsahem U 57,59%, CUP-2 uranový chemický koncentrát s obsahem U 75,42%, UTS-4 což je úpravárenský odpad po vyloužení uranu s obsahem pouze U 1010 $\mu\text{g/g}$ a certifikovanými obsahy některých dceřiných radionuklidů (^{226}Ra , ^{210}Pb , ^{210}Po), CRM 129-A nerovnovážný oxid uranu (U_3O_8) s obsahem U 84,77% a BL5, uranová ruda obsahující 7,09%.

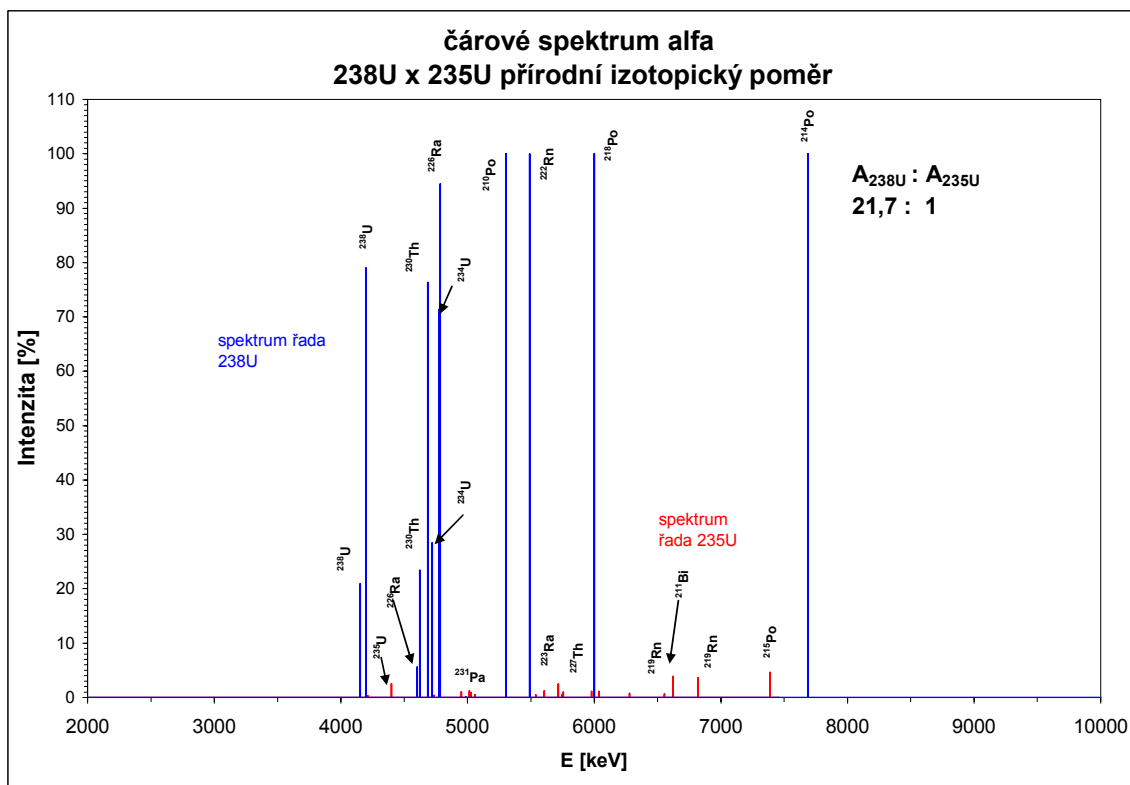
Tabulka 3: Navážky nerovnovážného standardu UO_{2,22}. Nejprve byly váženy prázdné disky a to vždy pětkrát, poté byly na disky nanášeny vzorky standardu a opět stejným způsobem zváženy. V tabulce jsou vyčísleny navážky [mg] a neurčitost vážení vyjádřená v [mg] a [%].

STANDARD UO _{2,22}								
vzorek	UO2.22	UO2.22	UO2.22	UO2.22	UO2.22	UO2.22	UO2.22	UO2.22
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
	standard	standard	standard	standard	standard	standard	standard	standard
1	2,92856	2,92378	2,85475	2,87553	2,96301	2,97105	2,81216	2,91513
2	2,92854	2,92378	2,85474	2,87553	2,963	2,97105	2,81216	2,91512
3	2,92854	2,92378	2,85474	2,87552	2,96301	2,97105	2,81216	2,91513
4	2,92855	2,92378	2,85475	2,87553	2,96301	2,97105	2,81216	2,91513
5	2,92854	2,92377	2,85474	2,87553	2,96301	2,97105	2,81217	2,91513
průměr	2,928546	2,923778	2,854744	2,875528	2,963008	2,97105	2,812162	2,915128
std.	8E-06	4E-06	4,89898E-06	4E-06	4E-06	0	4E-06	4E-06
plné								
vzorek								
1	2,92877	2,92408	2,85509	2,87568	2,96313	2,97119	2,81234	2,91538
2	2,92878	2,92408	2,85508	2,87568	2,96312	2,97119	2,81235	2,91538
3	2,92877	2,92409	2,85508	2,87567	2,96312	2,97112	2,81234	2,91537
4	2,92877	2,92408	2,85509	2,87568	2,96312	2,97119	2,81234	2,91537
5	2,92877	2,92407	2,85509	2,87567	2,96312	2,97119	2,81235	2,91538
průměr	2,928772	2,92408	2,855086	2,875676	2,963122	2,971192	2,812344	2,915376
std.	4E-06	6,32456E-06	4,89898E-06	4,89898E-06	4E-06	4E-06	4,89898E-06	4,89898E-06
navážka [mg]	0,226	0,302	0,342	0,148	0,114	0,142	0,182	0,248
std. [mg]	0,0120	0,0103	0,0098	0,0089	0,0080	0,0040	0,0089	0,0089
std. [%]	5,3	3,4	2,9	6,0	7,0	2,8	4,9	3,6

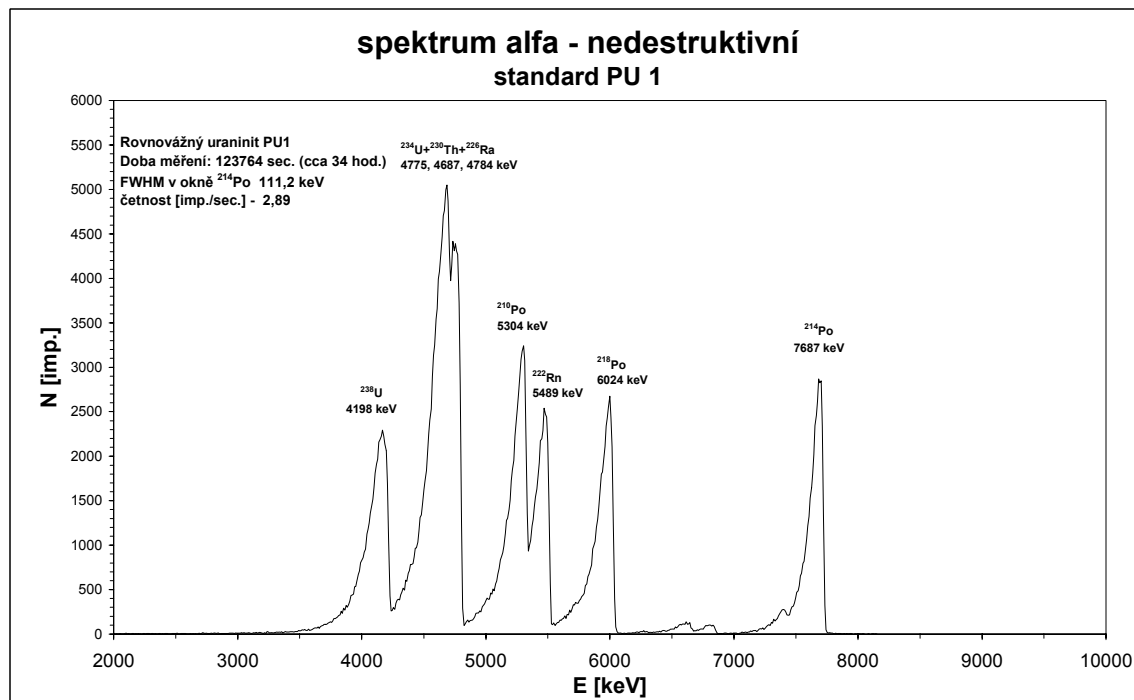
Ze všech materiálů byly připraveny série vzorků a měřeny nedestruktivní alfa spektrometrií. Při nanášení vzorků na disk se tvořila u materiálu UTS-4 a CRM 6-A bílá sraženina, která vznikala v důsledku krystalizace rozpustných solí obsažených v těchto referenčních materiálech. Velké množství solí negativně zkreslovalo výsledky stanovení radionuklidů, zhoršovalo energetické rozlišení získaných spekter a znesnadňovalo nanášení vzorků na disk. V případě referenčního materiálu CUP-2 deklarovaného jako chemický uranový koncentrát byla konstatována přítomnost relativně velkého množství necertifikovaných rozpadových produktů (zejména ²²⁶Ra).

Z těchto důvodů bylo upuštěno od použití u materiálů CRM 6-A, UTS-4 a CUP-2. Nejlepších možných výsledků dosáhl rovnovážný BL5 a nerovnovážný CRM 129-A, kterých pak bylo použito k verifikaci použité metody.

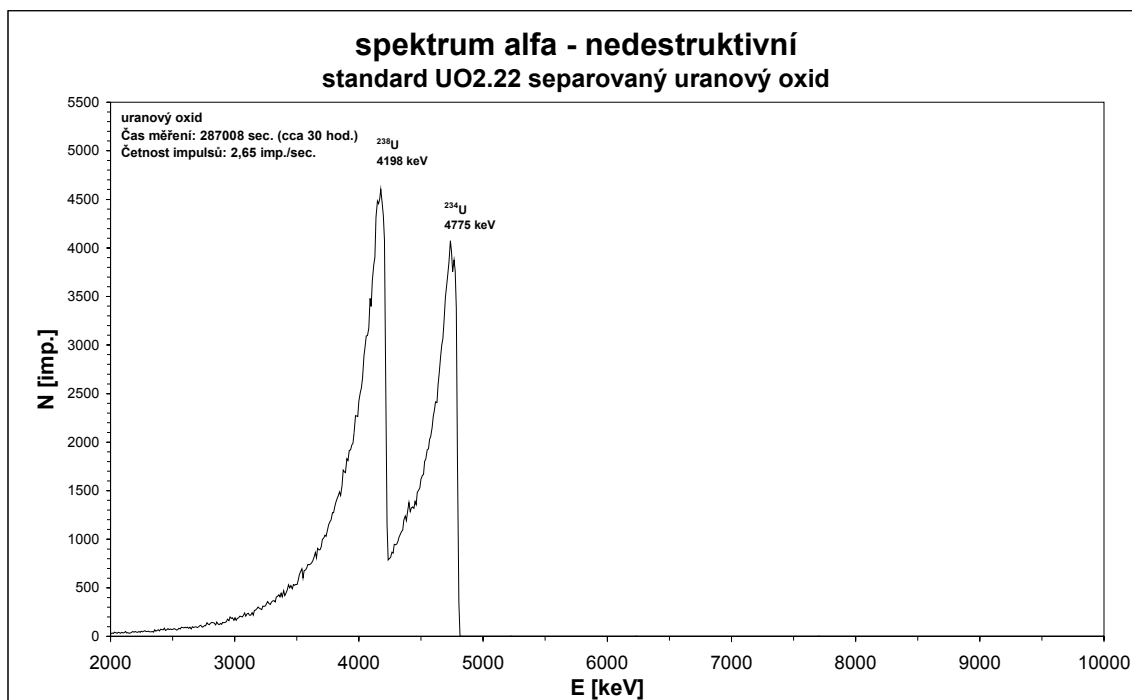
Jako referenční materiál pro verifikaci standardu PU1 byl použit preparát BL5 (uranová ruda v radioaktivní rovnováze) s certifikovaným obsahem U 7,09%. Naměřené hodnoty koncentrací uranu byly ve všech případech pod výrobcem deklarovanou hodnotou a koncentrace 7,09% nebyla překročena ani při započítání neurčitosti stanovení (1 sigma). Možné vysvětlení tohoto jevu je rozdělení fází polyminerálního materiálu (mletá U-ruda) při přípravě vzorků a jeho nanášení v suspenzi.



Obrázek 4: Model čárového spektra rovnovážného uranu s přírodním izotopickým poměrem. Na ose Y je vyjádřena relativní intenzita emisí alfa částic v %, poměr aktivit řady $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ je zachován. Intenzity emisních linií převzaty z Wahl 2003.



Obrázek 5: Alfasppektrum standardu PU1 (uraninit) ve stavu radioaktivní rovnováhy. Zleva vidíme energetický pík ^{238}U (4198 keV), složený pík $^{230}\text{Th}+^{234}\text{U}+^{226}\text{Ra}$ (4687, 4775 a 4784 keV), pík ^{210}Po (5304 keV), dále ^{222}Rn (5489 keV), ^{218}Po (6024 keV) a zcela vpravo je pík ^{214}Po (7687 keV). Mezi píky ^{218}Po a ^{214}Po jsou viditelné nízké zaoblené píky ^{211}Bi a ^{219}Rn rozpadové řady ^{235}U .



Obrázek 6: Alfasppektrum standardu UO_{2,22} ve stavu radioaktivní nerovnováhy. Hodnota FWHM na okně ²³⁸U je 225,8 (± 4,3) keV.

Jemnozrný podíl je ochuzen o fáze s vyšší objemovou hmotností a obsahy uranu v tomto případě vycházejí systematicky nižší než deklarovaná hodnota (průměr ze šesti vzorků je 5,73 ± 0,56 %). Výsledky měření a grafické znázornění jsou uvedeny v tabulce 6 a na obrázku 7.

Tabulka 4: Referenční materiály použité pro verifikaci nedestruktivní alfasppektrometrie.

referenční materiál	charakteristika	původ	obsah U	²²⁶ Ra	²¹⁰ Pb	počet připravených vzorků	poznámka
BL-5	U-ruda	Beaverlodge, Fay mine	7,09%	857 Bq/g	866 Bq/g	6	rovnovážný
CRM 129-A	U-nat. oxide, isotopický	NLO Inc., Cincinnati	84,77%	---	---	9	nerovnovážný

Jako další referenční materiál pro verifikaci metody byl měřen preparát CRM 129-A s certifikovaným obsahem 84,77% U (tabulka 4). Jedná se o chemicky separovaný oxid uranu o ideálním vzorci U₃O₈. Z hlediska radiochemické rovnováhy je materiál v nerovnovážném stavu. Naměřené koncentrace uranu se pohybují v hodnotách od 79,99 (±1,75) [%U] do 109,18 (±18,71) [%U], neurčitost stanovení je v rámci 1 sigma (tabulka 8, obrázek 8). Průměrná koncentrace uranu devíti vzorků stanovená na okně ²³⁸U vychází 90,64 (±9,22) %.

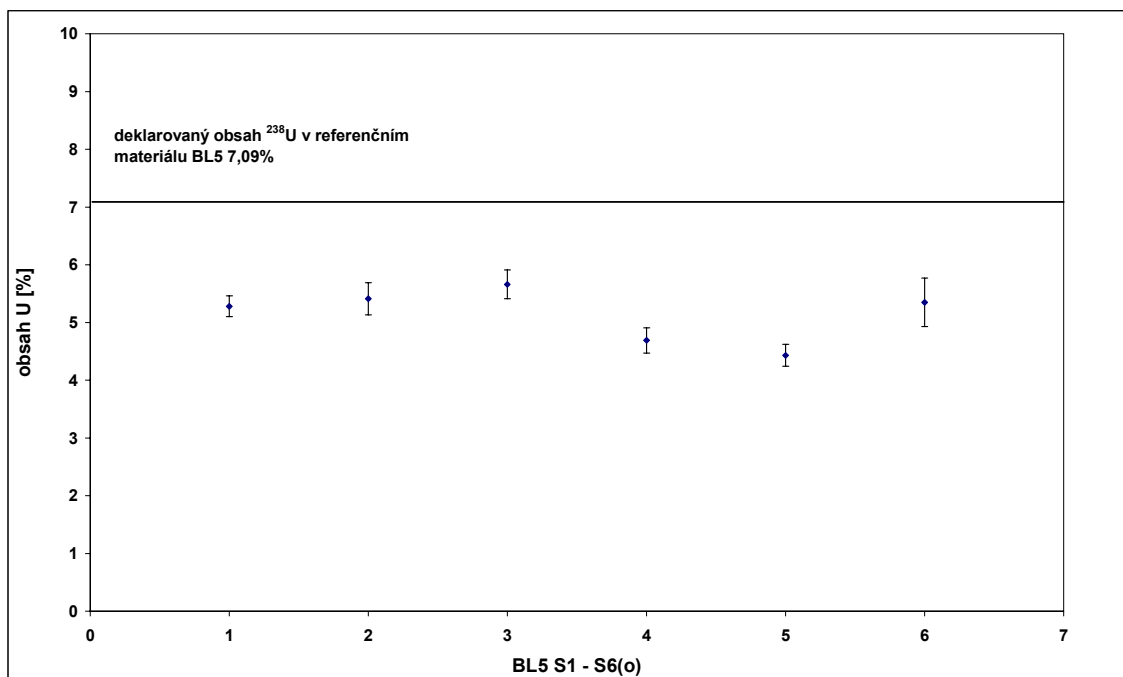
Tabulka 5: Navážky rovnovážného referenčního materiálu BL 5. Nejprve byly zváženy prázdné disky a to vždy pětkrát (horní část tabulky). Pak byly na disky nanášeny vzorky referenčního materiálu a stejným způsobem zváženy. V tabulce jsou vyčísleny navážky a neurčitost vážení vyjádřena v [mg] a [%].

REFERENČNÍ MATERIÁL BL 5						
vzorek	prázdné					
	BL5 S1	BL5 S2	BL5 S3	BL5 S4	BL5 S5	BL5 S6
	standard	standard	standard	standard	standard	standard
1	2,86489	2,94953	2,84449	2,95611	2,96581	2,9579
2	2,86489	2,94953	2,84449	2,95611	2,96581	2,95791
3	2,86488	2,94952	2,84449	2,95611	2,96582	2,95791
4	2,86488	2,94952	2,84448	2,95612	2,96582	2,95791
5	2,86488	2,94952	2,84449	2,95611	2,96582	2,9579
průměr	2,864884	2,949524	2,844488	2,956112	2,965816	2,957906
std.	4,89898E-06	4,89898E-06	4E-06	4E-06	4,89898E-06	4,89898E-06
vzorek	plně					
	1	2,86555	2,94983	2,84485	2,95651	2,96611
2	2,86555	2,94983	2,84484	2,95651	2,96611	2,95809
3	2,86556	2,94982	2,84485	2,9565	2,96611	2,95808
4	2,86556	2,94982	2,84484	2,95651	2,96611	2,95809
5	2,86556	2,94983	2,84484	2,9565	2,96611	2,95809
průměr	2,865556	2,949826	2,844844	2,956506	2,96611	2,958088
std.	4,89898E-06	4,89898E-06	4,89898E-06	4,89898E-06	0	4E-06
navážka [mg]	0,672	0,302	0,356	0,394	0,294	0,182
std. [mg]	0,0098	0,0098	0,0089	0,0089	0,0049	0,0089
std. [%]	1,5	3,2	2,5	2,3	1,7	4,9

Tabulka 6: Výsledky měření referenčního materiálu BL5. Za názvem vzorku je hodnota FWHM píku ^{214}Po s neurčitostí stanovení [keV], následuje hodnota FWHM píku ^{238}U s neurčitostí stanovení [keV], dále navážka s vyčíslenou neurčitostí vážení [mg], v dalším sloupci je uvedena koncentrace uranu na okně ^{238}U [%U] s neurčitostí stanovení [%U], poslední dva sloupce prezentují koncentrace ekvivalentu uranu [%eU] ^{226}Ra na okně ^{214}Po s neurčitostí stanovení [%eU]. Velikost neurčitosti je 1 sigma. Grafické vyjádření výsledků měření BL5 ukazuje obrázek 7. Pro přepočítání koncentrací eU [%] na aktivitu [Bq/g] lze použít vztah:

$$A_{[\text{Bq/g}]} = eU[\%] * 123,5$$

REFERENČNÍ MATERIÁL BL 5										
VZOREK	FWHM ^{214}Po	neurčitost FWHM [keV]	FWHM ^{238}U	neurčitost FWHM [keV]	navážka [mg]	neurčitost navážky [mg]	koncentrace na okně ^{238}U [% eU]	sigma [%eU]	koncentrace ^{226}Ra na okně ^{214}Po [%eU]	sigma [%eU]
BL5_S1	201,00	10,09	168,20	7,59	0,672	0,0098	6,90	0,22	5,75	0,15
BL5_S2	102,40	10,53	136,40	13,11	0,302	0,0098	5,36	0,28	3,86	0,20
BL5_S3	127,40	10,94	145,10	10,38	0,356	0,0089	5,93	0,26	4,42	0,18
BL5_S4	148,70	8,57	168,90	6,27	0,394	0,0089	5,33	0,24	5,13	0,19
BL5_S5	166,00	12,04	185,40	12,96	0,294	0,0049	5,36	0,21	5,25	0,17
BL5_S6(O)	116,90	31,70	152,00	6,94	0,182	0,0089	5,51	0,43	5,22	0,37
průměr	143,73	13,98	159,33	9,54	0,367	0,0085	5,73	0,27	4,94	0,21
směrodatná odchylka	32,90	---	16,49	---	0,151	---	0,56	---	0,62	---



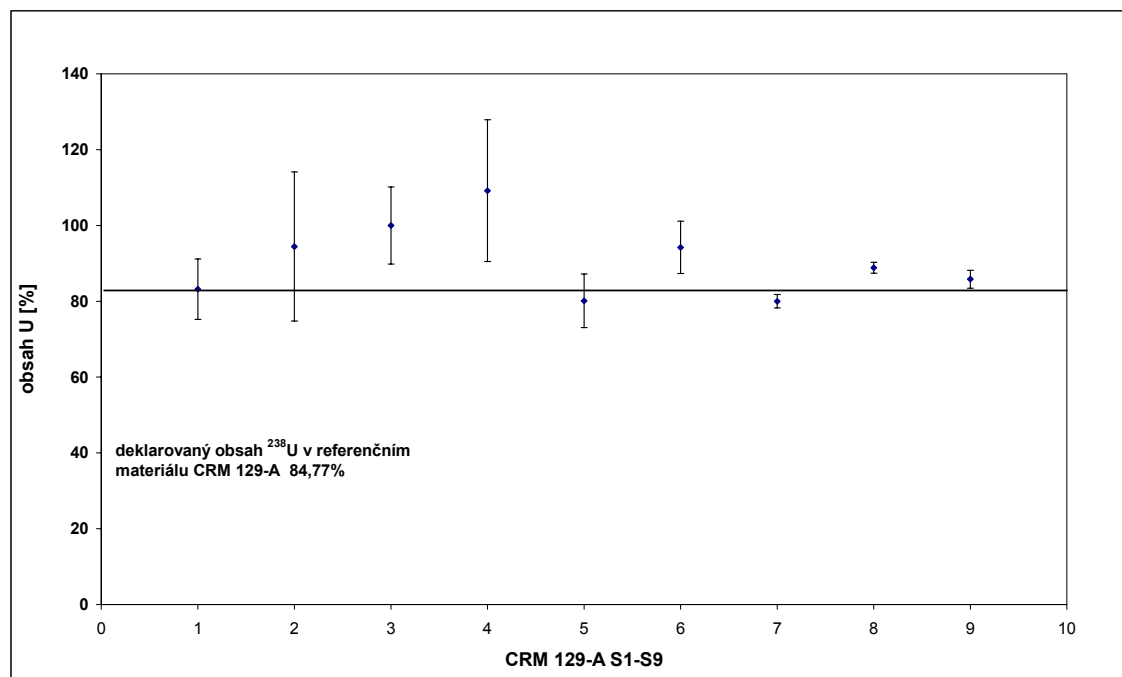
Obrázek 7: Přehled naměřených koncentrací uranu u referenčního materiálu BL5 s deklarovaným obsahem 7,09%. Výsledky měření na energetické linii ^{238}U . Chybové úsečky vyjadřují velikost 1 sigma.

Tabulka 7: Navážky nerovnovážného referenčního materiálu CRM 129-A. Nejprve byly zváženy prázdné disky a to vždy pětkrát (horní část tabulky). Pak byly na disky nanášeny vzorky referenčního materiálu a stejným způsobem zváženy. V tabulce jsou vyčísleny navážky a neurčitost vážení vyjádřená v [mg] a [%].

REFERENČNÍ MATERIÁL CRM 129-A									
vzorek	prázdné								
	U_3O_8	U_3O_8	U_3O_8	U_3O_8	U_3O_8	U_3O_8	U_3O_8	U_3O_8	U_3O_8
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
	standard*	standard*	standard*	standard*	standard*	standard*	standard	standard	standard
1	2,94717	2,94665	2,97799	2,9668	2,95535	2,96646	2,96376	2,9702	2,97597
2	2,94717	2,94666	2,97799	2,9668	2,95535	2,96646	2,96376	2,9702	2,97597
3	2,94716	2,94665	2,97799	2,96681	2,95535	2,96646	2,96376	2,9702	2,97597
4	2,94717	2,94666	2,97798	2,9668	2,95534	2,96646	2,96376	2,9702	2,97597
5	2,94717	2,94665	2,97798	2,9668	2,95534	2,96646	2,96376	2,9702	2,97597
průměr	2,947168	2,946654	2,977986	2,966802	2,955346	2,96646	2,96376	2,9702	2,97597
std.	4E-06	4,9E-06	4,9E-06	4E-06	4,9E-06	0	0	0	0
vzorek	plné								
1	2,94727	2,9467	2,97804	2,96686	2,95545	2,96654	2,96411	2,97053	2,97625
2	2,94727	2,9467	2,97804	2,96686	2,95546	2,96653	2,9641	2,97053	2,97625
3	2,94727	2,9467	2,97804	2,96685	2,95546	2,96654	2,9641	2,97052	2,97625
4	2,94727	2,94671	2,97804	2,96685	2,95546	2,96654	2,96411	2,97053	2,97624
5	2,94726	2,94671	2,97804	2,96686	2,95546	2,96653	2,9641	2,97053	2,97624
průměr	2,947268	2,946704	2,97804	2,966856	2,955458	2,966536	2,964104	2,970528	2,976246
std.	4E-06	4,9E-06	0	4,9E-06	4E-06	4,9E-06	4,9E-06	4E-06	4,9E-06
navážka [mg]	0,1	0,05	0,054	0,054	0,112	0,076	0,344	0,328	0,276
std. [mg]	0,0080	0,0098	0,0049	0,0089	0,0089	0,0049	0,0049	0,0040	0,0049
std. [%]	8,0	19,6	9,1	16,5	7,9	6,4	1,4	1,2	1,8

Tabulka 8: Výsledky měření referenčního materiálu CRM 129-A. Za názvem vzorku je hodnota FWHM piku ^{238}U s neurčitostí stanovení [keV], dále navážka s vyčíslenou neurčitostí vážení [mg], v dalším sloupci je uvedena koncentrace uranu na okně ^{238}U [%U] s neurčitostí stanovení [%U]. Velikost neurčitosti stanovení je 1 sigma. Grafické vyjádření výsledků měření CRM 129-A ukazuje obrázek 8. Pro přepočítání koncentrací eU [%] na aktivitu [Bq/g] lze použít vztah: $A_{[\text{Bq/g}]} = eU[\%] * 123,5$

REFERENČNÍ MATERIÁL CRM 129 - A						
VZOREK	FWHM ^{238}U	neurčitost FWHM [keV]	navážka [mg]	neurčitost navážky [mg]	koncentrace uranu na okně ^{238}U [%]	sigma [%U]
CRM 129-A_S1	275,92	35,20	0,100	0,0080	83,22	7,96
CRM 129-A_S2	197,95	8,57	0,050	0,0098	94,43	19,67
CRM 129-A_S3	176,04	5,08	0,054	0,0049	100,01	10,16
CRM 129-A_S4	157,73	13,84	0,054	0,0089	109,18	18,71
CRM 129-A_S5	210,82	6,03	0,112	0,0089	80,12	7,06
CRM 129-A_S6	188,6	10,14	0,076	0,0049	94,22	6,86
CRM 129-A_S7	263,66	3,49	0,344	0,0049	79,99	1,75
CRM 129-A_S8	292,97	7,27	0,328	0,0040	88,83	1,44
CRM 129-A_S9	288,47	4,68	0,276	0,0049	85,80	2,36
průměr	228,02	10,48	0,15	0,01	90,64	8,44
směrodatná odchylka	49,25	---	0,12	---	9,22	---



Obrázek 8: Přehled naměřených koncentrací uranu u referenčního materiálu CRM 129-A s deklarovaným obsahem 84,77%. Měřeno na energetické linii ^{238}U . Chybové úsečky vyjadřují velikost 1 sigma.

4.3. Nedestruktivní alfaspektrometrie

Tato metoda měření umožňuje velice jednoduše identifikaci všech alfa zářičů ve vzorku bez nutnosti předchozí chemické separace, což je její nespornou výhodou. Díky nenáročnosti metody lze provádět měření na velkém souboru vzorků, u kterých potřebujeme stanovit např. orientační posouzení stupně radiochemických rovnováh. Podle výsledků nedestruktivní alfaspektrometrie lze pak vzorky po kvalitativním vyhodnocení rozřadit do skupin s podobnými radiochemickými charakteristikami a postoupit případně jejich užší výběr k dalšímu zpracování (destruktivní alfaspektrometrie).

4.3.1. Výběr vzorků

Sběr a separace vzorků z Jánské žíly byla prováděna Pavlem Škáchou, Jakubem Plášilem, Mgr. Viktorem Goliášem Ph.D. a dalšími. Po separaci byla Pavlem Škáchou a Jakubem Plášilem provedena jejich mineralogická identifikace pomocí práškové RTG difrakce na zařízení XpertPro. Po identifikaci a posouzení pak byly vhodné vzorky vybrány pro měření metodou nedestruktivní alfaspektrometrie.

4.3.2. Příprava vzorků

Vzorky byly po rozetření v alkoholu nanášeny na podložní sklička (vysušená alkoholová suspenze) pro účely práškové RTG difrakce. Preparáty pro nedestruktivní α -spektrometrii byly připravovány z těchto vzorků dle modifikovaných metod aplikovaných v diplomové práci Michala Feigla. Modifikovaná metoda přípravy vzorků pro nedestruktivní spektrometrii je uvedena v příloze č.I.

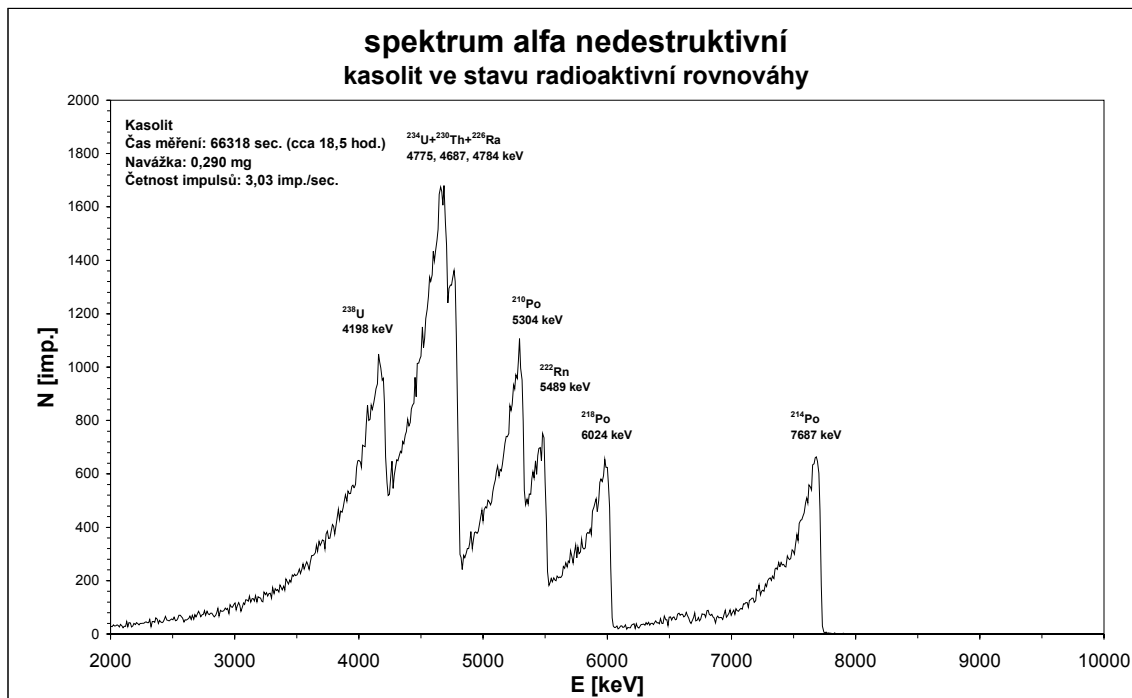
4.3.3. Podmínky měření

Průměrná doba měření vzorků i standardů byla v rozmezí 12 - 24 hod. Pokud aktivita vzorku byla nízká, doba měření se po vizuální kontrole přiměřeně prodloužila. U některých nízkoaktivních vzorků činila doba měření až 96 hod.

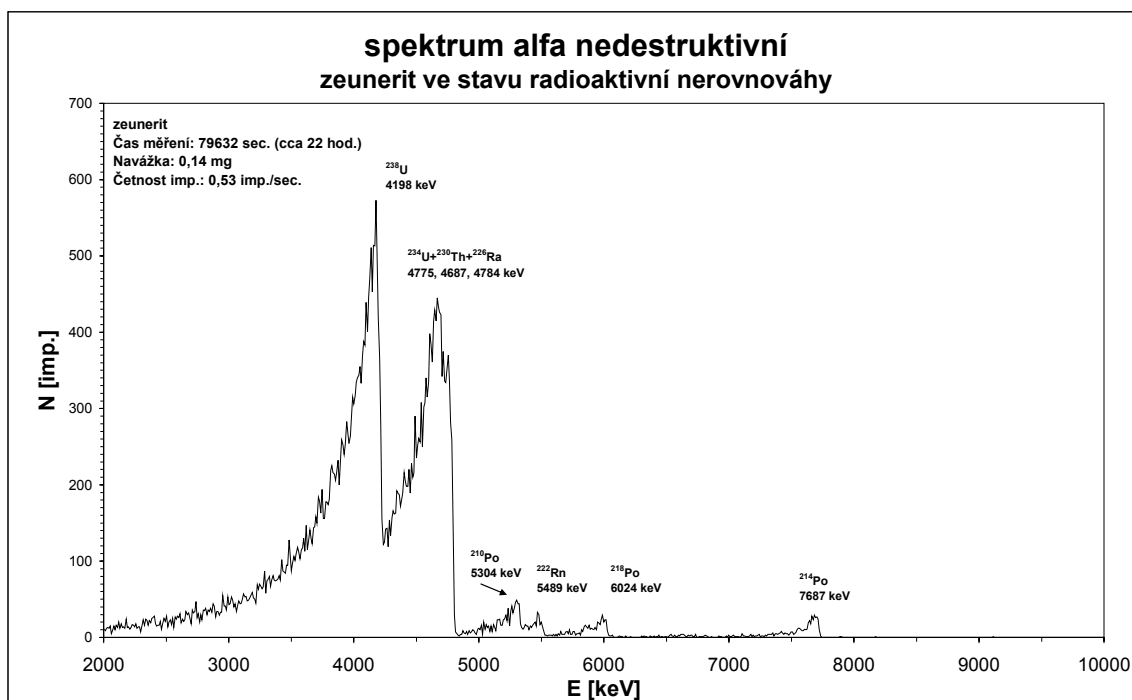
Souběžně s měřením vzorků byla prováděna kontrola pozadí detektoru. Tato měření se prováděla periodicky v intervalech přibližně po měsíci a doba měření byla cca 48 – 72 hod. Graf vývoje hodnot pozadí je uveden v příloze č.II.

4.4. Kvalitativní hodnocení vzorků nedestruktivní alfaspektrometrie

Kvalitativní hodnocení spekter bylo prováděno vizuálně, hodnocena přítomnost hlavních radionuklidů (^{238}U , ^{230}Th , ^{226}Ra , ^{210}Po , ^{214}Po) a odhadem posouzena radioaktivní rovnováha či nerovnováha. Celý soubor vzorků byl pak zpracován do tabulky (kap. 5.1.) a každý vzorek byl v textu samostatně zhodnocen. Velice důležité pro další postup byly výsledná spektra mladších fází nacházejících se v radioaktivní nerovnováze, především uranových sekundárních minerálů, které byly vybrány pro další měření metodou destruktivní alfaspektrometrie a datování pomocí izotopového páru $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$. Vzorky v rovnovážném stavu totiž nelze použít pro měření stáří pomocí metody $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$, proto byly dále hodnoceny již jen kvantitativně z hlediska koncentrací a aktivit přítomných radionuklidů. Při zpracování spekter byly nalezeny minerální fáze vyznačující se zvýšenou aktivitou neobvyklých asociací radionuklidů, např. beudantit, který neobsahuje iniciační uran, ale pouze deceřin ^{230}Th , u jarositu byly nalezeny ve zvýšené míře rozpadové produkty řady ^{235}U . Příklady rovnovážného a nerovnovážného spektra dvou uranových sekundárních minerálů jsou uvedeny na obrázcích 9 a 10.

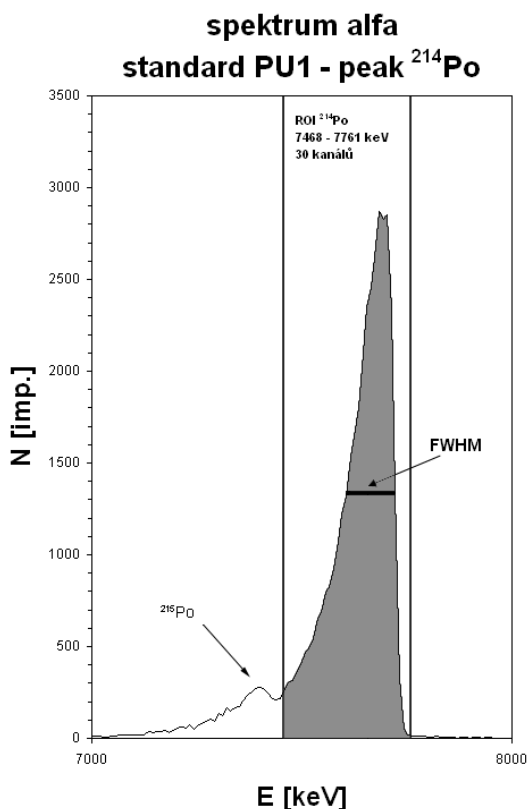


Obrázek 9: Alfaspéktrum vzorku kasolitu ve stavu radioaktivní rovnováhy. Přítomné píky uranu i dceřiných rozpadových produktů mají vizuálně přibližně stejnou výšku.



Obrázek 10: Alfaspéktrum zeuneritu ve stavu radioaktivní nerovnováhy. Převládají energetické píky obou izotopů uranu, dceřiné radionuklidy jsou zastoupeny minoritně. Tento vzorek byl datován metodou $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$.

4.5. Kvantitativní hodnocení vzorků nedestruktivní alfaspektrometrie



Při experimentech kvantitativního hodnocení naměřených spektrálních dat byly nejprve prováděny pokusy o aplikaci programů pro vyhodnocení naměřených spekter metodou fitování píků pomocí analytických funkcí (Bortels a Collaers 1987, Bortels et al 1995, Bland 1998), kdy je tvar energetického maxima aproximován exponenciálně modifikovanou gaussovskou křivkou. Takové experimenty byly prováděny pomocí software Fityk (opensource na www.unipress.waw.pl/fityk autora Marcina Wojdyra z Ústavu vysokých tlaků polské akademie věd). Další pokusy o vyhodnocování fitování byly činěny pomocí demo verze programu InterWinner (ORTEC) a zejména pomocí freeware programu WinALPHA (Noy et al. 2004).

Obrázek 11: Vymezení ROI pro izotop ^{214}Po a grafické znázornění velikosti FWHM. Šířku okna je potřeba zvolit tak, aby energetické píky jiných radionuklidů (v tomto případě ^{215}Po) nezasahovaly do vymezené oblasti.

Tyto experimenty se ukázaly být slepou uličkou z důvodu vysokého FWHM a tím i přílišného rozmytí naměřených spekter. Velká část vzorků

má špatnou statistiku a velmi vysoké chyby stanovení. V krajním případě lze výše uvedených metod použít maximálně pro pík ^{214}Po .

Nejvíce problémů činilo fitování komplikovaného multipletu $^{234}\text{U}+^{230}\text{Th}+^{226}\text{Ra}$, kde výpočetní algoritmus kolaboval. Pro nedestruktivní spektra je zřejmě použití pomocí fitování velmi omezeno a musela být hledána jiná, robustnější metoda jejich vyhodnocení.

Proto bylo přistoupeno k vyhodnocování spekter pomocí výpočtů četností energetických oken, výpočtu empirických koeficientů citlivosti a aplikaci empirických stripping koeficientů, umožňujících odečíst vliv chvostů degradovaných energií.

4.5.1. Koeficient citlivosti

Koeficient citlivosti byl stanoven na souboru 14-ti vzorků standardu PU1. Tento koeficient byl určen z plochy píku v okně ^{214}Po , pro které byla stanovena šířka 30 kanálů (293,8 keV). Vymezení energetického okna (ROI) je znázorněno na obrázku 10.

Princip výpočtu aktivity vzorku z naměřených intenzit:

Základní rovnicí je:

$$I = A \cdot a \quad (1)$$

kde:

I detekovaná intenzita (četnost) na okně [imp./s]

A aktivita vzorku [Bq]

a koeficient citlivosti [imp./s/Bq]

úpravou po odečtení pozadí (u vyšších aktivit můžeme zanedbat) lze vyčíslit koeficient citlivosti:

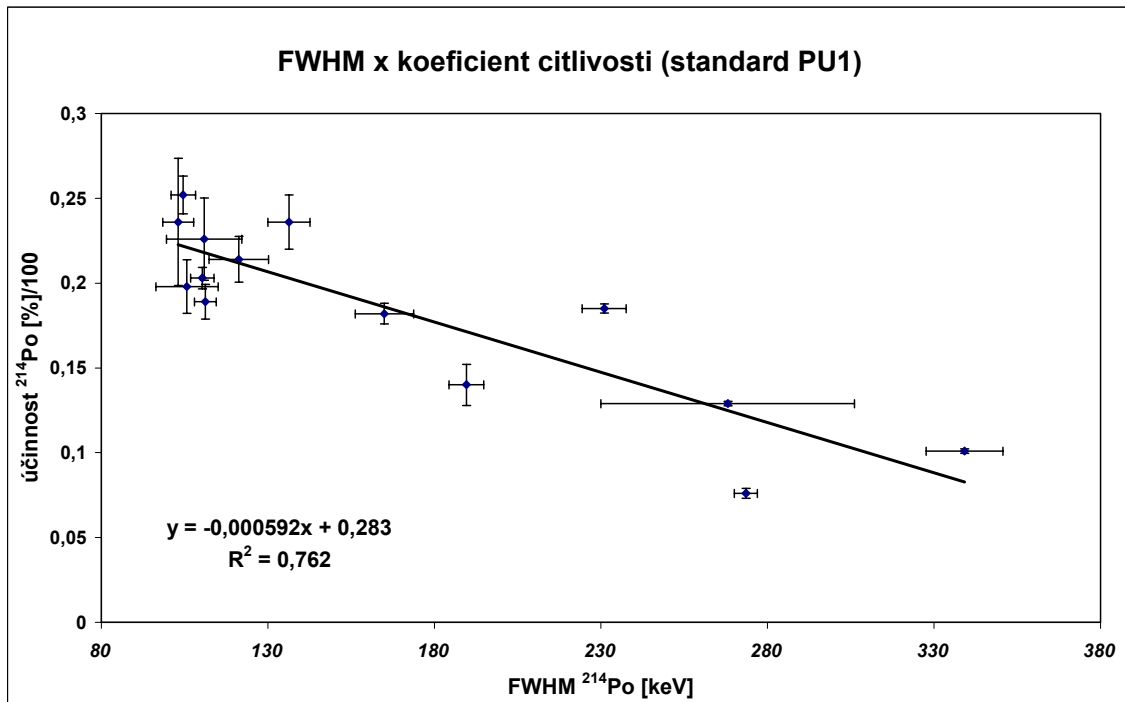
$$a = \frac{I_{214Po} - n_b}{A_{214Po}} \quad (2)$$

a koeficient citlivosti [imp./s/Bq]
 I_{214Po} naměřená četnost (intenzita) [imp./s]
 A_{214Po} skutečná aktivita [Bq]
 n_b četnost impulsů pozadí [imp./s]

Koeficient citlivosti však není nikdy konstantní, jeho velikost je závislá na velikosti FWHM:

$$a = f(FWHM) \quad (3)$$

Pro zjištění průběhu této závislosti byla připravena a měřena řada vzorků standardu PU1 s různým FWHM. Pro výpočet FWHM a chyby jeho stanovení byla použita metoda podle Fejgla (2003). Ze zjištěné závislosti byla spočtena regresní rovnice, podle které lze koeficient citlivosti vyčíslit u reálných vzorků (obrázek 12).



Obrázek 12: Graf závislosti FWHM ^{214}Po na účinnosti detekce (koeficientu citlivosti).

Regresní rovnice závislosti FWHM ^{214}Po na účinnosti detekce. Tato regrese stanovená na řadě rovnovážných standardů PU1 má parametry:

$$y = -0,000592x + 0,283 \quad \text{s hodnotou spolehlivosti: } R^2 = 0,762 \quad (4)$$

4.5.1.1. Stanovení koncentrace uranu na okně ^{238}U

U vzorků s přítomností jak U tak Ra je na energetickém okně ^{238}U přítomno také velké množství impulsů v podobě chvostu degradovaných energií. V tomto případě byl aplikován výpočet typu stripping, kdy je příspěvek těchto degradovaných energií matematicky odečten.

Je zřejmé, že v případě radioaktivní rovnováhy bude počet impulsů na okně ^{214}Po i na okně ^{238}U stejný pouze v případě pokud nebude docházet k degradaci energie emitovaných alfa částic. Druhou podmínkou je, že koeficient emanace je blízký nule (viz níže).

Tedy:

$$I_{238U} = I_{214Po} \quad (5)$$

V případě, že do okna ^{238}U přispívají degradované energie dostáváme intenzitu vyšší (označme ji \bar{I} s pruhem). Výše příspěvku degradovaných energií je úměrná aktivitě izotopů vyšších energií (především ^{226}Ra a jeho rozpadové produkty) a je také závislá na FWHM spektra. Příspěvek degradovaných energií lze odečíst pomocí stripping koeficientu α .

Tedy:

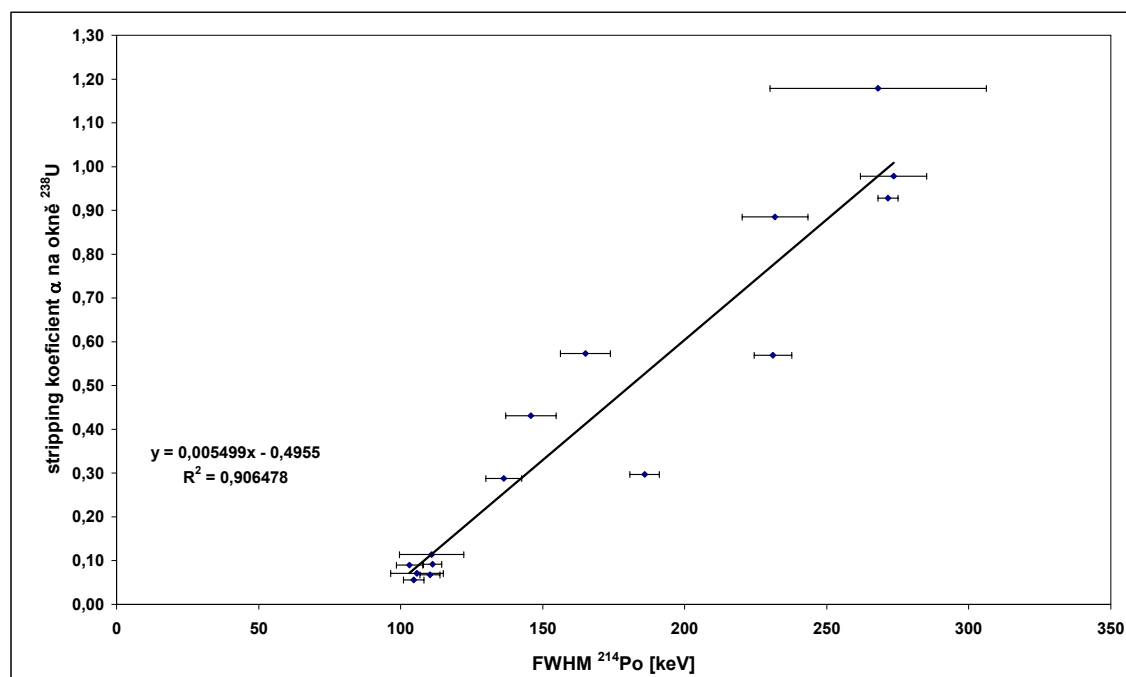
$$\bar{I}_{238U} = I_{238U} + I_{214Po} \cdot \alpha \quad (6)$$

při zohlednění rovnice (5) a úpravou lze získat koeficienty α :

$$\alpha = \frac{\left(\bar{I}_{238U} - I_{214Po} \right)}{I_{214Po}} \quad (7)$$

přičemž:

$$\alpha = f(FWHM) \quad (8)$$



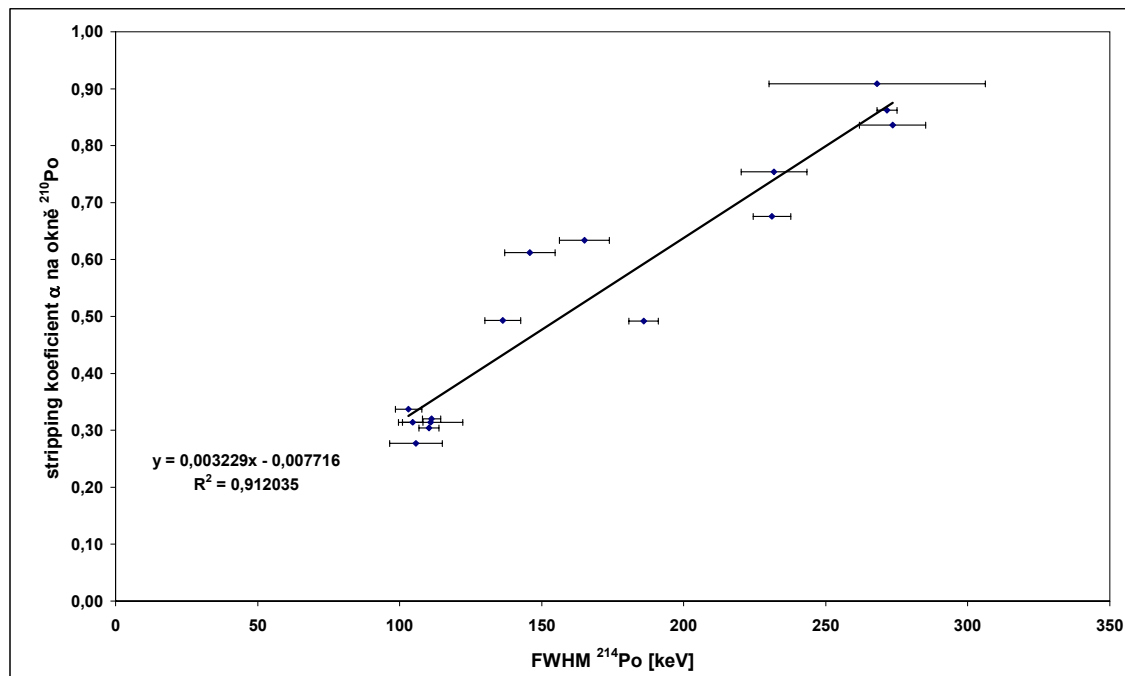
Obrázek 13: Graf závislosti stripping koeficientu α pro okno ^{238}U na FWHM píku ^{214}Po naměřeného na řadě rovnovážných standardů PU1.

Při znalosti stripping koeficientu α lze pro ROI ^{238}U použít stejný koeficient citlivosti jako pro ROI ^{214}Po (rovnice 2). Z řady rovnovážných standardů PU1 o různém FWHM byl vypočítán stripping koeficient α a sestrojena regresní závislost obou veličin (obrázek 13).

Regresní rovnice závislosti stripping koeficientu α pro okno ^{238}U na FWHM píku ^{214}Po . Tato regrese stanovena na řadě rovnovážných standardů PU1 má parametry:

$$y = 0,005499x - 0,4955 \quad \text{s hodnotou spolehlivosti: } R^2 = 0,906478 \quad (9)$$

Stejným způsobem byl stripping koeficient α určen také pro energetické okno ^{210}Po .



Obrázek 14: Graf závislosti stripping koeficientu α pro okno ^{210}Po na FWHM píku ^{214}Po naměřeného na řadě rovnovážných standardů PU1.

Regresní rovnice závislosti stripping koeficientu α pro okno ^{210}Po na FWHM píku ^{214}Po . Tato regrese stanovena na řadě rovnovážných standardů PU1 má parametry:

$$y = 0,003229x - 0,007716 \quad \text{s hodnotou spolehlivosti: } R^2 = 0,912035 \quad (10)$$

U vzorků v radioaktivní nerovnováze i pro vzorky v radioaktivní rovnováze nebo v mírné nerovnováze byla zkoumána možnost stanovení konstanty citlivosti pomocí FWHM píku ^{238}U . Protože na rozdíl od vzorků v rovnováze není radionuklid ^{214}Po přítomen nebo jeho množství neumožňuje stanovení FWHM a přesnější přiřazení konstanty citlivosti, byla tato možnost hledána jako alternativa.

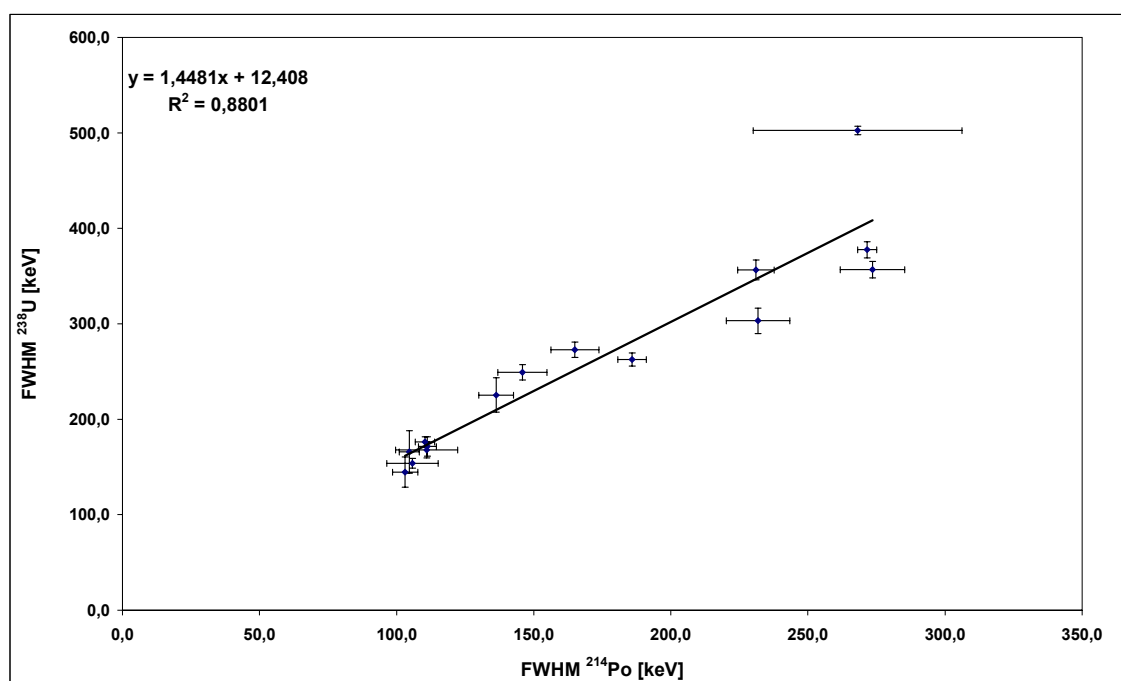
Zatímco emise alfa částic u píku ^{238}U probíhá ve dvou energetických hladinách 4198 keV (rel. intenzita 79%) a 4151 keV (rel. intenzita 20,9%), je emise alfa částice u nuklidu ^{214}Po monoenergetická 7686 keV (rel. intenzita 99,99%). Proto lze předpokládat, že pík ^{238}U bude mít FWHM poněkud vyšší.

Byl proveden výpočet FWHM ^{214}Po a ^{238}U na souboru 14-ti vzorků standardu PU1 a zkoumána možná závislost, která by umožnila její stanovení u radioaktivně nerovnovážných vzorků, kde je aktivita ^{214}Po velmi nízká.

Byly použity dvě metody výpočtu FWHM píku ^{238}U . Při první bylo jako báze píku bráno sedlo, kde na svah složeného píku nasazuje pík ^{238}U . Z tohoto nulového bodu je počítáno FWHM, které však nevystihuje plně skutečný charakter píku. Avšak poměr mezi FWHM ^{214}Po a ^{238}U neukázal v tomto případě průkaznou závislost.

Jako druhé metody bylo použito určení FWHM píku ^{238}U od nulové hladiny opět na stejném souboru rovnovážného standardu PU1. U vypočtených hodnot FWHM píků ^{238}U a ^{214}Po byla nalezena vzájemná závislost (obrázek 15).

Výsledky výpočtů byly uspokojivé a ověřily správnost postupu. Nyní bylo přistoupeno ke kvantifikaci spekter naměřených metodou nedestruktivní alfaspektrometrie. Na vzorky rovnovážné, či v blízkosti rovnováhy byl aplikován koeficient citlivosti určený na základě stanovení FWHM ^{214}Po . V případě nerovnovážných vzorků, kdy nebylo možné určit FWHM ^{214}Po bylo určeno FWHM ^{238}U (a citlivost pro okno ^{238}U na základě tohoto FWHM). Citlivost pro ostatní radionuklidy byla odvozena z FWHM ^{214}Po vyčísleného nepřímou za použití regresní rovnice (rovnice 11).



Obrázek 15: Graf závislosti FWHM ^{238}U na FWHM ^{214}Po . Naměřeno na sadě rovnovážných standardů PU1. FWHM píku ^{238}U bylo určováno od nulové hladiny. Chybové úsečky vyjadřují velikost 1 sigma.

Regresní rovnice závislosti FWHM ^{238}U na FWHM ^{214}Po . Tato regrese stanovená na řadě rovnovážných standardů PU1 má parametry:

$$y = 1,4481x + 12,408 \quad \text{s hodnotou spolehlivosti:} \quad R^2 = 0,8801 \quad (11)$$

4.5.2. Vliv emanace na vyhodnocení vzorků

U některých vzorků bylo z kvalitativního hodnocení patrné, že jsou ve zdánlivě nerovnováze, kdy ^{226}Ra bylo v rovnováze s U, ale další rozpadové produkty řady (^{222}Rn , ^{218}Po , ^{214}Po) se nacházely v nerovnovážném stavu. Je to způsobeno zvýšenou emencí vzorku. Při rozpadu ^{226}Ra vzniká ^{222}Rn , plyný prvek s krátkým poločasem rozpadu (3,82 dne), který, pokud je vzorek dostatečně porézní, uniká do prostoru a jeho dceřiné produkty vznikají mimo vzorek. Koeficient emanace je pak závislý na porozitě vzorku. Čím více je materiál porézní, tím více ^{222}Rn uniká mimo vzorek a tím je také větší tato zdánlivá nerovnováha.

Kritérium pro zjištění zda jde o vzorek ve stavu radioaktivní nerovnováhy či o zvýšený koeficient emanace je poměr mezi píkem ^{214}Po a píky dceřiných produktů řady ^{235}U (^{211}Bi , ^{215}Po , ^{219}Rn), který je při vizuálním hodnocení spekter patrný.

Byl proveden pokus vyjádřit možnou matematickou závislost, ale ta nebyla v tomto případě prokázána a výsledky byly hodnoceny jako nepoužitelné. Vysvětlením mohou být relativně nízké četnosti impulsů v energetických oknech rozpadových produktů řady ^{235}U .

Z tohoto důvodu nebyl dále koeficient emanace u vzorků kvantitativně hodnocen. Lze připustit, že v případě některých poréznějších vzorků může mít negativní vliv na stanovení ^{226}Ra na okně ^{214}Po .

Neurčitost stanovení

Při kvantifikaci výsledků nedestruktivní alfaspektrometrie se vyskytují neurčitosti dvou druhů. První z nich je neurčitost měření četnosti impulsů na energetickém okně. Tu lze vyjádřit jako odmocninu z počtu naměřených impulsů (známá jako counting error). Je závislá na aktivitě měřeného vzorku a na době měření. V našem případě se typicky pohybuje v rozmezí 1 % v případě vysokoaktivních minerálů (uraninit) až po 30 % v případě nejméně aktivních vzorků, kdy se již výrazně projevuje vliv pozadí detektoru.

Druhou neurčitostí, podstatně se projevující ve výsledných koncentracích je chyba vážení vzorku. Ta se pohybuje v rozmezí 0,4 až 20,4 %, nejčastěji však v rozmezí 3 – 5 %. Extrémním případem je preparát minerálu masuyitu, kde z důvodu malého množství vzorku byla navážka pouze 16 μg a vyčíslená neurčitost vážení pak dosáhla 77,4 %.

Při nízkých navážkách hodnota neurčitosti roste, spektra mají však vysoké rozlišení (nízké FWHM). V případě vysokých navážek je neurčitost vážení nízká, spektra jsou však vlivem degradovaných energií rozmytá, což znesnadňuje jejich vyhodnocení. Je tedy nutno mezi oběma faktory nalézt kompromis, který leží u navážek mezi 200 – 300 μg .

Pro stanovené výsledné neurčitosti měření je použit součet obou, přičemž vyšší je v obvyklých případech neurčitost vážení.

Tabulka 9: Rovnovážný standard PU1. V tabulce jsou uvedeny FWHM píků na ROI ^{238}U a ^{214}Po s neurčitostí stanovení [keV] a koeficient citlivosti (účinnost detekce).

STANDARD PU1					
vzorek	FWHM ^{214}Po [keV]	neurčitost FWHM [keV]	FWHM ^{238}U [keV]	neurčitost FWHM [keV]	koeficient citlivosti
HU1_S1	165,0	8,75	151,6	2,82	0,182
HU1_S2	145,9	8,90	153,36	5,71	0,214
HU1_S3	136,3	6,33	165,79	4,92	0,236
HU1_S4	185,9	5,18	173,77	5,83	0,140
HU1_S5	111,0	11,34	146,91	7,85	0,226
HU1_S6	105,7	9,32	146,01	6,24	0,198
HU1_S7	103,1	4,67	120,52	6,15	0,236
HU1_S8	111,2	3,25	141,41	4,38	0,189
HU1_S9	104,6	3,63	141,34	6,48	0,252
HU1_S10	110,3	3,49	161,17	41,62	0,203
HU1_S11	231,0	6,63	153,7	4,64	0,185
HU1_S12	268,1	38,09	170,55	5,07	0,129
HU1_S13	271,6	3,50	145,0	4,72	0,102
HU1_S14	273,5	11,70	158,67	3,33	0,076
průměr	165,9	8,91	152,13	7,84	0,183
směrodatná odchylka	65,2	---	13,28	---	0,051

4.5.3. Použité standardy

Aby mohlo být vyhodnocení provedeno s co nejvyšší přesností a správností, bylo nutné provést opakovaná měření standardů, výsledky pro ověření aplikovat na referenčních materiálech a poté provést výpočet aktivit a obsahů radionuklidů na souboru zkoumaných vzorků.

4.5.3.1. Standard PUI

Tento materiál byl vybrán za hlavní standard, který se nachází ve stavu radioaktivní rovnováhy. Bylo stanoveno FWHM ^{238}U a ^{214}Po a vypočítán koeficient citlivosti (účinnost detekce). U standardu PUI byl gama spektrometricky zjištěn také koeficient emanace, jehož hodnota je blízká nule:

$$K_{em} = -0,57 (\pm 1,01\% [2 \text{ sigma}])$$

4.5.3.2. Opakovaná měření vybraného vzorku standardu PUI

Pro zjištění přesnosti měření byl opakovaně proměřován vybraný vzorek standardu PUI. Poté byl proveden výpočet FWHM na oknech ^{238}U a ^{214}Po . Vypočtené FWHM pak bylo použito k výpočtu koncentrace uranu na okně ^{238}U . Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce 10. Grafické znázornění výsledků je uvedeno na obrázku 16.

Tabulka 10: Opakované měření standardu PUI (stejný disk). V tabulce je uvedeno FWHM píku ^{214}Po a neurčitost stanovení FWHM [keV], obsah uranu [%U], neurčitost stanovení obsahu uranu [%U], obsah ekvivalentu uranu [%eU] na okně ^{214}Po s neurčitostí stanovení [%eU]. Získaná data jsou zprůměrovaná a je u nich vypočtena směrodatná odchylka. Velikost neurčitosti je vyjádřena 1 sigma. Pro přepočtení koncentrací eU [%] na aktivitu [Bq/g] lze použít vztah: $A_{[Bq/g]} = eU[\%] * 123,5$

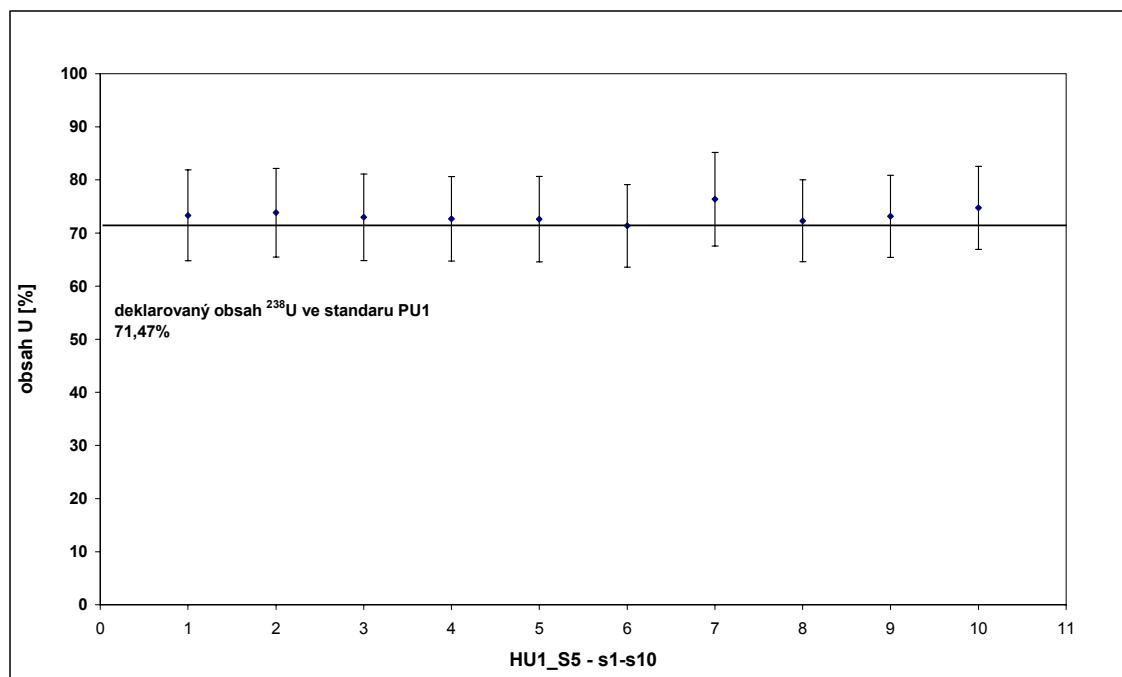
vzorek	FWHM ^{214}Po	neurčitost FWHM [%]	obsah U na okně ^{238}U [%]	sigma [%]	obsah eU na okně ^{214}Po [%]	sigma [%]
HU1S5_1	113,24	5,98	73,33	8,55	73,00	8,14
HU1S5_2	89,24	6,14	73,84	8,35	66,29	7,36
HU1S5_3	105,26	12,48	72,96	8,16	72,28	7,83
HU1S5_4	104,51	15,86	72,67	7,94	72,29	7,68
HU1S5_5	105,19	5,64	72,60	8,04	73,14	7,85
HU1S5_6	105,61	5,96	71,35	7,76	70,71	7,49
HU1S5_7	104,60	3,74	76,39	8,81	72,07	8,04
HU1S5_8	105,28	4,36	72,30	7,70	72,11	7,51
HU1S5_9	104,56	7,79	73,15	7,74	71,24	7,39
HU1S5_10	101,82	9,77	74,74	7,83	71,71	7,39
průměr	103,9	7,77	73,33	8,09	71,48	7,67
směrodatná odchylka	5,62	---	1,33	---	1,86	---

Tabulka 11: Standard $\text{UO}_{2,22}$. V tabulce jsou uvedeny FWHM píků na ROI ^{238}U s neurčitostmi stanovení a koeficient citlivosti (účinnost detekce) s neurčitostí stanovení. Velikost neurčitosti stanovení koeficientu citlivosti je 1 sigma.

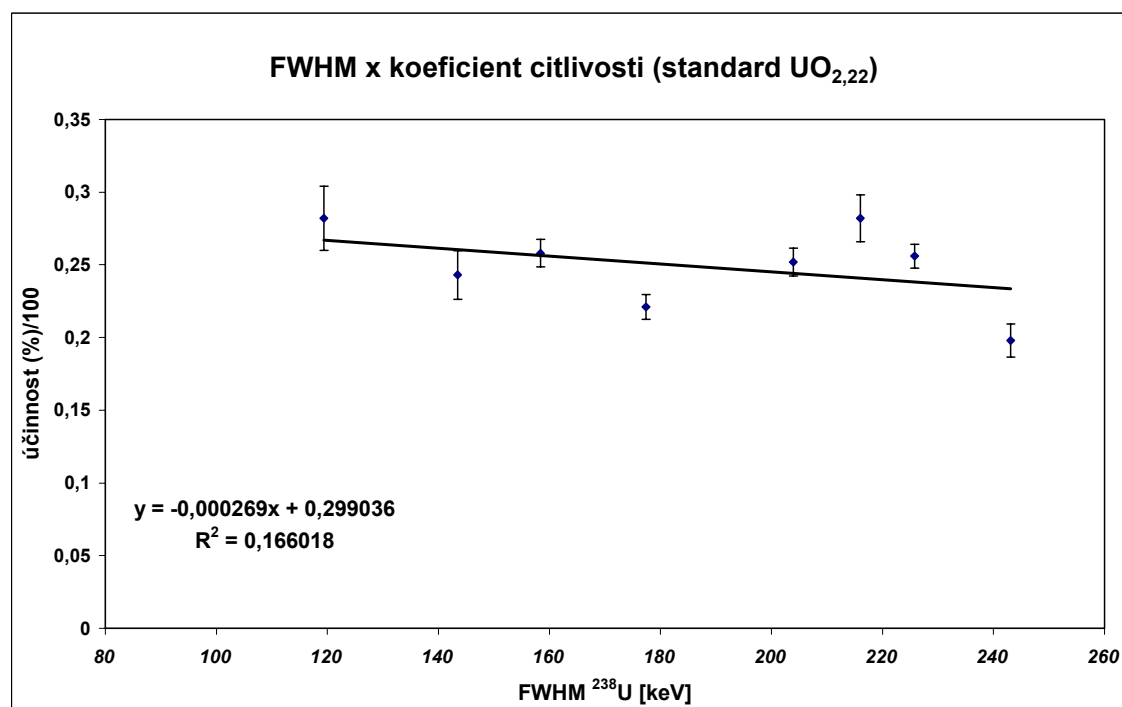
STANDARD $\text{UO}_{2,22}$				
vzorek	FWHM ^{238}U [keV]	neurčitost FWHM [keV]	koeficient citlivosti	sigma koeficientu citlivosti
$\text{UO}_{2,22}$ _S1	216,05	3,83	0,282	0,0108
$\text{UO}_{2,22}$ _S2	203,97	2,99	0,252	0,0075
$\text{UO}_{2,22}$ _S3	225,78	4,31	0,256	0,0110
$\text{UO}_{2,22}$ _S4	143,46	16,92	0,243	0,0411
$\text{UO}_{2,22}$ _S5	119,38	10,49	0,282	0,0296
$\text{UO}_{2,22}$ _S6	158,38	6,04	0,258	0,0156
$\text{UO}_{2,22}$ _S7	243,12	8,27	0,198	0,0164
$\text{UO}_{2,22}$ _S8	177,40	3,77	0,221	0,0083
průměr	185,94	7,08	0,25	0,02
směrodatná odchylka	40,55	---	0,03	---

4.5.3.3. Standard $UO_{2,22}$

Tento materiál byl vybrán za hlavní standard pro měření vzorků, které se nachází ve stavu radioaktivní nerovnováhy. U standardu bylo stanoveno FWHM ^{238}U a vypočítán koeficient citlivosti (účinnost detekce). Výpočty koeficientu citlivosti s chybou stanovení jsou uvedeny v tabulce 11.



Obrázek 16: Přehled naměřených koncentrací uranu opakovaného měření u standardu PU1 s deklarovaným obsahem uranu 71,47%. Měřeno na energetické linii ^{238}U . Velikost chybových úseček je jedna sigma.



Obrázek 17: Graf závislosti FWHM ^{238}U na účinnosti detekce (koeficient citlivosti) u nerovnovážného standardu $UO_{2,22}$.

Regresní rovnice závislosti FWHM ^{238}U na koeficientu citlivosti. Tato regrese stanovena na řadě nerovnovážných standardů $\text{UO}_{2,22}$ má parametry:

$$y = -0,000269x + 0,299036 \quad \text{s hodnotou spolehlivosti: } R^2 = 0,166018 \quad (12)$$

4.6. Destruktivní alfaspektrometrie

Tato metoda umožňuje přesnější stanovení aktivit některých specifických radionuklidů ve studovaných vzorcích, neboť způsob přípravy (separace pomocí specifického sorbentu, elektrodepozice) umožní na disku vytvořit tenkou homogenní vrstvičku se vzorkem, což významně snižuje FWHM (angl. Full Width at Half Maximum – šířka píku v polovině jeho výšky). Tím se velice usnadní stanovení oken ROI (angl. Region of Interest – oblast zájmu), neboť energetická spektra zkoumaných radionuklidů díky sníženým množstvím pulsů degradovaných energií nepřesahují vymezená okna a lze tedy dosáhnout přesnějších výsledků při statistickém vyhodnocení. Toto je nespornou výhodou této metody.

Další velkou výhodou této metody je, že při separaci dojde k odstranění interferujících radionuklidů, jejichž energetická spektra mohou zasahovat do vymezených oken (ROI), což může při statistickém vyhodnocení významně zvýšit chybu a tím zhoršit celkový výsledek.

Nevýhoda metody spočívá hlavně ve vysoké náročnosti při přípravě vzorků, která obnáší velké množství dílčích kroků chemického separačního postupu, je časově i materiálně náročná a vyžaduje vysokou přesnost práce.

Tabulka 12: Přehled vzorků pro destruktivní alfaspektrometrii a jejich ředění. V tabulce je zleva: označení vzorků, minerál, způsob chemického rozkladu, obsah uranu (u hodnot označených hvězdičkou jde o přibližnou koncentraci), navážka vzorku (u vzorku masuyitu a metaautunitu byl celý vzorek spotřebován pro nedestruktivní alfu, proto byl proveden pouze kyselinový oplach z disku po změření, u vzorků metatorbernit a zeuneritu bylo rozpuštěno pouze nevažitelné množství; u těchto vzorků byl obsah uranu odvozen z chemického vzorce minerálu), koncentrace uranu přepočtená na mg/l, aktivita Bq/ml a objem roztoku v ml o aktivitě 1 Bq. U vzorků s malou (neznámou) navážkou je v posledním sloupci uveden objem k separaci s dávkou vnitřního standardu 0,5 Bq, u vzorků označených ve sloupci navážka písmenem M byl dávkován vnitřní standard o aktivitě 0,25 Bq. Pro přepočet koncentrace uranu [mg/ml] na objemovou aktivitu [Bq/ml] lze použít vztah: $A_{[\text{Bq/ml}]} = U_{[\text{mg/ml}]} * 12,35$

vzorek	minerál	rozklad	obsah uranu [%]	navážka [mg]	koncentrace uranu [mg/l]	aktivita [Bq/ml]	množství s aktivitou 1 Bq [ml]	množství s aktivitou 0,5 Bq a méně [ml]
1J2_2	kasolit	HF+HClO4	33,97	1,138	15,46	0,191	5,24	-
2J2_3B	kasolit	HF+HClO4	32,19	6,433	102,93	1,271	0,787	-
1J2_5	widenmanit	HF+HClO4	25,94	20,82	216,0	2,668	0,375	-
J_6	metatorbernit	HNO3	*48	M	-	-	-	25,0
2J2_10A	kasolit	HF+HClO4	*40	1,892	30,27	0,374	2,675	-
1J1_1	metalodevit	HNO3	*45	0,192	3,46	0,0427	23,43	11,715
1J1_5	zeunerit	HNO3	*45	0,202	3,64	0,0449	22,27	11,135
1J1_7	zeunerit	HNO3	*45	M	-	-	-	25,0
2J5_1	metaautunit	HNO3	*48	M	-	-	-	25,0
1J3_1	masuyit	HNO3	*62	M	-	-	-	25,0

4.6.1. Výběr vzorků pro destruktivní alfaspektrometrii

Výběr vzorků pro měření metodou destruktivní alfaspektrometrie byl proveden na základě kvalitativního vyhodnocení výsledků nedestruktivní alfaspektrometrie (kap. 4.4.), která svou jednoduchostí a relativní nenáročností umožňuje rychlé posouzení obsahu celého souboru radionuklidů obsažených ve vzorku. Hlavními kritérii výběru byla přítomnost uranu a zároveň radiochemické nerovnováhy typu $\text{U} > \text{Ra}$, která dává předpoklad pro možnost určení stáří vzorku metodou $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$.

Na základě posouzení dle výše uvedených kritérií byl vybrán tento soubor vzorků:
**3x kasolit (1J2_2; 2J2_3B; 2J2_10A), 2x zeunerit (1J1_5; 1J1_7), lodevit (1J1_1),
widenmannit (1J2_5), metaautunit (2J5_1), masuyit (1J3_1) a metatorbernit (J_6)**

4.6.2. Příprava vzorků pro destruktivní alfaspektrometrii

Po výběru vhodných vzorků byl proveden jejich chemický rozklad. Podle chemismu vzorku byl proveden jeho rozklad buď pomocí HF + HClO₄ (silikátové minerály), nebo HNO₃ (oxidy, karbonáty, sulfáty, fosfáty, arsenáty). V dalším kroku byla v získaných roztocích metodou ICP-MS stanovena hmotnostní koncentrace uranu, aby bylo možno provést dávkování vnitřního standardu ²³²U/²²⁸Th. (tabulka 12). Po těchto krocích bylo přistoupeno k samotné přípravě vzorků pro měření destruktivní alfa spektrometrií.

Separace uranové a thoriové frakce byla prováděna pomocí chromatografického extrakčního činidla UTEVA[®] (firma Eichrom Technologies). Byla použita metodika separace U a Th podle Horwitz (1993), Maxwella (1998) a interní předpis SÚRO (Stanovení izotopů uranu ve spadech, metodika B). Uvedené analytické předpisy však pro svá specifika nevykazovaly parametry potřebné pro náš konkrétní případ, proto bylo přikročeno k jejich modifikaci, lépe vyhovující řešení daného úkolu.

V první sérii pokusů byly výsledky separace velice neuspokojivé. Podařilo se oddělit od sebe thoriovou i uranovou frakci, avšak získané frakce obsahovaly stále příměsi nežádoucích prvků (uranová frakce příměs thoria a naopak). V dalším kole pokusů byla provedena separace dílčích frakcí dle jednotlivých dávek promývacích činidel a u každé frakce zvlášť bylo změřeno alfaspektrum. Tímto bylo zjištěno, kdy přesně dochází k oddělení frakcí a tento přechod byl v dalších fázích pokusů eliminován (odpadní frakce). Po této úpravě bylo dosaženo o poznání lepších výsledků, avšak ještě ne zcela optimálních. V další sérii bylo přistoupeno ke změně koncentrací a objemů promývacích roztoků. V osmé sérii se povedlo získat čisté frakce již bez nežádoucích příměsí.

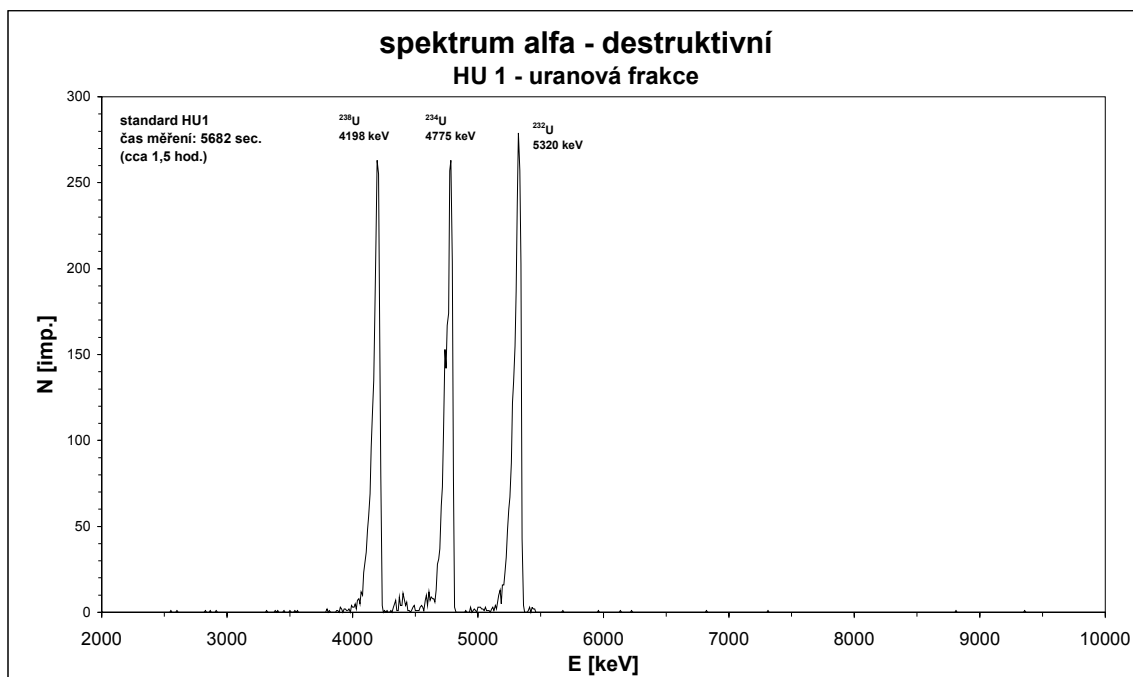
Nyní bylo možno přistoupit k provedení ověřovací série. Jako zkušební vzorek pro optimalizaci metody separace byl použit standard HU1 (Harwell uraninite, rovnovážný uraninit distribuovaný jako roztok v HNO₃) a vnitřní standard ²³²U/²²⁸Th. Aktivita vzorku HU1 byla dávkována 0,995 Bq/ml., vnitřní standard ²³²U pak dávkován na aktivitu 1 Bq/ml.

Výsledky ověřovací série potvrdily vhodnost úpravy postupu separace a ačkoliv docházelo ke slabým průnikům izotopů uranu do thoriové frakce bylo přesto přistoupeno k samotné aplikaci na výše uvedených vzorcích. Jako reparační krok byl malý podíl uranu z thoriové frakce matematicky odečten. Dalším krokem byl výpočet množství potřebného rozloženého vzorku pro samotnou separaci a měření. Vzorek pro separaci byl dávkován o přibližné aktivitě 1 Bq, aby tak jeho aktivita byla podobná s aktivitou vnitřního standardu. U vzorků slabě aktivních byl dávkován vnitřní standard o aktivitě 0,5 či 0,25 Bq (tabulka 12).

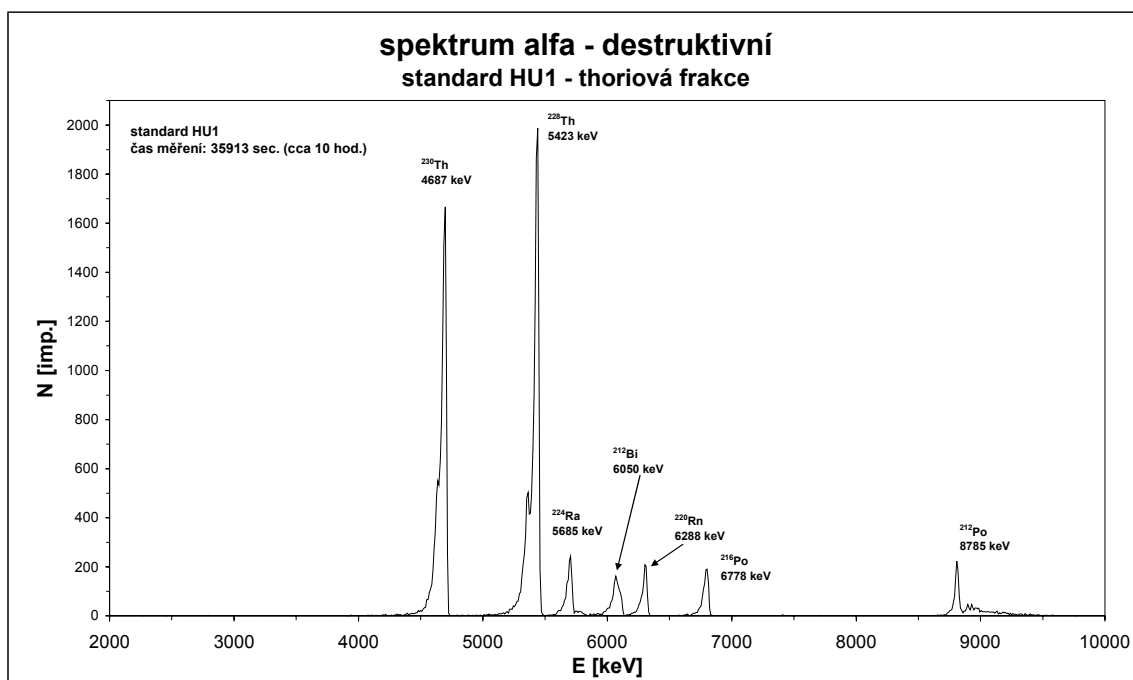
Po separaci byla provedena elektrodepozice získaných frakcí na nosiče. Při elektrolýze bylo použito rozdílného proudu pro každou frakci zvlášť z důvodu uspokojivých výtěžků. Pro frakci obsahující Thorium probíhala elektrodepozice při konstantním proudu 0,9 A po dobu 1 hod., pro uranovou frakci bylo použito konstantního proudu 0,6 A po dobu 1 hod. Tyto hodnoty byly stanoveny experimentálně při měření zkušební série standardu HU-1 (Harwell uraninite).

Pro elektrodepozici je důležitá hodnota proudu na jednotku plochy [A/cm²]. Pro uranovou frakci činí 0,22 A/cm², pro thoriovou frakci 0,34 A/cm². Tyto hodnoty byly získány vydělením exponované plochy disku (průměr aktivní plochy disku je 1,845 cm) při elektrodepozici proudem platným pro jednotlivé frakce.

Podrobný postup přípravy vzorků pro destruktivní alfaspektrometrii je uveden v příloze č.IV.



Obrázek 18: Separovaný standard HU1 ze zkušební série měřený metodou destruktivní alfaspektrometrie, uranová frakce. Energetické píky izotopů ^{238}U , ^{234}U a ^{232}U . Malý pík mezi izotopy ^{238}U a ^{234}U je energetické maximum izotopu ^{235}U .



Obrázek 19: Separovaný standard HU1 ze zkušební série měřený metodou destruktivní alfaspektrometrie, thoriová frakce. Energetické píky izotopů ^{230}Th a ^{228}Th . Ve spektru je možno vidět i energetická maxima krátkodobých rozpadových produktů ^{228}Th .

5. VÝSLEDKY STANOVENÍ AKTIVIT RADIONUKLIDŮ A STÁŘÍ VZORKŮ

5.1. Kvalitativní vyhodnocení výsledků nedestruktivní alfaspektrometrie

Kvalitativní vyhodnocení bylo provedeno vizuálním zhodnocením naměřených spekter, kdy byla provedena identifikace jednotlivých radionuklidů.

Tabulka 13: Kvalitativní vyhodnocení spekter získaných metodou nedestruktivní alfaspektrometrie. Slovní zhodnocení výsledků je uvedeno v textu (kap. 5.1.1)

VZOREK	minerál	přítomné radionuklidy a radioaktivní rovnováha	poznámka
1J1_1	lodevit	nerovnovážný U, Ra → 0	vybrán pro $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ datování
1J1_5	zeunerit	nerovnováha, U >> Ra	vybrán pro $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ datování
1J1_7	zeunerit	nerovnovážný U, Ra → 0	vybrán pro $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ datování
1J1_8	beudantit	$^{230}\text{Th} \gg ^{210}\text{Po} > ^{226}\text{Ra}$, uran není přítomen	
1J1_9	galenit	U=Ra? nelze přesně stanovit, nízký koeficient emanace	slabě aktivní vzorek
1J1_10	limonit	U=Ra, radioaktivní rovnováha, nízký koeficient emanace	
1J2_1B	goethit + kasolit	U=Ra, radioaktivní rovnováha, nízký koeficient emanace	
1J2_2	kasolit	U=Ra?, radioaktivní rovnováha?	vybrán pro $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ datování
1J2_5	widenmannit	U=Ra?, radioaktivní rovnováha?, vysoký koef. emanace	vybrán pro $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ datování
1J3_1	masuyit	nerovnováha?, U >> Ra ?	vybrán pro $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ datování
1J4_2	Mn-oxidy	Ra, U→0, zvýšený koeficient emanace	
1J5_1	pyromorfit	U=Ra, radioaktivní rovnováha	
1J5_2	pyromorfit	U=Ra, radioaktivní rovnováha, nízký koeficient emanace	
2J1_1	cerusit	U=Ra? nelze přesně stanovit	velice nízká aktivita vzorku
2J1_3	pyromorfit	U=Ra, radioaktivní rovnováha	
2J1_4	pyromorfit	U=Ra, zvýšené množství ^{210}Po ?	
2J1_5	Mn-oxidy	U=Ra, radioaktivní rovnováha	
2J2_1	widenmannit	nerovnovážný U >> ^{210}Po , Ra → 0	
2J2_2	anglesit	U=Ra, radioaktivní rovnováha	slabě aktivní vzorek
2J2_3B	kasolit	U=Ra, radioaktivní rovnováha	vybrán pro $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ datování
2J2_10A	kasolit	nerovnováha U > Ra?, vysoký koeficient emanace?	vybrán pro $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ datování
2J2_11	U-Pb oxid (amorfní)	nerovnovážný U, Ra → 0	
2J2_12	galenit	U=Ra? nelze přesně stanovit	velice nízká aktivita vzorku
2J2_13	cerusit	U=Ra? nelze přesně stanovit	velice nízká aktivita vzorku
2J4_1	kasolit	U=Ra, radioaktivní rovnováha	
2J5_1	metaautunit	nerovnovážný U, Ra → 0	vybrán pro $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ datování
2J5_3	Mn-oxidy	nerovnovážný U >> Ra, vysoký koeficient emanace?	
2J5_4	Mn-oxidy	Ra >> U, zvýšený koeficient emanace?	
2J5_5	uranové černě	U=Ra, radioaktivní rovnováha?, vysoký koef. emanace?	
2J5_6	jarosit	$^{227}\text{Th}, ^{223}\text{Ra}, ^{219}\text{Rn}, ^{215}\text{Po}$ a $^{211}\text{Bi} > ^{210}\text{Po} > ^{226}\text{Ra}$	mateřský nuklid: ^{227}Ac (není α zářič)
2J5_7	jarosit	$^{227}\text{Th}, ^{223}\text{Ra}, ^{219}\text{Rn}, ^{215}\text{Po}$ a $^{211}\text{Bi} > ^{210}\text{Po} = ^{226}\text{Ra}$	mateřský nuklid: ^{227}Ac (není α zářič)
2J5_8	uraninit	U=Ra, radioaktivní rovnováha	
2J5_9	Mn-oxidy	U=Ra, radioaktivní rovnováha	
2J5_10	uraninit	U=Ra, radioaktivní rovnováha	
8J1	uraninit	U=Ra, radioaktivní rovnováha	
J_6	metatorbernit	nerovnovážný U >> Ra	vybrán pro $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ datování
J_9	zinkzippeit	nerovnovážný U, Ra → 0	
J1	uraninit	U=Ra, radioaktivní rovnováha	

Z vyhodnocených spekter minerálů byl vybrán soubor vzorků vhodných pro další zpracování pomocí metody destruktivní alfaspektrometrie. Výsledky kvalitativního hodnocení spekter jsou uvedeny v tabulce 13.

5.1.1. Hodnocení spekter získaných metodou nedestruktivní alfaspektrometrie

Tato kapitola je věnována podrobnému vyhodnocení alfa spekter jednotlivých vzorků.

1J1_1 - lodevit - ve spektru jsou přítomny pouze energetické píky ^{238}U a ^{234}U (?), vizuálně prakticky nelze zjistit přítomnost ^{230}Th díky jeho podobné energii s izotopem ^{234}U . Obsah ^{226}Ra je blízký 0. Vzorek se nachází ve stavu radioaktivní nerovnováhy z čehož lze usuzovat na jeho nedávný vznik. Byl proto určen pro zpracování metodou destruktivní alfaspektrometrie a k datování metodou $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$.

1J1_5 – zeunerit – ve spektru dominují izotopy ^{238}U a ^{234}U . Je přítomno v malém množství ^{230}Th , lze tak soudit podle obsahu dceřiných izotopů této rozpadové řady. Obsah ^{226}Ra je nízký, ale ne blízký nule. Z vizuálního hodnocení lze usuzovat na vzorek nevelkého stáří. Tento vzorek je též vhodný pro datování metodou $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$.

1J1_7 – zeunerit – vykazuje podobné spektrum jako předchozí vzorek. Odebrán byl nedaleko vzorku předchozího. Dle nízkých aktivit rozpadových produktů (^{222}Rn , ^{218}Po , ^{214}Po a ^{210}Po) lze usuzovat na nízký obsah ^{226}Ra , který je nejspíše blízký nule. Vzorek byl taktéž vybrán jako vhodný pro datování $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$.

1J1_8 – beudantit – spektrum tohoto minerálu vykazuje úplnou nepřítomnost uranu. Je přítomno ^{230}Th , které však není v radioaktivní rovnováze se svými dceřinými produkty. Obsah ^{226}Ra je nízký, dokonce je nižší než obsah ^{210}Po . Z pozorované nerovnováhy lze usuzovat na nevelké stáří minerálu. Thorium bylo pravděpodobně minerálem sorbováno z okolí kde je k dispozici jako produkt rozkladu uraninitu.

1J1_9 – galenit – spektrum se jeví jako rovnovážné, avšak rovnováhu nelze vizuálně přímo určit kvůli velmi slabé aktivitě vzorku (spektrum má nezřetelné přechody mezi píky). U vzorku se vyskytuje vyšší podíl dceřiných izotopů rozpadové řady ^{235}U , což může být způsobeno slabě zvýšenou emanací vzorku.

1J1_10 – „limonit“ (HFO) – díky nízké aktivitě není možné vizuálně stanovit, zda se spektrum minerálu nachází v radioaktivní rovnováze. Také u tohoto vzorku je podíl dceřiných produktů rozpadové řady ^{235}U vyšší, což opět ukazuje na slabě zvýšenou emanaci.

1J2_1B – goethit + kasolit – spektrum ukazuje na radioaktivní rovnováhu $U=Ra$. I u tohoto vzorku se vyskytuje slabá emanace.

1J2_2 – kasolit - spektrum se jeví jako rovnovážné, ale z hlediska kvalitativního posouzení to nelze jednoznačně určit. Tento vzorek byl vybrán jako vhodný pro další zpracování metodou destruktivní alfaspektrometrie a k následnému datování metodou $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$.

1J2_5 – wiedenmannit – spektrum tohoto minerálu je možno označit za rovnovážné. Nižší podíl dceřiných produktů rozpadové řady ^{238}U a zvýšený poměr těchto produktů řady ^{238}U ku produktům řady ^{235}U ukazuje na poměrně vysoký koeficient emanace. Také tento vzorek se ukázal jako vhodný pro datování $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$.

1J3_1 – masuyit – z vizuálního hodnocení vyplývá značná radioaktivní nerovnováha, kdy množství ^{234}U značně převyšuje obsah ^{226}Ra . Nízké intenzity píků v energetických oknech dceřiných produktů rozpadu ^{235}U ukazují na koeficient emanace blízký nule. Tento vzorek je rovněž vhodný pro datování metodou $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$.

1J4_2 – Mn-oxidy – ve spektru je patrný téměř nulový obsah uranu. Vyšší obsah ^{226}Ra ukazuje na jeho možnou sekundární absorpci minerálem. Zvýšená aktivita izotopů rozpadové řady ^{235}U ukazuje na zvýšený koeficient emanace.

1J5_1 – pyromorfit – vzorek s nižší aktivitou. Z vizuálního posouzení spektra lze konstatovat, že radionuklidy obsažené v minerálu se nachází ve stavu radioaktivní rovnováhy.

1J5_2 – pyromorfit – spektrum vykazuje podobné parametry jako vzorek 1J5_1. Izotopy jsou v radioaktivní rovnováze, je zde nepatrně zvýšený koeficient emanace.

2J1_1 – cerusit – vzorek s velice nízkou aktivitou. Spektrum je velice nezřetelné a nelze vizuálním hodnocením zjistit přesné izotopické složení. Možná radioaktivní rovnováha (U=Ra)?

2J1_3 – pyromorfit – spektrum minerálu vykazuje radioaktivní rovnováhu. Díky nízké aktivitě byla doba měření prodloužena na 122 hodin.

2J1_4 – pyromorfit – z vizuálního hodnocení vyplývá zvýšený obsah ^{210}Po . Uran s rádiem jsou spolu v rovnováze. Díky nízké aktivitě vzorku je spektrum málo zřetelné. Doba měření byla 156 hodin.

2J1_5 – Mn-oxidy – vzorek s nízkou aktivitou, uran s rádiem jsou v radioaktivní rovnováze.

2J2_1 – widemannit – spektrum ukazuje na nevelké stáří vzorku. Uran výrazně převládá nad ^{210}Po . Obsah ^{226}Ra je blízký nule. Vzorek je ve stavu výrazné radioaktivní nerovnováhy.

2J2_2 – anglesit – vzorek je velmi málo aktivní. Spektrum lze hodnotit jako rovnovážné, možná je slabě zvýšená emanace.

2J2_3B – kasolit – ze spektra je možno usoudit, že vzorek se nachází ve stavu radioaktivní rovnováhy. Tento minerál byl vybrán pro další zpracování metodou destruktivní alfaspektrometrie a k datování metodou $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$.

2J2_10A – kasolit – ze spektra je patrná radioaktivní nerovnováha, kdy aktivita ^{226}Ra je zřetelně nižší než aktivita ^{238}U . Avšak ostatní dceřiné izotopy jsou s rádiem v rovnováze. Zvýšená aktivita dceřiných izotopů rozpadové řady ^{235}U ukazuje na možný zvýšený koeficient emanace u vzorku. Tento minerál byl vybrán pro destruktivní alfaspektrometrii a pro datování metodou $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$.

2J2_11 – U-Pb oxid (amorfní) – vzorek se nachází ve výrazné rovnováze. Nerovnováha je patrná i u uranu. Izotop ^{238}U převyšuje ^{234}U . Aktivita rádia je téměř nulová. Z nerovnováhy lze usuzovat na nevelké stáří vzorku.

2J2_12 – galenit – vzorek s velice nízkou aktivitou, který nelze úplně přesně vyhodnotit. Spektrum je značně nezřetelné. Předpokládá se rovnováha U=Ra.

2J2_13 – cerusit – spektrum je podobné jako u předcházejícího vzorku. Lze předpokládat radioaktivní rovnováhu U=Ra.

2J4_1 – kasolit – spektrum ukazuje, že izotopy obsažené ve vzorku se nachází ve stavu radioaktivní rovnováhy.

2J5_1 – metaautunit – z vizuálního posouzení spektra vyplývá nerovnováha mezi ^{238}U a ^{234}U . Obsah ^{226}Ra je blízký nule. Tato nerovnováha ukazuje na nevelké stáří minerálu. Tento vzorek se ukázal být vhodný pro další zpracování metodou destruktivní alfaspektrometrie a následně pro datování metodou $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$.

2J5_3 – Mn-oxidy – ze spektra je patrná nerovnováha mezi uranem a rádiem, jehož aktivita je zřetelně nižší. Značně zvýšené aktivity dceřiných produktů po rozpadu ^{235}U ukazují na vysoký koeficient emanace, kdy izotop ^{222}Rn vznikající rozpadem ^{226}Ra uniká z minerálu a rozpadá se mimo něj. Aktivity dceřiných izotopů ^{222}Rn jsou pak sniženy o uniklý radon a podíl aktivit produktů rozpadu ^{235}U roste.

2J5_4 – Mn-oxidy – obsah ^{226}Ra značně převyšuje obsah uranu. Vzorek nevykazuje úplnou radioaktivní rovnováhu. Je pravděpodobný zvýšený koeficient emanace. S jistotou to však, z důvodu nízké aktivity vzorku, nelze konstatovat.

2J5_5 – uranové černě – z hodnocení spektra vzorku vyplývá radioaktivní rovnováha. Je patrný vyšší podíl rozpadových produktů po izotopu ^{235}U , což ukazuje na zvýšený koeficient emanace.

2J5_6 – jarosit – ze spektra vyplývá velice neobvyklá asociace radionuklidů. energetický pík uranu není vůbec přítomen, aktivit dceřiných rozpadových produktů řady ^{235}U převládají nad ^{210}Po a ^{226}Ra . Mateřským radionuklidem v případě dceřiných produktů řady ^{235}U však není uran, ale izotop ^{227}Ac , jež se ve spektru nevyskytuje, protože se rozpadá přeměnou β . Blíže v kapitole 5.4.

2J5_7 – jarosit – spektrum vykazuje podobné parametry jako předchozí vzorek, podrobnější charakteristika je podána v kap. 5.4.

2J5_8 – uraninit – zhodnocením spektra byla zjištěna u tohoto vzorku radioaktivní rovnováha.

2J5_9 – Mn-oxidy – ze spektra vyplývá, že vzorek se nachází ve stavu radioaktivní rovnováhy.

2J5_10 – uraninit – minerál se nachází ve stavu radioaktivní rovnováhy.

8J1 – uraninit – spektrum vzorku ukazuje, že radionuklidy v něm obsažené jsou spolu v radioaktivní rovnováze.

J_6 – metatorbernit – spektrum vzorku prokázalo značně převažující uran nad rádiem. To ukazuje, že minerál je relativně nevelkého stáří. Tento vzorek se ukázal být vhodný pro další zpracování metodou destruktivní alfaspektrometrie a pro datování metodou $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$.

J_9 – zinkzippeit – ve vzorku jsou přítomny pouze energetické píky uranu. Obsah ^{226}Ra je blízký nule. Z vizuálního posouzení spektra lze usuzovat na nevelké stáří minerální fáze.

J1 – uraninit – vyhodnocení spektra ukázalo, že radionuklidy obsažené ve vzorku minerálu jsou ve vzájemné radioaktivní rovnováze.

5.2. Kvantitativní vyhodnocení výsledků nedestruktivní alfaspektrometrie

Pro přehlednější vyhodnocení naměřených spekter bylo u souboru vzorků provedeno rozdělení do skupin podle různých kritérií, např. dle vyšší aktivity (uraninit), mineralogického složení (kasolit), vzorků s nízkou aktivitou (cerusit, pyromorfít), radioaktivně nerovnovážné vzorky (metatorbernit, zinkzippeit, metaautunit, atd.), vzorky se zvláštní izotopickou asociací (jarosit, beudantit) apod.

Vzorky v rovnováze s vyšší aktivitou:

Do této skupiny byl zařazen *uraninit*. Soubor čtyř měřených vzorků uraninitu vykazuje velice podobné vlastnosti. Obsah uranu se pohybuje okolo 80 % a poměr $^{238}\text{U}/^{226}\text{Ra}$ je blízký 1 stejně jako poměr $^{226}\text{Ra}/^{210}\text{Po}$, což ukazuje na ustálenou radioaktivní rovnováhu.

Kasolit:

Kasolit: Byl měřen na souboru 4 vzorků (3 vzorky z 2. patra, 1 vzorek z 1. patra). Koncentrace uranu se pohybují v rozmezí 40 – 74,5%. Radioaktivní rovnováha je takřka ustálená. Poměry $^{238}\text{U}/^{226}\text{Ra}$ jsou mírně vyšší ve prospěch uranu, vzorky tedy obsahují méně rádia. Dva z těchto vzorků (2J2_10A, 2J2_3B) byly vybrány pro další zpracování metodou destruktivní alfaspektrometrie a datování $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$.

Vzorky s nízkou aktivitou:

Do této skupiny byly zařazeny vzorky s obsahem uranu pod 5 %.

Galenit: Dva níže aktivní vzorky s obsahem uranu pod 0,2 %. V poměru $^{238}\text{U}/^{226}\text{Ra}$ vykazují nižší obsah rádia, v poměru $^{226}\text{Ra}/^{210}\text{Po}$ je méně polonia.

Pyromorfít: Koncentrace uranu se pohybuje v rozmezí 0,39 – 2,37 %, přičemž méně aktivní jsou vzorky odebrané na prvním patře (0,39 – 0,48%). U vzorků z druhého patra se koncentrace uranu pohybuje v rozmezí 1,78 - 2,37 %. Poměr U/Ra je nižší v neprospěch rádia. Poměr Po/Ra se blíží 1.

Cerusit: Velice níže aktivní vzorky s obsahem uranu 0,035 – 0,24 %. Oba vzorky vykazují nižší obsah rádia v poměru U/Ra téměř shodně 1:10. Poměr Po/Ra je v neprospěch rádia.

Anglesit: Koncentrace uranu je 1,78 %, obsah rádia v poměru k uranu je nižší, což ukazuje na mírnou nerovnováhu. Poměr Po/Ra je v neprospěch rádia.

Mn-oxidy: Bylo měřeno 5 vzorků, jeden vzorek ze souboru byl odebrán na 1. patře, ostatní pochází z 2. patra. Koncentrace uranu se pohybují v rozmezí 0,2 – 1,79 %. Poměry U/Ra u různých vzorků silně kolísají. Např. vzorek 2J5_4 má významněji zvýšený podíl rádia oproti uranu, naopak u vzorku 1J4_2 (1.patro) převažuje významně uran. Posledně jmenovaný vzorek má i významně zvýšený obsah polonia a poměr Po/Ra. Obecně lze konstatovat, že vzorky Mn-oxidů vykazují výrazně variabilní výsledky.

„Limonit“ (HFO): Vzorek v mírné radioaktivní nerovnováze s koncentrací uranu 1,01 %. Poměr Ra/U je přibližně 1:2, poměr Po/Ra je téměř 1:1.

Sekundární minerály:

Lodevit (metalodevit): Mladá fáze ve výrazné radioaktivní nerovnováze (velmi nízký obsah ^{226}Ra) s koncentrací uranu 36,27 %. Poměr Po/Ra je pro rádiu příznivější. Tento minerál byl dále zpracován při destruktivní alfaspektrometrii a datován metodou $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$.

Zeunerit: Sekundární fáze s naměřenou koncentrací 30,98 – 35,21 % uranu ve výrazné radioaktivní nerovnováze. Poměr U/Ra je výrazněji v neprospěch rádia, u obou zkoumaných vzorků v podobném poměru, což ukazuje na jejich nevelké stáří. Oba vzorky byly dále zpracovány destruktivní alfa spektrometrií a datovány metodou $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$.

Widenmannit: U tohoto minerálu byla naměřena koncentrace uranu v rozmezí 22,25 – 32,46 %. Metodou nedestruktivní alfaspektrometrie byly měřeny dva vzorky odebrané na 1. a 2. patře. Widenmannit z 2. patra je výrazněji nerovnovážený než vzorek z 1. patra, což je patrné z poměru U/Ra, ve kterém značně převládá uran. Obdobná nerovnováha u tohoto vzorku je patrná i na grafu poměru Po/Ra. Vzorek widenmannitu z 1. patra (1J2_5) byl taktéž vybrán pro datování metodou $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$.

Goethit + kasolít (reziduum po uraninitu): U tohoto vzorku mírně převažuje uran nad rádiem, poměr polonia k rádiu se blíží jedné. Koncentrace uranu je 8,08 %.

Metatorbernit: mladá fáze ve stavu radioaktivní nerovnováhy s výrazným nepoměrem U/Ra. Naměřená koncentrace uranu je 32,86 %. Tento vzorek byl dále zpracován metodou destruktivní alfaspektrometrie a datován pomocí $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$.

U-Pb oxid (amorf): Tato velice mladá fáze vykazuje největší zjištěný nepoměr mezi uranem a rádiem, který se blíží hodnotě 1:1000 v neprospěch rádia. To vede k úvaze, že tato sekundární fáze je recentního stáří. Naměřená koncentrace uranu je 37,99 %.

Zinkzippit: Sekundární fáze ve stavu radioaktivní nerovnováhy s převládajícím uranem nad rádiem v poměru větším než 1:100 v neprospěch rádia. Takto malý obsah rádia značí velice nízké stáří vzorku. Větší je také nepoměr mezi $^{226}\text{Ra}/^{210}\text{Po}$, což může být způsobeno zvýšeným koeficientem emanace. Koncentrace uranu naměřená nedestruktivně je 17,3 %.

Beudantit: U tohoto minerálu nebyla spektrometricky prokázána přítomnost uranu, ale ^{230}Th jako mateřského nuklidu. Podrobnější výsledky jsou uvedeny v kap. 5.4.

Masuyit: Dle získaných výsledků se tento minerál nachází ve stavu radioaktivní nerovnováhy s minoritním obsahem ^{226}Ra , kdy se poměr k uranu blíží hodnotě 1:20. Nižší obsah rádia je patrný i v poměru Po/Ra. Koncentrace uranu u tohoto vzorku dosahuje hodnoty 14,49 %, je však zatížena velkou chybou v důsledku nízké navážky (nedostatek vzorku). U tohoto minerálu bylo provedeno datování metodou $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$.

Metaautunit: U tohoto vzorku je patrná značná radioaktivní nerovnováha, kdy obsah uranu je výrazně vyšší než obsah rádia.

Jarosit: U tohoto minerálu byla zjištěna neobvyklá asociace radionuklidů. Při vyhodnocení vzorků bylo zjištěno, že neobsahují žádný uran. Jako mateřský nuklid lze vzít v úvahu ^{227}Ac , který se však ve spektru nevyskytuje, protože není alfa zářič nebo ^{227}Th vznikající β rozpadem z ^{227}Ac . Další zvláštností je zvýšená koncentrace produktů rozpadové řady ^{235}U . Jeden vzorek byl měřen opět po měsíci a jeho spektrum porovnáno s původním. Aktivita ^{214}Po zůstala přibližně stejná, ale snížil se poměr $^{214}\text{Po}/^{215}\text{Po}$. Podrobnější analýza je provedena v kap. 5.4.

Uranové černě: Amorfni fáze s koncentrací uranu 6,29 % s mírným nepoměrem U/Ra v neprospěch rádia, polonium nad rádiem mírně převažuje. Vzorek lze označit jako rovnovážný.

Interpretace dat:

V tabulce výsledků nedestruktivní alfaspektrometrie jsou vyjádřeny koncentrace uranu nebo ekvivalentu uranu v procentech (U [%], eU [%]), ve grafech poměrů U/Ra a Po/Ra jsou uvedeny aktivity [Bq g^{-1}]. Pro přepočítání hodnot je nutno použít přepočtu dle vztahu vycházejícího ze známé specifické aktivity uranu:

$$Q_U = \frac{A_m}{123,5} \quad (13)$$

A_m [Bq g⁻¹] hmotnostní aktivita vyjádřená v Bq g⁻¹
 Q_U [%] koncentrace uranu v %

Tabulka 14: Kvantifikace výsledků nedestruktivní alfaspektrometrie. Za názvem minerálu jsou uvedeny: navážka s absolutní neurčitostí vážení [mg], FWHM píků ²¹⁴Po a ²³⁸U s vyjádřenou neurčitostí [keV], a koncentrace uranu či ekvivalentu uranu [%] na knech ²³⁸U, ²¹⁰Po a ²¹⁴Po s neurčitostí stanovení 1 sigma [%U, %eU]. Pro přepočet koncentrací eU [%] na aktivitu [Bq/g] lze použít vztah: $A_{[Bq/g]} = eU[\%] * 123,5$

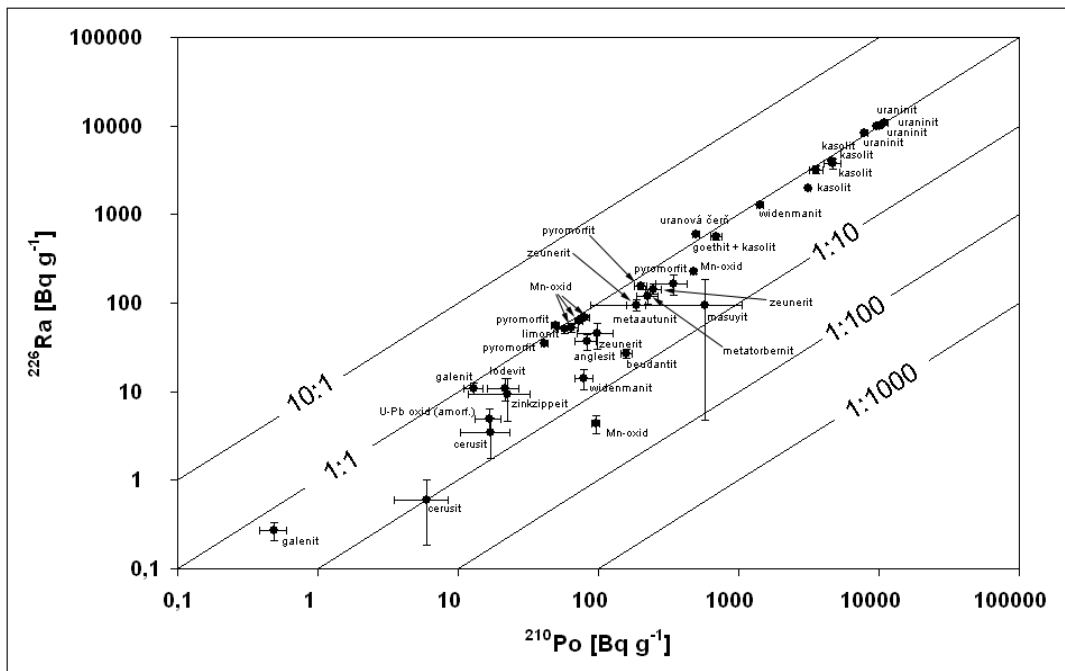
VZOREK	minerál	navážka [mg]	neurčitost navážky [mg]	FWHM ²¹⁴ Po	neurčitost (FWHM)	FWHM ²³⁸ U	neurčitost (FWHM)	koncentrace ²³⁸ U [%U]	sigma [%U]	koncentrace ²¹⁰ Po [%eU]	sigma [%U]	koncentrace ²²⁶ Ra na okně ²¹⁴ Po [%eU]	sigma [%U]
1J1_1	lodevit	0,208	0,0098	n.a.	n.a.	229,4	5,4	36,27	1,98	0,13	0,03	0,07	0,02
1J1_5	zeunerit	0,140	0,0098	91,0	8,9	n.a.	n.a.	35,21	2,82	2,00	0,25	1,17	0,15
1J1_7	zeunerit	0,068	0,0098	n.a.	n.a.	193,5	8,8	30,98	4,89	0,65	0,19	0,30	0,10
1J2_2	kasolit	0,164	0,0150	108,8	3,9	n.a.	n.a.	40,83	4,18	28,99	3,09	25,85	2,65
2J2_3B	kasolit	0,290	0,0129	201,4	10,8	n.a.	n.a.	40,68	2,30	37,46	2,15	32,44	1,74
2J2_10A	kasolit	0,376	0,0049	245,4	7,4	n.a.	n.a.	74,50	1,65	25,49	0,79	16,09	0,45
2J4_1	kasolit	0,116	0,0138	184,3	8,0	n.a.	n.a.	46,95	6,32	38,15	5,25	30,43	4,04
2J2_1	widenmannit	0,194	0,0112	n.a.	n.a.	206,8	17,4	22,25	1,49	0,51	0,07	0,09	0,02
1J2_5	widenmannit	0,200	0,0098	84,7	11,2	n.a.	n.a.	32,46	1,76	11,54	0,70	10,35	0,59
1J1_8	beudantit	0,142	0,0089	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	<0,01	n.a.	1,53	0,14	0,25	0,03
1J1_9	galenit	0,156	0,0049	76,1	8,2	n.a.	n.a.	0,20	0,02	0,10	0,02	0,09	0,01
2J2_12	galenit	2,304	0,0089	200*	n.a.	n.a.	n.a.	0,00665	0,00105	0,00398	0,00087	0,00218	0,00049
1J2_1B	reziduum po uraninitu	0,174	0,0089	115,7	32,9	n.a.	n.a.	8,08	0,65	5,60	0,51	4,50	0,37
1J3_1	masuyit	0,016	0,0124	n.a.	n.a.	245,2	25,5	14,49	11,60	3,43	2,90	0,57	0,54
2J2_11	amorfni U-Pb oxidy	0,506	0,0080	n.a.	n.a.	290,9	11,9	37,99	0,80	0,09	0,02	0,03	0,01
J_6	metatorbernit	0,098	0,0089	n.a.	n.a.	219,0	17,0	32,86	3,36	1,42	0,25	0,75	0,14
J_9	zinkzippeit	0,026	0,0049	n.a.	n.a.	64,9	11,8	17,30	3,58	0,17	0,08	0,07	0,04
2J5_1	metaautunit	0,154	0,0112	n.a.	n.a.	173,5	6,0	34,03	2,81	1,26	0,19	0,64	0,10
1J5_1	pyromorfit	0,536	0,0049	178,7	33,2	n.a.	n.a.	0,48	0,03	0,40	0,03	0,45	0,02
1J5_2	pyromorfit	0,642	0,0098	198,5	5,5	n.a.	n.a.	0,39	0,02	0,34	0,02	0,29	0,01
2J1_3	pyromorfit	0,140	0,0098	152,4	20,6	n.a.	n.a.	2,37	0,22	1,62	0,17	1,26	0,12
2J1_4	pyromorfit	0,048	0,0098	181,2	9,4	n.a.	n.a.	2,34	0,58	2,77	0,68	1,33	0,33
2J2_2	anglesit	0,156	0,0143	114,3	16,1	n.a.	n.a.	1,78	0,24	0,67	0,12	0,30	0,06
1J1_10	limonit	0,240	0,0098	111,0	12,3	n.a.	n.a.	1,01	0,09	0,52	0,06	0,43	0,05
2J2_13	cerusit	0,046	0,0089	75,9	29,8	n.a.	n.a.	0,24	0,08	0,14	0,05	0,03	0,01
2J1_1	cerusit	0,098	0,0138	200*	n.a.	n.a.	n.a.	0,0357	0,0182	0,0484	0,0201	0,00478	0,00328
1J4_2	Mn-oxidy	0,268	0,0040	127,2	10,3	n.a.	n.a.	1,62	0,11	3,87	0,18	1,84	0,09
2J1_5	Mn-oxidy	0,154	0,0089	104,4	8,8	n.a.	n.a.	0,81	0,07	0,47	0,05	0,41	0,04
2J5_3	Mn-oxidy	0,624	0,0089	n.a.	n.a.	360,6	8,6	1,79	0,05	0,38	0,02	0,02	0,00
2J5_4	Mn-oxidy	0,520	0,0098	213,0	13,9	n.a.	n.a.	0,20	0,03	0,65	0,05	0,55	0,03
2J5_9	Mn-oxidy	0,348	0,0089	176,8	13,8	n.a.	n.a.	0,50	0,03	0,59	0,04	0,50	0,03
2J5_6	jarosit	0,460	0,0098	71,4	11,7	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0,22	0,01
2J5_6(2)	jarosit	0,460	0,0098	51,4	12,0	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0,24	0,02
2J5_7	jarosit	0,688	0,0089	119,4	20,9	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0,16	0,01
2J5_5	uranové černě	0,508	0,0098	272,2	9,0	n.a.	n.a.	6,29	0,27	4,03	0,21	4,79	0,17
2J5_10	uraninit	0,212	0,0098	174,6	5,6	n.a.	n.a.	91,11	4,89	63,48	3,56	66,76	3,49
2J5_8	uraninit	0,296	0,0089	207,0	3,0	n.a.	n.a.	79,80	3,30	77,37	3,22	80,79	3,09
8J1	uraninit	0,372	0,0089	206,7	4,6	n.a.	n.a.	79,41	2,58	83,44	2,70	83,14	2,43
J1	uraninit	0,222	0,0089	152,7	11,1	n.a.	n.a.	82,76	4,60	88,21	4,94	87,67	4,41

Tabulka 15: Hmotnostní aktivity souboru vzorků analyzovaných pomocí metody nedestruktivní alfaspektrometrie. Ve třetím sloupci je vyjádřena celková hmotnostní aktivita [mBq/mg] s neurčitostí stanovení v [mBq/mg] a [%], v dalších sloupcích pak aktivita v jednotlivě vymezených energetických oknech (ROI) charakteristických pro uvedený izotop

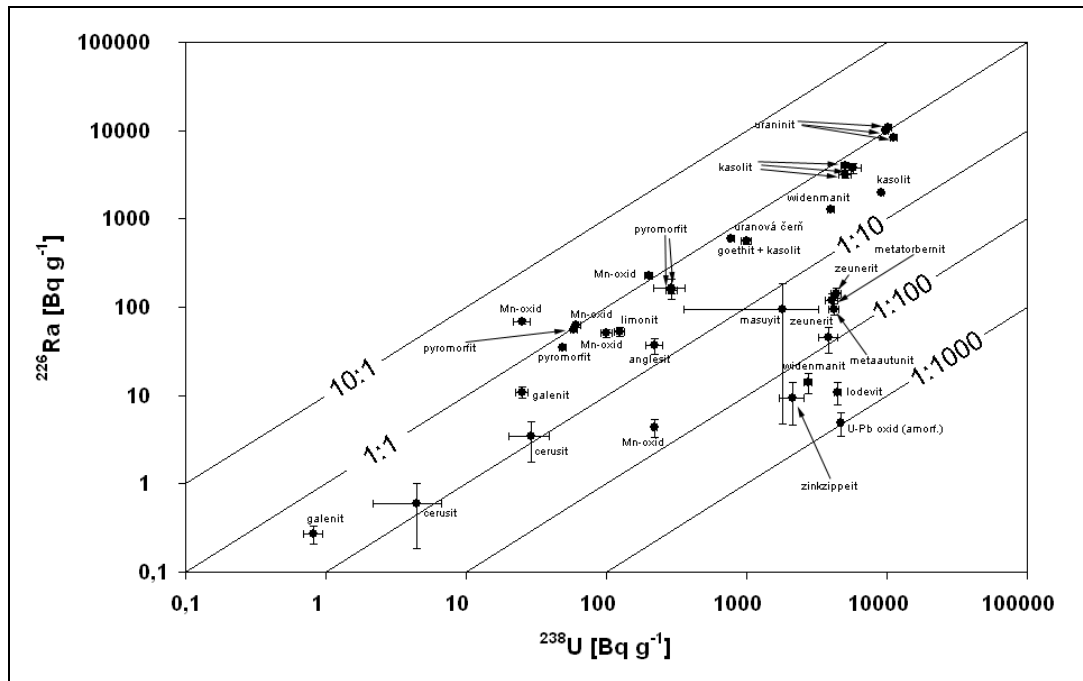
VZOREK	h mot. aktivita [mBq/mg]	ROI (2-10 Mev)	ROI 1	ROI 2	ROI 3	ROI 4	ROI 5
	izotop	celk. alfa akt.	²³⁸ U	²¹⁰ Po	²²² Rn + ²¹⁸ Po + ²¹⁴ Po	²¹⁸ Po	²¹⁴ Po
1J2_2	h mot. aktivita [mBq/mg]	24 173,5	5042,9	3580,3	3193,7	3127,8	3193,0
kasolit	chyba [%]	13,4	10,2	10,7	9,8	10,1	10,3
	chyba [mBq/mg]	3244,4	516,5	381,9	313,2	315,9	327,5
2J4_1	h mot. aktivita [mBq/mg]	29 357,6	5798,9	4711,5	4149,0	3348,5	3758,7
kasolit	chyba [%]	16,2	13,5	13,8	12,7	13,0	13,3
	chyba [mBq/mg]	4756,1	781,0	648,3	527,0	435,6	498,5
2J2_3b	h mot. aktivita [mBq/mg]	27 451,5	5024,2	4626,9	4481,1	3236,2	4006,7
kasolit	chyba [%]	8,6	5,7	5,7	5,0	5,2	5,3
	chyba [mBq/mg]	2373,1	284,2	265,8	223,3	167,9	214,3
2J2_2	h mot. aktivita [mBq/mg]	601,6	219,6	82,5	34,3	32,1	36,9
anglesit	chyba [%]	14,9	13,8	17,6	15,9	17,8	20,0
	chyba [mBq/mg]	89,6	30,2	14,5	5,5	5,7	7,4
1J3_1b	h mot. aktivita [mBq/mg]	4 558,4	1789,1	576,6	155,5	95,8	95,4
masuyit	chyba [%]	82,7	80,1	84,7	84,6	86,9	95,0
	chyba [mBq/mg]	3768,3	1432,7	488,2	131,4	83,2	90,5
J1	h mot. aktivita [mBq/mg]	61 587,2	10221,4	10893,5	11192,7	9057,6	10827,1
uraninit	chyba [%]	8,3	5,6	5,6	4,6	4,9	5,0
	chyba [mBq/mg]	5105,0	568,3	610,0	517,3	445,4	545,2
8J1	h mot. aktivita [mBq/mg]	60 251,3	9806,7	10304,3	11305,5	7666,8	10267,3
uraninit	chyba [%]	6,5	3,3	3,2	2,7	2,8	2,9
	chyba [mBq/mg]	3920,8	319,0	333,9	306,3	218,0	299,7
2J5_1	h mot. aktivita [mBq/mg]	8 654,5	4202,8	187,8	108,2	97,5	95,5
metaautunit	chyba [%]	11,8	8,3	14,9	11,7	13,2	15,7
	chyba [mBq/mg]	1020,8	346,8	28,0	12,6	12,8	15,0
J_6	h mot. aktivita [mBq/mg]	8 784,7	4058,2	226,5	184,9	170,5	119,5
metatorbemit	chyba [%]	13,7	10,2	17,7	13,3	14,0	18,3
	chyba [mBq/mg]	1200,0	414,8	40,2	24,5	23,9	21,8
1J1_1	h mot. aktivita [mBq/mg]	8 207,0	4479,5	21,5	12,0	6,4	10,9
lodovit	chyba [%]	9,1	5,5	24,9	16,5	22,4	28,5
	chyba [mBq/mg]	748,5	244,8	5,3	2,0	1,4	3,1
1J1_7	h mot. aktivita [mBq/mg]	8 566,4	3826,6	99,0	54,4	43,8	45,2
"zeunerit"	chyba [%]	19,1	15,8	28,7	24,7	25,9	32,4
	chyba [mBq/mg]	1636,7	603,7	28,4	13,4	11,3	14,7
1J1_5	h mot. aktivita [mBq/mg]	9 869,5	4348,7	247,3	141,7	147,0	144,2
"zeunerit"	chyba [%]	11,5	8,0	12,4	10,4	11,6	12,6
	chyba [mBq/mg]	1131,2	347,9	30,7	14,7	17,0	18,2
2J1_1	h mot. aktivita [mBq/mg]	35,1	4,4	6,0	0,3	3,0	0,6
cerusit	chyba [%]	23,3	51,2	41,5	47,0	34,5	68,5
	chyba [mBq/mg]	8,2	2,3	2,5	0,2	1,1	0,4
1J2_5	h mot. aktivita [mBq/mg]	16 078,9	4009,0	1425,4	1317,8	1463,8	1277,7
widenmannit	chyba [%]	9,1	5,4	6,0	5,4	5,6	5,7
	chyba [mBq/mg]	1455,5	217,2	86,0	71,0	81,6	73,3
2J2_1	h mot. aktivita [mBq/mg]	5 093,7	2748,4	79,4	18,9	13,9	14,1
widenmannit	chyba [%]	10,3	6,7	14,1	14,3	17,4	24,9
	chyba [mBq/mg]	523,7	184,0	11,2	2,7	2,4	3,5
2j1_5	h mot. aktivita [mBq/mg]	488,5	100,0	58,1	49,2	53,2	51,0
Mn-oxidy	chyba [%]	10,6	9,2	11,0	8,3	8,7	9,9
	chyba [mBq/mg]	51,8	9,2	6,4	4,1	4,6	5,0

VZOREK	h mot. aktivita [mBq/mg]	ROI (2-10 Mev)	ROI 1	ROI 2	ROI 3	ROI 4	ROI 5
	izotop	celk. alfa akt.	²³⁸ U	²¹⁰ Po	²²² Rn + ²¹⁸ Po + ²¹⁴ Po	²¹⁸ Po	²¹⁴ Po
1J2_1B	h mot. aktivita [mBq/mg]	4528,2	998,2	691,0	541,4	522,3	555,5
reziduum	chyba [%]	9,9	8,0	9,2	7,0	7,8	8,3
	chyba [mBq/mg]	447,6	80,2	63,3	38,1	40,6	46,0
1J1_10	h mot. aktivita [mBq/mg]	494,7	124,2	64,3	54,1	55,5	52,6
limonit	chyba [%]	9,5	9,0	12,5	8,1	9,0	10,9
	chyba [mBq/mg]	47,0	11,2	8,0	4,4	5,0	5,8
1J1_9	h mot. aktivita [mBq/mg]	126,0	25,0	13,0	11,7	16,4	10,9
galenit	chyba [%]	9,0	10,0	15,7	9,1	9,1	13,7
	chyba [mBq/mg]	11,3	2,5	2,0	1,1	1,5	1,5
1J4_2	h mot. aktivita [mBq/mg]	2111,3	200,3	478,0	259,7	300,5	227,4
Mn-oxidy	chyba [%]	6,2	6,6	4,6	3,4	3,8	4,9
	chyba [mBq/mg]	131,9	13,2	22,0	8,8	11,6	11,1
1J5_1	h mot. aktivita [mBq/mg]	343,5	58,9	49,3	57,4	44,0	55,6
pyromorfit	chyba [%]	5,7	5,8	6,7	3,1	3,6	4,5
	chyba [mBq/mg]	19,7	3,4	3,3	1,8	1,6	2,5
1J5_2	h mot. aktivita [mBq/mg]	280,5	48,4	41,4	41,8	31,9	35,2
pyromorfit	chyba [%]	6,2	5,5	6,0	3,5	3,8	4,9
	chyba [mBq/mg]	17,3	2,6	2,5	1,4	1,2	1,7
2J1_3	h mot. aktivita [mBq/mg]	1386,6	292,3	200,5	163,8	146,5	155,4
pyromorfit	chyba [%]	11,5	9,4	10,2	8,5	8,9	9,5
	chyba [mBq/mg]	159,8	27,5	20,4	13,9	13,1	14,8
2J2_10A	h mot. aktivita [mBq/mg]	22181,8	9201,4	3147,8	2439,3	1408,7	1987,7
kasolit	chyba [%]	5,5	2,2	3,1	2,2	2,5	2,8
	chyba [mBq/mg]	1230,3	203,5	97,9	53,4	35,5	55,6
2J5_4	h mot. aktivita [mBq/mg]	383,0	25,2	80,4	76,7	54,8	68,3
Mn-oxidy	chyba [%]	6,8	13,8	7,1	4,1	4,7	5,6
	chyba [mBq/mg]	26,0	3,5	5,7	3,2	2,6	3,8
2J5_5	h mot. aktivita [mBq/mg]	3423,9	776,4	498,3	838,2	423,3	591,0
uranové černé	chyba [%]	6,3	4,3	5,1	2,9	3,2	3,6
	chyba [mBq/mg]	215,6	33,4	25,5	24,3	13,6	21,3
2J5_8	h mot. aktivita [mBq/mg]	58962,2	9855,7	9555,2	11038,8	7410,1	9977,6
uraninit	chyba [%]	7,4	4,1	4,2	3,6	3,8	3,8
	chyba [mBq/mg]	4375,9	407,1	398,0	399,5	277,9	381,5
2J5_9	h mot. aktivita [mBq/mg]	395,7	61,3	72,6	64,0	52,2	61,9
Mn-oxidy	chyba [%]	7,2	6,7	6,3	4,3	4,6	5,3
	chyba [mBq/mg]	28,5	4,1	4,6	2,7	2,4	3,3
2J5_10	h mot. aktivita [mBq/mg]	54985,4	11251,6	7839,4	8680,5	6687,3	8245,1
uraninit	chyba [%]	8,8	5,4	5,6	5,0	5,1	5,2
	chyba [mBq/mg]	4815,3	603,9	440,0	432,8	344,3	431,0
2J2_11	h mot. aktivita [mBq/mg]	7990,0	4691,9	16,6	6,6	2,9	4,9
amorf. U-sek.	chyba [%]	5,9	2,1	20,6	15,2	19,3	29,8
	chyba [mBq/mg]	467,6	98,4	3,4	1,0	0,6	1,4
J_9	h mot. aktivita [mBq/mg]	3931,7	2136,2	22,3	18,0	24,5	9,4
zinkzipeit	chyba [%]	23,9	20,7	46,7	30,4	34,3	51,0
	chyba [mBq/mg]	939,3	442,2	10,4	5,5	8,4	4,8
2J5_3	h mot. aktivita [mBq/mg]	532,5	220,7	95,5	110,0	26,9	4,3
Mn-oxidy	chyba [%]	6,1	2,9	6,1	4,9	4,8	23,5
	chyba [mBq/mg]	32,3	6,5	5,8	5,4	1,3	1,0

VZOREK	h mot. aktivita [mBq/mg]	ROI (2-10 Mev)	ROI 1	ROI 2	ROI 3	ROI 4	ROI 5
	izotop	celk. alfa akt.	^{238}U	^{210}Po	$^{222}\text{Rn} + ^{218}\text{Po} + ^{214}\text{Po}$	^{218}Po	^{214}Po
2J1_4	h mot. aktivita [mBq/mg]	1591,2	289,2	341,7	181,1	150,7	164,6
pyromorfit	chyba [%]	25,2	24,9	24,4	23,1	23,5	24,9
	chyba [mBq/mg]	401,5	71,9	83,5	41,8	35,5	40,9
2J2_12	h mot. aktivita [mBq/mg]	4,4	0,8	0,5	0,3	0,3	0,3
galenit	chyba [%]	7,1	15,8	21,9	14,2	11,6	22,4
	chyba [mBq/mg]	0,3	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1
2J2_13	h mot. aktivita [mBq/mg]	169,1	29,3	16,9	9,3	11,7	3,4
cerusit	chyba [%]	26,4	32,0	38,7	29,2	32,8	49,0
	chyba [mBq/mg]	44,7	9,4	6,5	2,7	3,9	1,7
1J1_8	h mot. aktivita [mBq/mg]	2102,8	620,7	188,6	37,2	31,0	30,4
beudantit	chyba [%]	10,7	7,8	9,3	10,1	10,4	13,0
	chyba [mBq/mg]	224,6	48,2	17,5	3,8	3,2	3,9
2J5_6	h mot. aktivita [mBq/mg]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	26,6
jarosit	chyba [%]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,3
	chyba [mBq/mg]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,4
2J5_6(2)	h mot. aktivita [mBq/mg]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	29,8
jarosit	chyba [%]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,4
	chyba [mBq/mg]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,5
2J5_7	h mot. aktivita [mBq/mg]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	19,7
jarosit	chyba [%]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,1
	chyba [mBq/mg]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,6



Obrázek 20: Hmotnostní aktivity izotopů ^{226}Ra a ^{210}Po ve vzájemném poměru u souboru vzorků měřených metodou nedestruktivní alfaspektrometrie. Izolinie vymezují řádový poměr rádia k poloniu. Z grafu je patrné, že více rádia než polonia neobsahuje žádný analyzovaný vzorek, naopak u většiny množství vzorků převládá ^{210}Po nad ^{226}Ra . Minerály okolo linie 1:1 jsou z hlediska poměru těchto dvou izotopů v rovnováze. Nejméně rádia obsahují cerusit 2J_1, který dosahuje poměru 1:10 a Mn-oxid 2J5_3, u kterého je poměr dokonce 1:19.



Obrázek 21: Hmotnostní aktivity izotopů ^{238}U a ^{226}Ra ve vzájemném poměru u souboru vzorků měřených metodou nedestruktivní alfaspektrometrie. Izolinie vymezují řádový poměr rádia k uranu. Z grafu je patrné, že více rádia než uranu obsahují pouze dva vzorky Mn-oxidů. Minerály okolo linie 1:1 jsou z hlediska poměru těchto dvou izotopů v rovnováze. Nejvyššího poměru U/Ra dosahují widenmannit, zippeit, lodevit a amofní U-Pb oxidy, které dosahují poměru dokonce 1:1000. Obecně lze konstatovat, že s vzrůstajícím poměrem U/Ra se snižuje stáří minerálních fází.

5.3. Mladé vzorky s obsahem ^{210}Po

Izotop ^{210}Po se ve zvýšeném obsahu vyskytl u beudantitu a widenmannitu. Výrazná nerovnováha s uranem indikuje možné nevelké stáří vzorků. O těchto minerálech je blíže pojednáno v kap. 5.3.1.

5.3.1. Výpočet modelového stáří ^{210}Pb

V případě mladých olovnatých a U-Pb minerálů (widenmanit II., beudantit, masuyit a některé Mn-oxidy) byla metodou nedestruktivní alfaspektrometrie naměřena signifikantně zvýšená aktivita ^{210}Po (dceřiný produkt ^{210}Pb s poločasem 138 dní). Toto polonium není v rovnováze s přítomným ^{226}Ra , aktivita ^{210}Po je v takových případech vyšší ($A_{210\text{Po}} > A_{226\text{Ra}}$); dalším stárnutím minerálu by se dostaly oba radionuklidy do rovnováhy ($A_{210\text{Po}} = A_{226\text{Ra}}$). Pro výpočet stáří je nutno použít aktivitu „nepodporovanou“ (unsupported) vypočítanou jako rozdíl aktivit: $A_{\text{unSUPP.}210\text{Po}} = A_{210\text{Po}} - A_{226\text{Ra}}$.

Tato radiochemická situace nabízí možnost některé z minerálů datovat. Pro výpočet stáří metodou ^{210}Pb je v tomto případě nutno aproximovat počáteční aktivitu tohoto radionuklidu. Jednou z možností je výpočet počáteční aktivity na základě znalosti „radiogenicity“ minerálu zjištěné ICP-MS (Škácha 2007), kdy byl vyčíslen podíl radiogenního olova z celkového přítomného Pb na základě krajních členů (galenit a uraninit).

Při modelové situaci společného zvětrávání obou minerálů je čerstvé radiogenní Pb (včetně ^{210}Pb) uvolněno z uraninitu a začleněno do struktury nového minerálu v naměřeném poměru. Pro výpočet je nutno znát obsah uranu v uraninitu (z něj lze vypočítat hmotnostní aktivitu ^{210}Pb v rovnováze) a rovněž obsah radiogenního olova v uraninitu.

Čistý uraninit bez neradiogenního olova nebyl na Jánské žíle nalezen, tento krajní člen byl vypočítán z dat izotopických poměrů Pb regresi při $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} \rightarrow 0$. Izotopické $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ stáří tohoto krajního členu vychází na 271,6 Ma (Škácha 2007).

Za základ pro výpočet krajního členu byly přijaty dvě analýzy nenavětralých uraninitů z hlubokých horizontů Jánské žíly: 8J_1 a 15J-1. Na základě jejich izotopického stáří byl vyčíslen obsah radiogenního olova, ze znalosti „radiogenicity“ byl vyčíslen podíl olova neradiogenního a ten byl ve formě galenitu od analýzy odečten a obsah uranu opraven. Správnost úvahy byla potvrzena stanovením olova nezávislou metodou (F-AAS, anal. O. Šebek). Z obou uraninitů byl vypočítán průměr a tento přijat jako hodnota počáteční aktivity ^{210}Pb čerstvého radiogenního olova (tabulka 16).

Tabulka 16: Vstupní hodnoty a výsledky výpočtu krajního členu uraninitu, jeho hmotnostní aktivity ^{210}Pb a vyčíslené hmotnostní aktivity čistého radiogenního olova.

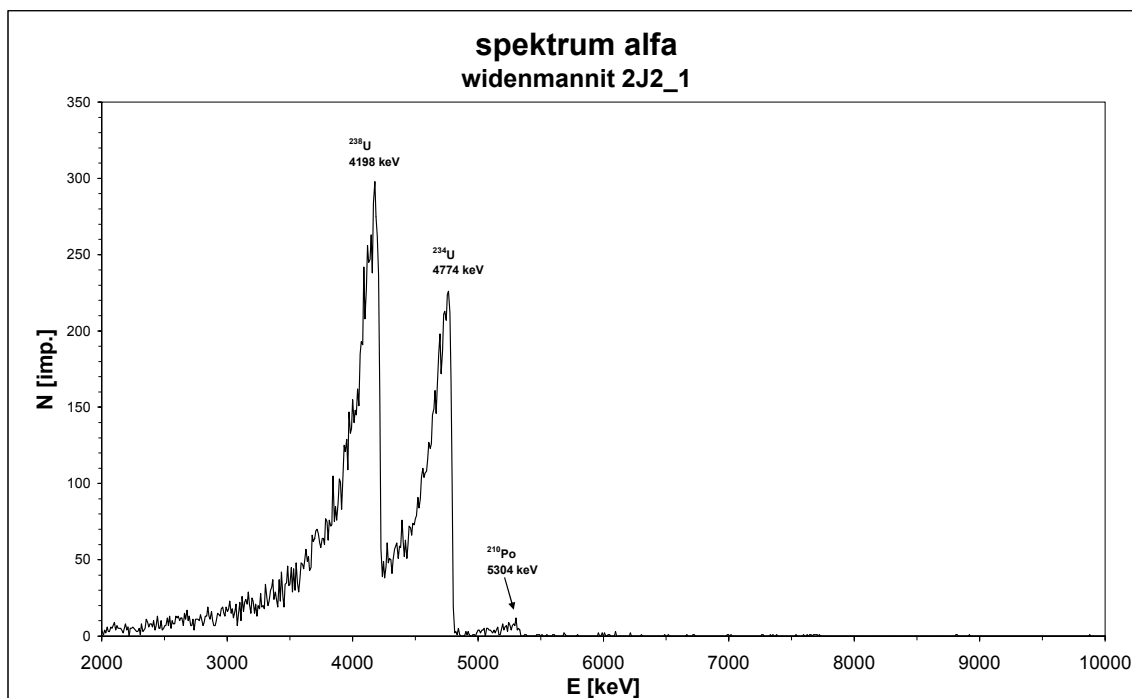
	metoda	uraninit 8J_1	uraninit 15J_1	krajní člen průměr	čisté Pb radiogenní
U [hmot. %]	ICP-MS	73.83	74.12	---	---
U [hmot. %] kor.	calc.	74.73	75.06	74.89	---
Pb radiog. [hmot. %]	calc.	3.318	3.3307	3.324	100
radiogenicita [%]	ICP-MS	76.116	75.413	---	---
radiogenicita [%]	calc.	66.23	68.25	100	100
celkové Pb [hmot. %]	calc.	4.359	4.417	3.324	100
celkové Pb [hmot. %]	F-AAS	5.01	4.88	---	---
$A_{210\text{Pb}}$ [Bq/g]	calc.	9229	9270	9250	278279

Při výpočtu stáří minerálů je nutno vyčíslit ze znalosti obsahu olova a jeho „radiogenicity“ počáteční aktivitu ^{210}Pb . Tato hodnota nemusí však odpovídat skutečnosti, neboť v obecném případě může být radiogenní olovo již „zestárlé“ (recyklované dalšími Pb minerály) a ve skutečnosti může mít počáteční aktivitu nižší. Mluvíme proto pouze o „modelovém stáří ^{210}Pb “, které vyjadřuje nejvyšší možné stáří. Při přítomnosti „recyklovaného“ olova je ve skutečnosti minerál mladší. Modelové stáří ^{210}Pb bylo vyčísleno v případě minerálů wiedenmanitu II. a beudantitu (tabulka 17)

Tabulka 17: Naměřené hodnoty a výsledky výpočtu modelového stáří ^{210}Pb u wiedenmanitu a beudantitu.

číslo		2J2_1	1J1_8
minerál	metoda	wiedenmanit II	beudantit
Pb [hmot. %]	F-AAS	39,64	31,36*
radiogenicita [%]	ICP-MS	1,941	5,025
radiogenní Pb [hmot. %]	calc.	0,769	1,576
A_0 ^{210}Pb [Bq/g]	calc.	2140,5	4384,54
A ^{210}Pb [Bq/g]	alfa spektro	62,65	188,61
sigma [Bq/g]	alfa spektro	8,86	17,55
A ^{226}Ra [Bq/g]	alfa spektro	11,10	30,37
sigma [Bq/g]	alfa spektro	2,76	3,93
A ^{210}Pb unsubs. [Bq/g]	alfa spektro	51,55	158,24
sigma [Bq/g]	alfa spektro	11,62	21,48
stáří [y]	calc.	123,6	108,1
2 sigma [y]	calc.	15,7	9,0

*) Teoretický obsah Pb podle vzorce



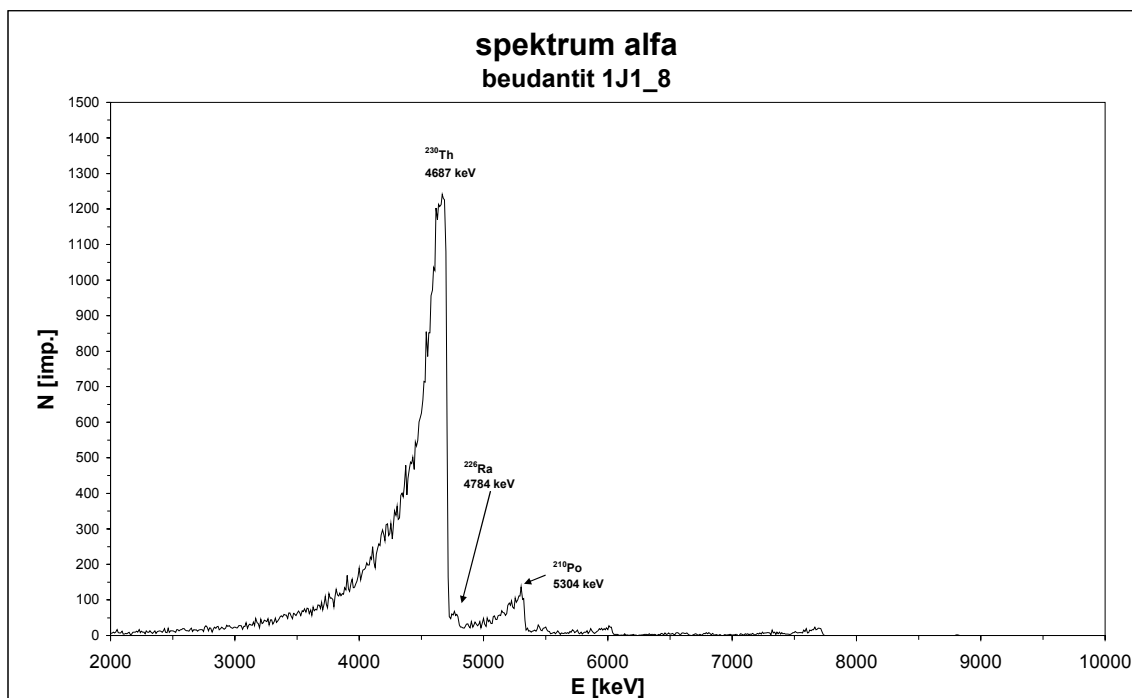
Obrázek 22: Spektrum widemannitu (2. patro dolu Prokop) pořízené metodou nedestruktivní alfaspektrometrie. Výrazná nerovnováha a přítomnost ^{210}Po ukazuje na nízké stáří vzorku.

5.4. Vyhodnocení vzorků s neobvyklou asociací radionuklidů

Při měření spekter byly u některých vzorků nalezeny zcela neobvyklé asociace radionuklidů, které nejsou běžné v ostatních studovaných minerálech.

Příkladem může být alfaspektrum vzorku jarositu, u kterého byla zjištěna přítomnost rozpadových produktů radionuklidu ^{227}Ac z řady ^{235}U ve zcela anomálním poměru oproti přírodní izotopické směsi. I když sám izotop ^{227}Ac není alfa zářič, ale téměř výhradně se rozpadá přeměnou β a tudíž se jeho energetický pík ve spektru neobjevil, byl určen právě na základě přítomnosti jeho krátkodobých rozpadových produktů jako mateřský radionuklid. Jeho přítomnost byla ověřena proměřením téhož vzorku po měsíční prodlevě, kdy bylo naměřeno spektrum podobné, avšak změnil se poměr $^{215}\text{Po}/^{214}\text{Po}$ z hodnoty 4,90 na 3,94. V přírodní směsi by se však tyto izotopy měly vyskytovat ve zcela obráceném poměru (1 : 21,7).

Ve spektru se dále vyskytuje relativně vysoký pík ^{210}Po indikující nízké stáří vzorku. Energetická maxima ^{226}Ra , ^{222}Rn a jeho krátkodobých produktů jsou relativně minoritní složkou. Koncentrace ^{226}Ra stanovená na okně ^{214}Po se pohybuje od 0,16 ($\pm 0,01$) do 0,24 ($\pm 0,02$) [%eU].

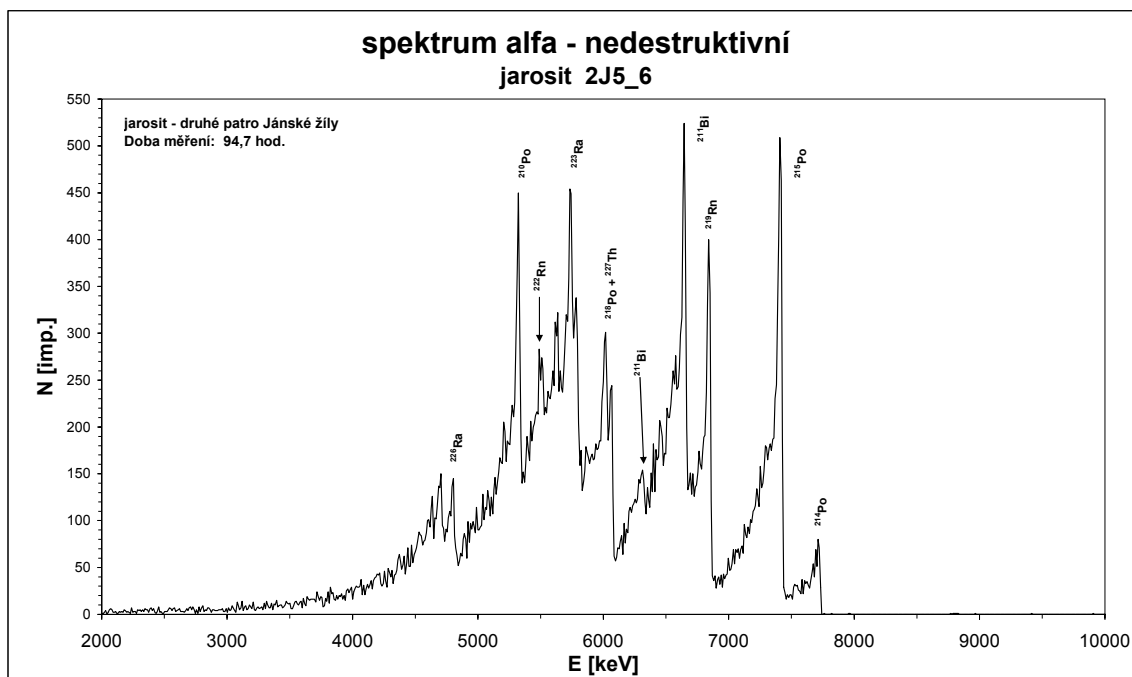


Obrázek 23: Spektrum beudantitu pořízené metodou nedestruktivní alfaspektrometrie. Ve spektru se nevykytuje uran. Jako mateřský izotop je zde nuklid ^{230}Th . Další zvláštností spektra je nerovnováha mezi ^{226}Ra a ^{210}Po , kdy se rádium vyskytuje v poměru s poloniem minoritně.

Tabulka 18: Výsledky nedestruktivní alfaspektrometrie u minerálů se zvláštní asociací izotopů. Za názvem minerálu je uvedena navážka s neurčitostí vážení [mg], datum měření (to je důležité u vzorku 2J5_6, který byl měřen opakovaně po uplynutí 1 měsíce), dále koncentrace ^{223}Ra na okně ^{215}Po s neurčitostí stanovení 1 sigma [%eU], koncentrace ^{226}Ra na okně ^{214}Po s neurčitostí stanovení 1 sigma [%eU] a poměr izotopů $^{215}\text{Po}/^{214}\text{Po}$. Pro přepočítání koncentrací eU [%] na aktivitu [Bq/g] lze použít vztah: $A_{\text{[Bq/g]}} = eU[\%] * 123,5$

VZOREK	minerál	navážka [mg]	neurčitost navážky [mg]	datum měření	koncentrace ^{223}Ra na okně ^{215}Po [%eU]	sigma [%U]	koncentrace ^{226}Ra na okně ^{214}Po [%eU]	sigma [%U]	poměr $^{215}\text{Po}/^{214}\text{Po}$
2J5_6	jarosit	0,460	0,0098	10.4.2007	1,05	0,04	0,22	0,01	4,90
2J5_6(2)	jarosit	0,460	0,0098	16.5.2007	0,95	0,02	0,24	0,02	3,94
2J5_7	jarosit	0,688	0,0089	1.4.2007	0,85	0,03	0,16	0,01	5,33

Dalším minerálem s neobvyklou asociací radionuklidů byl beudantit, u kterého byl jako dominantní radionuklid zjištěn izotop ^{230}Th . Z vizuálního posouzení spektra je na první pohled patrná značná nerovnováha dceřiných rozpadových produktů ^{230}Th , jež může poukazovat na nedávnou dobu vzniku tohoto minerálu. Zajímavá je též nepřítomnost uranu, což poukazuje na domněnku, že thorium bylo minerálem sorbováno z okolí a pochází z rozkladu uraninitu. Z izotopového páru $^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$ lze vypočítat stáří minerálů, které vychází $69,3 \pm 16,1$ let (tabulka 19).



Obrázek 24: Spektrum jarositu pořízené metodou nedestruktivní alfaspektrometrie. Ve spektru se vyskytují dceřiné radionuklidy rozpadové řady ^{235}U v jiném poměru k izotopům rozpadové řady ^{238}U , než je obvyklé ($^{238}\text{U}:^{235}\text{U}$ 21,7:1). Mateřský radionuklid však není ^{235}U , jehož energetický pik zde chybí, ale ^{227}Ac , který z 98,62 % rozpadá β přeměnou na ^{227}Th , který se pak již dále rozpadá emisí částice α .

Tabulka 19: Kvantifikace výsledků nedestruktivní alfaspektrometrie minerálu beudantitu. Za názvem minerálu je hodnota FWHM píku ^{230}Th [keV], následuje koncentrace ^{230}Th s neurčitostí stanovení [%eU], dále koncentrace ^{210}Po s neurčitostí stanovení [%eU], koncentrace ^{226}Ra stanovená na okně ^{214}Po s neurčitostí stanovení [%eU], poměr $^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$ s vyčíslenou neurčitostí a vypočtené stáří [y] tohoto izotopového páru. Velikost neurčitostí stanovovaných veličin je vyjádřena 1 sigma, pro výpočet stáří 2 sigma. Pro přepočtení koncentrací eU [%] na aktivitu [Bq/g] lze použít vztah: $A_{\text{[Bq/g]}} = \text{eU}[\%] * 123,5$

VZOREK	minerál	FWHM ^{230}Th	koncentrace ^{230}Th [%eU]	sigma [%eU]	koncentrace ^{210}Po [%eU]	sigma [%eU]	koncentrace ^{226}Ra na okně ^{214}Po [%eU]	sigma [%eU]	poměr $^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$	sigma	stáří $^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$	2 sigma
1J1_8	beudantit	206,0	18,39	1,27	1,53	0,14	0,25	0,03	0,0295	0,00338	69,3	16,1

5.5. Výsledky destruktivní alfaspektrometrie

5.5.1. Separace standardu HU1 a výpočet poměru $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$

Pro možnost kvantifikace dosažených výsledků a verifikaci použité metody bylo potřeba provést separaci a výpočet na standardu. Jako standard byl použit HU1 (Harwell uraninite) ve stavu radioaktivní rovnováhy (Ludwig et al. 1992). Bylo provedeno devět stanovení izotopických poměrů $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ a $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$. Sedm replik ukázalo radioaktivní rovnováhu, pouze u dvou replik bylo možné vypočítat stáří, které však vyšlo velmi vysoké (v blízkosti rovnováhy). Průměrné hodnoty obou poměrů jsou v rámci 2 sigma v rovnováze. Metodu je tedy možno považovat za dostatečně dobře verifikovanou.

Tabulka 20: Tabulka výsledků stanovení rovnovážného standardu HU-1 destruktivní alfa spektrometrií. V tabulce je znázorněn poměr $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ s absolutní neurčitostí stanovení 2 sigma, poměr $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ a vypočtené stáří, vše s absolutní neurčitostí stanovení 2 sigma. Hodnota 2 sigma průměru je stanovena statisticky ze souboru hodnot poměrů.

standard "Harwell uraninite"							
VZOREK	MINERÁL	$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$	2 sigma	$^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$	2 sigma	stáří [y]	2 sigma
HU1 t2	uraninit	1,0205	0,0418	0,9156	0,1789	> 143500	-
HU1 t3	uraninit	0,9947	0,0778	1,0675	0,1280	> 308000	-
HU1 t4	uraninit	1,0032	0,0853	0,8852	0,1439	> 146750	-
HU1 t5	uraninit	1,1085	0,1766	0,8814	0,1716	> 129500	-
HU1 t6	uraninit	0,9979	0,0379	0,8451	0,0638	213350	± 47850
HU1 t8	uraninit	1,0235	0,0951	0,8313	0,1096	196450	± 35350
HU1 t9	uraninit	1,0027	0,0376	0,9305	0,0768	> 208500	-
HU1 t10	uraninit	1,0132	0,0354	1,0679	0,0951	>382000	-
HU1 t11	uraninit	1,0130	0,0567	0,9398	0,0961	> 199600	-
PRŮMĚR		1,0197	0,0655	0,9294	0,1627		

5.5.2. Výpočet stáří metodou $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$

Matematické vztahy použité k výpočtu stáří metodou $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$:

Výpočet stáří metodou izotopického poměru $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ byl prováděn podle Majera (1981). Aktivitu ^{230}Th vzniklého z iniciálního ^{238}U (odděleného chemicky od svých rozpadových produktů v době vzniku minerálu) vyčíslíme pomocí rovnice pro výpočet soustavy tří radionuklidů v genetické souvislosti (14).

$$A_{^{230}\text{Th}}^{*238} = \lambda_{^{234}\text{U}} \cdot \lambda_{^{230}\text{Th}} \cdot \left(e^{\frac{\lambda_{^{238}\text{U}} \cdot t}{(\lambda_{^{234}\text{U}} - \lambda_{^{238}\text{U}}) \cdot (\lambda_{^{230}\text{Th}} - \lambda_{^{238}\text{U}})}} \right) + \left(e^{\frac{\lambda_{^{234}\text{U}} \cdot t}{(\lambda_{^{238}\text{U}} - \lambda_{^{234}\text{U}}) \cdot (\lambda_{^{230}\text{Th}} - \lambda_{^{234}\text{U}})}} \right) + \left(e^{\frac{\lambda_{^{230}\text{Th}} \cdot t}{(\lambda_{^{238}\text{U}} - \lambda_{^{230}\text{Th}}) \cdot (\lambda_{^{234}\text{U}} - \lambda_{^{230}\text{Th}})}} \right) \quad (14)$$

Dalším krokem je výpočet aktivity ^{230}Th z ^{234}U odděleného chemicky a zakomponovaného chemicky do minerálu v době jeho vzniku (15).

$$A_{^{230}\text{Th}}^{*234} = \frac{\lambda_{^{230}\text{Th}}}{\lambda_{^{230}\text{Th}} - \lambda_{^{234}\text{U}}} \cdot \left(e^{-\lambda_{^{234}\text{U}} \cdot t} - e^{-\lambda_{^{230}\text{Th}} \cdot t} \right) \quad (15)$$

Celkovou recentní aktivitu (16) získáme kombinací rovnic (14) a (15) podle uvažovaného iniciálního poměru $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ v minerálu, v době jeho vzniku.

$$A_{^{230}\text{Th}} = \left(\frac{A_{\text{inic.}^{234}\text{U}}}{A_{\text{inic.}^{238}\text{U}}} \cdot A_{^{230}\text{Th}}^{*238} \right) + A_{^{230}\text{Th}}^{*234} \quad (16)$$

Aktivitu ^{234}U vzniklého z iniciálního ^{238}U (odděleného chemicky od svých rozpadových produktů v době vzniku minerálu) vypočítáme dle rovnice (17):

$$A_{234U}^{*238} = \frac{\lambda_{234U}}{\lambda_{234U} - \lambda_{238U}} \cdot (e^{-\lambda_{238U} \cdot t} - e^{-\lambda_{234U} \cdot t}) \quad (17)$$

Dalším krokem je výpočet poklesu aktivity ^{234}U , chemicky a izotopicky odděleného a zakomponovaného do minerálu v době jeho vzniku (18):

$$A_{234U}^{*234} = e^{-\lambda_{234U} \cdot t} \quad (18)$$

Celkovou recentní aktivitu ^{234}U (19) získáme kombinací rovnic (17) a (18) podle uvažovaného iniciálního poměru $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ v minerálu, v době vzniku minerálu.

$$A_{234U} = \left(\frac{A_{\text{inic. } ^{234}\text{U}}}{A_{\text{inic. } ^{238}\text{U}}} \cdot A_{234U}^{*238} \right) + A_{234U}^{*234} \quad (19)$$

Recentní poměr $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ získáme vydělením rovnic (16) a (19).

$$Ar_{234U/230Th} = \frac{A_{234U}}{A_{230Th}} \quad (20)$$

Recentní poměr $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ získaný v krocích 14-20 nyní už můžeme použít pro samotný výpočet stáří, kdy iterativně zadáváme různé hodnoty iniciálního poměru $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ a hodnotu stáří t a metodou půlení intervalu dosáhneme hodnoty poměru, která byla získána alfaspektrometricky.

Hodnotu 2 sigma pro stáří t získáme opět iterativním výpočtem naměřeného poměru $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ zvětšeným a zmenšeným o hodnotu 2 sigma. Neboť jsou hodnoty stáří ± 2 sigma na obě strany různé, byla výsledná hodnota stáří středována doprostřed jejich intervalu.

Tabulka 21: Tabulka výsledků stanovení stáří metodou $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$. V tabulce je znázorněn poměr $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ s absolutní neurčitostí stanovení 2 sigma, poměr $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ a vypočtené stáří, vše s absolutní neurčitostí stanovení 2 sigma.

VZOREK	MINERÁL	$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$	2 sigma	$^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$	2 sigma	stáří [y]	2 sigma
2J2_3B	kasolit	1,0074	0,0770	0,9491	0,1808	> 158500	-
1J2_2	kasolit	0,9994	0,0454	0,8923	0,1348	> 154800	-
2J2_10A	kasolit	0,9985	0,0352	0,8252	0,0698	199400	± 46100
1J2_5	widenmannit	0,9405	0,0454	0,9378	0,1323	> 184000	-
1J1_5	zeunerit	0,8234	0,0605	0,3357	0,0515	45600	± 8750
1J1_7	zeunerit	0,8639	0,0656	0,3738	0,0617	52225	± 11075
1J1_1	lodevit	0,7880	0,0318	0,0553	0,0079	6215	± 915
2J5_1	metaautnit	0,8421	0,0486	0,0631	0,0150	7150	± 1745
1J3_1	masuyit	1,0262	0,1270	5,2745	0,9858	n.a	n.a.
J_6	metatorbernit	1,1648	0,2392	0,6213	0,2388	124850	± 73150

Tabulka 22: Tabulka výsledků stanovení stáří metodou $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ – opakované měření. V tabulce je znázorněn poměr $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ s absolutní neurčitostí stanovení 2 sigma, poměr $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ a vypočtené stáří, vše s absolutní neurčitostí stanovení 2 sigma. Porovnáním s tabulkou 21 je možné vidět určitou korekci stáří u měřených vzorků a snížení neurčitosti stanovení vlivem delšího času měření.

VZOREK	MINERÁL	$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$	2 sigma	$^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$	2 sigma	stáří [y]	2 sigma
2J2_3B	kasolit	0,9984	0,0259	0,9857	0,1283	> 212100	-
1J2_2	kasolit	0,9861	0,0211	0,9215	0,0553	328650	± 107350
2J2_10A	kasolit	0,9975	0,0160	0,8361	0,0379	200100	± 25800
1J2_5	widenmannit	0,9602	0,0246	0,9328	0,0744	> 220000	-
1J2_5	widenmannit s.	0,9558	0,0217	0,9340	0,0649	> 230500	-
1J1_5	zeunerit	0,8143	0,0313	0,3567	0,0346	49100	± 6100
1J1_7	zeunerit	0,8389	0,0446	0,4056	0,0471	58125	± 9025
1J1_1	lodevit	0,8164	0,0145	0,0577	0,0051	6475	± 575
2J5_1	metaautnit	0,8831	0,0248	0,0668	0,0081	7550	± 950
1J3_1	masuyit	1,0262	0,1270	5,2745	0,9858	n.a	n.a.
J_6	metatorbernit	1,0407	0,1772	0,6315	0,1646	119000	± 50900

6. DISKUSE

Hodnocení metody nedestruktivní alfaspektrometrie

Postupem prací bylo zjištěno, že při kvantitativním hodnocení výsledků nedestruktivní alfaspektrometrie se projevují určité nestability a odchylky. Při ověřování přesnosti metody (opakovaná měření téhož vzorku, kdy byl vzorek vždy vyjmut z komory a opět umístěn před detektor) byla konstatována velmi dobrá shoda výsledků.

Naproti tomu při ověřování správnosti naměřených hodnot pomocí referenčního materiálu BL5 (ve stavu radioaktivní rovnováhy s deklarovaným obsahem uranu 7,09%) s citlivostními koeficienty určenými na standardu PU1 (rovnovážný uraninit s obsahem uranu 71,47%) vycházely hodnoty signifikantně nižší, pouze v rozmezí 4,43 – 5,66% U. Výpočty však prokázaly rovnováhu v aktivitách na ROI ^{214}Po a ^{238}U , což ukazuje na správnost pouze jednoho hodnoceného faktoru.

Lze vyslovit domněnku, že vypočtené snížené hodnoty obsahu uranu za současného zachování radioaktivní rovnováhy ve vzorku byly způsobeny separací fází při nanášení referenčního materiálu na disk, kdy gravitačně separovaná jemnozrnná fáze s menší hustotou byla přenesena na disk, zatímco fáze s větší hustotou byla soustředěna v hrubší frakci. (příloha č. I, příprava vzorků pro nedestruktivní alfaspektrometrii). Tímto způsobem došlo pravděpodobně k ochuzení nanášeného vzorku a naměření nižších koncentrací uranu, než je doporučena hodnota referenčního materiálu BL-5.

Naopak výsledky měření referenčního materiálu CRM 129-A se relativně velmi dobře shodují s deklarovaným obsahem U (v rámci neurčitosti 1 sigma). Odlišné hodnoty naměřených koncentrací mají svůj původ v relativně velké chybě vážení, která se pohybovala v rozmezí 3-10 %. Tento materiál je na rozdíl od BL-5 chemicky čistým oxidem uranu, tedy pouze jednou fází s konstantní hustotou.

Stanovení radionuklidů touto metodou může být tedy v případě analýz polyminerálních vzorků negativně zkresleno. V případě reálných analyzovaných vzorků z Jánské žily je toto nebezpečí sníženo, neboť byly analyzovány (téměř) monominerální koncentráty, jejichž čistota byla ověřena RTG difrakcí (Škácha 2007).

I když se jistě projevuje relativně velmi vysoká chyba vážení vzorků, je metoda nedestruktivní alfaspektrometrie pro determinaci radionuklidů primárních i sekundárních fází uranových minerálů pravděpodobně jednou z nejvhodnějších metod, která má řadu výhod a předností. Je to především nenáročnost postupu přípravy vzorků, což umožňuje pracovat s jejich velkým souborem současně. Mezi další výhody této metody je široké rozpětí koncentrací izotopů, které je možné stanovit od

hodnot jen o málo přesahujících pozadové hodnoty v geologickém prostředí (nejníže aktivním analyzovaným vzorkem byl galenit s ekvivalentní koncentrací pouze 66 ppm U) až po rudní koncentrace (uraninit). Toto široké rozmezí stanovitelnosti koncentrací je možné u této metody provádět bez předchozí chemické separace radionuklidů na vzorcích s nepatrnou hmotností (méně než 1 mg). Poslední velkou výhodou je podání nezkráceného obrazu o distribuci všech alfa aktivních radionuklidů, což jiná alfa spektrometrická metoda neumožňuje. Tato metoda pak umožňuje kvantifikaci i dalších radonuklidů (^{210}Po a izotopového poměru $^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$) použitých pro datování velmi mladých sekundárních fází.

V případě beudantitu (bazický síran Pb a Fe^{III} ze skupiny alunitu) byla zjištěna velmi neobvyklá radiochemická preference, kdy v experimentálním spektru silně převládá izotop ^{230}Th , který je zde mateřským izotopem pro ^{226}Ra . Otázkou je krystalochemické včlenění ^{230}Th do jeho struktury. V takové situaci může thorium v tomto minerálu pravděpodobně zastupovat heterovalentně trojmocné železo. V případě, že iniciální aktivita ^{226}Ra je v tomto minerálu blízka nule, je možno jej datovat párem $^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$. Toto vypočtené stáří vychází pouze na 69 ± 16 let. Pokud by iniciální aktivita ^{226}Ra byla nenulová, výsledné stáří by bylo ještě nižší. Naproti tomu modelové stáří ^{210}Pb tohoto minerálu vychází na 108 ± 9 let. Obě vypočtená stáří se tedy neshodují ani v rámci uváděných 2 sigma, ale nelze v této chvíli říci, které z nich je věrohodnější.

Pro výpočet modelového stáří ^{210}Pb byl použit teoretický obsah olova ze vzorce minerálu a nezávislou metodou (F-AAS) bude stanoven později. Toto stáří se může tedy ještě změnit. Je však jasné, že tento minerál je velice mladý (recentní) a vznikl jako důsledek důlní činnosti na lokalitě.

U spektra jarositu se jako možný mateřský radionuklid přítomných dceřiných produktů ukázal být izotop ^{227}Ac , jež se sám ve spektru nevyskytuje (rozpad β přeměnou na ^{227}Th). Otázkou zde může být způsob, jakým se tento izotop do struktury minerálu včlenil. První z možností je, že ^{227}Ac v jeho struktuře nahradil Fe^{III} . Aktinium má totiž podobné geochemické vlastnosti jako REE a nachází se často jako trojmocný kationt.

Druhou možností je, že minerál jarosit ve zvýšené míře koncentruje izotop ^{227}Th , čemuž by odpovídaly výsledky opakovaného měření po jednom měsíci. Aktivita dceřiných nuklidů z řady ^{235}U v tomto minerálu totiž klesá, ale ne tak rychle, jak by měla při obsahu čistého ^{227}Ac . Je tedy možné, že jarosit primárně koncentruje jak ^{227}Ac , tak i ^{227}Th (přičemž aktivita ^{227}Th je vyšší) a má tedy i podobné geochemické preference (koncentruje thorium) jako minerál beudantit (oba minerály jsou krystalochemicky příbuzné a náleží do alunitové skupiny!). Tento minerál bude dále sledován a bude hodnocen vývoj jeho radiochemické rovnováhy.

Tyto dva minerály však ve studovaném souboru minerálů nejsou jedinými koncentrátoři thoria. Jde zřejmě o více rozšířený jev, než by se dalo předpokládat. Tímto třetím příkladem je minerál masuyit (hydroxid uranu a olova). U něj byl metodou destruktivní alfaspektrometrie stanoven poměr $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ v hodnotě 5,3. Tento zcela anomální poměr znemožnil použití jmenovaného izotopového páru k datování (lze použít pouze v případě rozmezí poměru 0 – 1).

Izotopického poměru $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ však bylo dobře možné použít k datování vybraného subsouboru devíti vzorků uranových sekundárních minerálů. Toto stanovení stáří u nerovnovázných fází sekundárních minerálů ukázalo velmi zajímavé výsledky, které prozatím z oblasti českého masívu nemají obdoby. Bylo zjištěno, že datované uranové sekundáry pocházejí ze tří oddělených etap hypergeneze.

Nejstarší datované minerální fáze pochází z období středního pleistocénu (kasolit gummitového vzhledu 2J2_10A s izotopickým stářím $199,4 \pm 46,9$ ka). Ostatní dva vzorky kasolitu (2J2_3B a 1J2_2) jsou v rámci 2 sigma v radioaktivní rovnováze, mohou být tedy teoreticky i starší. Pozdně hydrotermální vznik kasolitu diskutovaný Škáchou a Sejkorou (2001) je tedy přinejmenším nepravděpodobný. Proto bylo třeba pro tyto vzorky zpřesnit získaná data dalším doměřením. Toto doměření bylo provedeno s odstupem cca 1 měsíce. Kromě kasolitu z 1. patra Jánské žíly, kde se podařilo určit stáří přesněji než v první sérii ($328,6 \pm 107,3$ ka), však došlo jen ke korekci v řádu 1 – 5

ka u starších fází. Při delším měření se pozitivně projevilo snížení neurčitosti 2 sigma a tím jisté zpřesnění výsledků datování.

Tabulka 23: Schéma sukcese primární a sekundární mineralizace Jánské žíly 1. a 2. patra dolu Prokop (Škácha 2007). U datovaných fází je uvedeno jejich stáří zjištěné izotopickým datováním s neurčitostí stanovení 2 sigma. Metody stanovení: 1) $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ uraninitu (Škácha 2007), 2) chemické stáří uraninitu (Škácha 2007), 3) $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ (tato práce), 4) modelové stáří ^{210}Pb (tato práce), 5) $^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$ (tato práce). Standardní nejistota stanovení stáří je vyjádřena ve 2 sigma.

Minerál	I. Pb-Zn	II. U	hyper. I.	hyper. II.	h. III.
Chalkopyrit	■				
Křemen	■■■■■				
Sfalerit	■■■■■				
Galenit	■■■■■	■■■■■			
Baryt	■■■■■	■			
Uraninit	271.6 Ma ¹⁾ 263.5±4.5 Ma ²⁾	■■■■■			
Pyrit		■■■■■			
Markazit		■			
Kasolit		199±46 ka ³⁾ >158 ka ³⁾	■■■■■		
“Gummit” (amorf.)			■■■■■		
Widenmannit			>184 ka ³⁾ ■■■■	123.6(±15.7) a ⁴⁾ ■	
(Meta)torbernit			125(±73) ka ³⁾ ■■■■		
Pyromorfit				■■■■■	■■■■■
Mn-oxidy				■■■■■	■
Cerusit				■■■■■	
Anglesit				■■■■■	■■■■■
(Meta)zeunerit				45.6(±8.7) ka ³⁾ 52.2(±11) ka ³⁾	
(Meta)autunit				7.1(±1.7) ka ³⁾ ■■■■	
Kuprosklodowskit				■■■■■	
(Meta)lodevit				6.2(±0.9) ka ³⁾ ■■■■	
Masuyit					■ ?
Beudantit				69(±16) a ³⁾ 108(±9) a ⁴⁾	■
Aragonit					■■■■■
Sádrovec					■■■■■
Zippeit					■

Na hranici mezi středním a svrchním pleistocénem bylo stanoveno stáří metatorbernitů (124,8 ± 73 ka). Do svrchního pleistocénu spadají oba vzorky zeuneritu s datovaným stářím 45,6 ± 8,7 a 52,2 ± 11 ka. Třetí etapa, kam spadají vzorky holocénního stáří (metaautunit a lodevit se stanoveným stářím 7,1 ± 1,7 a 6,2 ± 0,9 ka) vyjadřuje závěrečnou fázi rozvoje sekundární mineralizace na lokalitě.

Minerální fáze mladého widenmannitu je recentní, stejně jako výše diskutovaný beudantit. Jejich vznik byl umožněn otevřením důlního díla a specifickým mikroklimatem.

Hlubší interpretace zjištěných stáří v této chvíli není možná, neboť nejsou k dispozici srovnatelná data z jiných lokalit českého masívu s datovanými fázemi sekundární mineralizace. I když jsou

alfaspektrometricky získaná stáří zatížená vyšší chybou stanovení než za použití metodiky hmotnostní spektrometrie (TIMS), jde v každém případě o velice cenná čísla.

Další zajímavé výsledky přináší bližší pohled na alfaspektrometricky stanovený poměr $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$. Tento poměr se v přírodě mění díky frakcionaci obou izotopů uranu. Neboť izotop ^{234}U vzniká jako dceřiný v řadě ^{238}U , dochází u něj vlivem zpětného odrazu jádra ke ztrátě části elektronového obalu a následně (po přijetí nových valenčních elektronů) k jeho ustálení ve vyšším oxidačním stavu U^{IV} , který je posléze výrazně lépe loužitelný. V alterujících roztocích je proto obohacen a v reziduu naopak ochuzen (Richards a Dorale 2003). Vlivem jejich genetické závislosti se však tato disproporce časem smazává a oba izotopy se v řádu stovek tisíc let dostávají do rovnováhy.

V analyzovaných vzorcích sekundárních uranových minerálů z Jánské žíly lze rozlišit dvě populace s rozdílným poměrem $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$: První jsou vzorky kasolitů, u kterých je rovnováha ustavena. V tomto případě do poměru promlouvá jejich vysoké stáří v blízkosti equilibria páru $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$, což opět potvrzuje jejich relativně vysoké stáří.

Druhou populací poměru $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ jsou vzorky zeuneritu, metaautunitu a lodevitu, kde je tento poměr signifikantně snížen a nabývá hodnot 0,86 až 0,79. V tomto případě naměřená data hovoří o silném vyloužení primární asociace, kdy je i v alterujících roztocích, ze kterých minerály precipitovaly k dispozici pouze uran se sníženým izotopickým poměrem $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$. Takto izotopicky anomální minerály pocházejí většinou z 1. patra, kde je zvětrávání dlouhodobě nejsilnější.

7. ZÁVĚR

V této práci byla provedena identifikace radionuklidů přítomných v sekundárních fázích minerálů Jánské žíly metodou nedestruktivní alfaspektrometrie. Metoda nedestruktivní alfaspektrometrie byla vybrána pro svou jednoduchost jako vhodná pro analýzu velkého souboru vzorků bez nutnosti jejich předchozí chemické separace. Správnost metody byla verifikována na referenčních materiálech CRM 129-A (oxid uranu) a BL-5 (uranová ruda) s certifikovanými obsahy uranu.

Při kvantifikaci výsledků nedestruktivní alfaspektrometrie byly vyčísleny aktivity a koncentrace radioizotopů u celého souboru vzorků, poměry izotopů $^{238}\text{U}/^{226}\text{Ra}$ a $^{210}\text{Po}/^{226}\text{Ra}$. Po kvalitativním vyhodnocení a kvantifikaci výsledků byl vybrán soubor vzorků v radioaktivní nerovnováze, vhodných pro datování metodou $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$, k výpočtu modelového stáří ^{210}Pb a izotopického stáří $^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$.

Koncentrace uranu a uranových ekvivalentů dceřiných radionuklidů se ve zkoumaných minerálech pohybují v širokém rozmezí 0,0066 % U (galenit) po 82,8 % U (uraninit). Zvýšené aktivity radionuklidů byly naměřeny také na mnoha minerálech uran neobsahujících: Pyromorfit, anglesit, goethit. Naproti tomu nízká aktivita byla překvapivě naměřena u vzorků cerusitu.

Mnoho sekundárních minerálů není v radioaktivní rovnováze, přičemž takřka výhradně převažuje uran nad radiem. V případě amorfních U-Pb oxidů byl tento poměr dokonce 1:1000, což ukazuje na velmi malé stáří. Opačný případ ($\text{Ra} > \text{U}$) vykázal pouze jediný vzorek (amorfní Mn-oxidy). Zatímco ostatní minerály tvoří v grafu U/Ra a Po/Ra klastry a jejich radionuklidové složení je relativně stabilní, právě jmenované Mn-oxidy vykázaly naopak velmi vysokou variabilitu a mají obsahy a poměry těchto radionuklidů velmi rozdílné.

Zajímavý je výskyt minerálů s neobvyklou izotopickou asociací. Minerál jarosit koncentruje přednostně dceřiné izotopy rozpadové řady ^{235}U (^{227}Ac , ^{227}Th a ^{223}Ra). Mladý minerál beudantit koncentruje izotopy ^{230}Th a ^{210}Po .

Pomocí izotopového poměru $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ byla stanovena stáří sekundárních minerálů uranu. Ta se pohybují v širokém rozmezí. Od etapy středně pleistocénní (kasolit $199,4 \pm 46,9$ ka), přes hranici středního a svrchního pleistocénu (metatorbernit $124,8 \pm 73$ ka), svrchně pleistocénní (zeunerit $45,6 \pm 8,7$ a $52,2 \pm 11$ ka) až po holocén (metaautunit a lodevit $7,1 \pm 1,7$ a $6,2 \pm 0,9$ ka).

Z izotopového páru $^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$ bylo vyčísleno stáří minerálu beudantitu 69,3 ($\pm 16,1$) roků a aktivita ^{210}Po indikuje stáří 108,1 ($\pm 9,0$) let. Metodou ^{210}Pb bylo rovněž vyčísleno stáří mladého wiedenmannitu na 115,9 ($\pm 15,6$) let. Tyto minerály jsou však již důsledkem antropogenní činnosti.

Nízký izotopický poměr $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ zjištěný u mladších sekundárních minerálů uranu hovoří o hlubokém vyloužení a dlouhodobé hypergenní alteraci výchozové partie březohorského polymetalického ložiska.

8. LITERATURA

- Bambas J., 1990. *Březohorský rudní revír. – Publ. symp. Hor. Příbram ve vědě a technice*. Příbram.
- Bland J.C., 1998. Choosing Fitting Functions to Describe Peak Tails in Alpha-particle Spectrometry. *Appl. Radiat. Isot.* Vol. 49, No. 9-11 1225-1229
- Bortels G., Collaers P., 1987. Analytical Function for Fitting peaks in Alpha-particle Spectra from Si Detectors. *Appl. Radiat. Isot.* 38 (10): 831-837
- Bortels G., Hurtgen C., Santry D., 1995. Nuclide analysis on Low-statistics Alpha-particle Spectra: An Experimental Verification for Pu Isotopes. *Appl. Radiat. Isot.* Vol. 46, No. 11 1135-1144
- Bourdon B., Henderson G.M., Lundstrom C.C., Turner S.P., 2003, Uranium-series Geochemistry. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*. Vol. 52, 656 str.
- Carl C., Meyer M., 1983. α -spectrometric investigations of radioactive disequilibrium in early precambrian quartz pebble conglomerates. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. Art., 81/2: 235-246
- Feigl M., 2003. *Aplikace nové metody pro alfaspektrometrické stanovení obsahu a izotopického složení uranu v hutních struskách, uranem barvených sklech a produktem jejich alterace*. MS diplomová práce, Ústav geochemie, mineralogie a nerostných zdrojů PřF UK, Praha, 44 str., 7 příl.
- Hála J., 1998. *Radioaktivita, ionizující záření, jaderná energie*. Konvoj, Brno, 309 str., 4 příl.
- Horwitz P.E., 1993. New Chromatographic Materials for Determinations of Actinides, Strontium, and Technetium in Environmental, Bioassay and Nuclear Waste Samples. *Chemistry Division, Argonne National Laboratory, Argonne IL*.
- <http://www.geoinformatics.upol.cz> 12.7.2007
- <http://www.unipress.waw.pl/fityk> 30.8.2007
- Chlupáč I. a kol., 2002. *Geologická minulost České republiky*. Academia, Praha, 436 str.
- Ivanovich M., Murray A., Harmon R.S., 1992. *Uranium-series disequilibrium: Applications to Earth, Marine and Environmental Sciences*. Clarendon Press, Oxford, str. 127-174
- Killeen P.G., Carmichael C.M., 1976. Determination of radioactive disequilibrium in uranium ores by alpha-spectrometry. *Paper-Geol. Survez of Canada*. 1-17, 38-75
- Katalog firmy ORTEC, 1994, *Modular Pulse-Processing Electronics and Semikonduktor Radiation Detectors*. str. 391-413
- Lippolt H.J., Brandner T., Mankopf N.R., 1998. An attempt to determine formation ages of goethites and limonites by (U+Th)-⁴He dating. *N. Jb. Miner. Mh.*, 505-528

- Löfvendhal R., Holm E., 1981: Radioactive disequilibria and apparent ages of secondary uranium minerals from Sweden. *Lithos*, Vol. 14, pp. 189-201. Oslo.
- Ludwig K.R., Simmons K.R., Szabo B.J., Winograd I.J., Landwehr J.M., Riggs A.C., Hoffman R.J., 1992. Mass-Spectrometric ^{230}Th - ^{234}U - ^{238}U Dating of the Devils Hole Calcite Vein. *Science*, Vol. 258, 284-287
- Majer V. et al., 1981. *Základy jaderné chemie*. SNTL, Praha, 612 str.
- Maxwell S.L., III, 1998. Rapid Actinide-Separations Methods. *Radioactivity & Radiochemistry*, Vol. 8, 36-44
- Moučka V., Gernt J., Matolín M et al. 1968. *Radiometrie, vybrané statě pro postgraduální studium užití geofyziky*. PřF UK, vlastním nákladem. Str. 38-48
- Noy R.C., Torano-García E., Mainegra E., López E., 2004. The WinALPHA code for the analysis of alpha-particle spectra. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research (Section A)*: 522-528
- Ondruš P., Hyršl J., 1989. New finds and revision of the secondary minerals from Příbram district. - *Acta Univ. Carol. (Prague)*, Geol., Czech Vol., 521-533.
- Richards D.A., Dorale J.A., 2003. Uranium-series Chronology and Environmental Applications of Speleothems. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*. Vol. 52, 407-450
- Sejkora, J., Čejka, J., Škácha, P., Gabašová, A., and Novotná, I., 2003: Minerály zippeitové skupiny z Jánské žíly, Březové Hory, Příbram. *Bull. Mineral.- Petrolog. Odd. Nár. Muz.*, Praha, 11, 183-189.
- Sill C.W., 1977. Determination of Thorium and Uranium Isotopes in Ores and Mill Tailings by Alpha Spectrometry. *Analytical Chemistry*. Vol. 49, No. 4, 618-621
- Škácha P., Sejkora J., 2001: Kasolit z Jánské žíly, Březové Hory, Příbram. *Bull. Mineral.- Petrolog. Odd. Nár. Muz. (Praha)*, **9**, 272-273.
- Škácha P., 2007. *Charakteristika uran-polymetalické mineralizace Jánské žíly a přerozdělení izotopů olova do sekundárních fází, Příbram – Březové Hory*. MS diplomová práce, ÚGMNZ PřF UK, Praha, 41 str., 4 příl.
- Wahl W., 2003. *Radionuclide-Handbook for Laboratory Workers in Spectrometry, Radiation Protection and Medicine*. ISuS, Schliersee, 130 str.
- Zahradník O., 2005. *Radioaktivní nerovnováha uranových rozpadových řad a její aplikace pro datování přírodních procesů*. MS bakalářská práce, ÚGMNZ PřF UK, Praha, 17 str.

PŘÍLOHY:

Příloha č. I:

Příprava vzorků pro měření metodou nedestruktivní alfaspektrometrie.

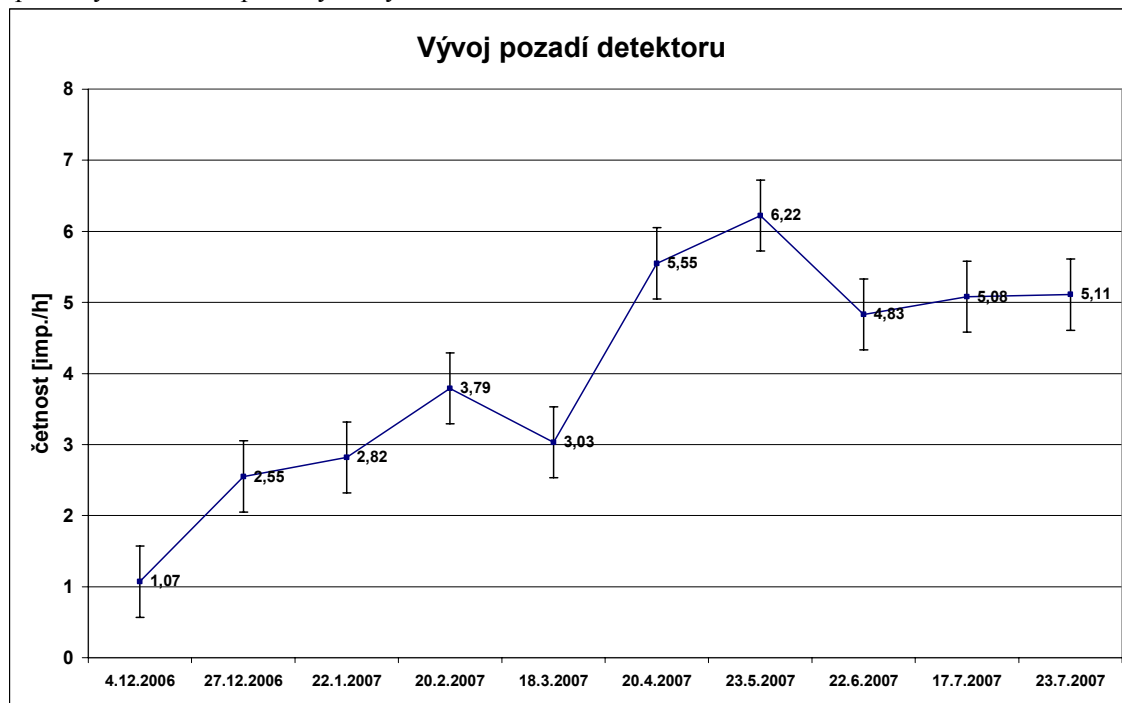
1. Nosič vzorku (dále disk) chemicky očištěný podle Fejgla (2003) na jedné straně naleštíme.
2. Vyhřejeme plotnu na 200°C a umístíme na ní naleštěný a označený disk (fixou z rubové strany), který necháme 10 minut nahřívat. Od této chvíle je nutné pro manipulaci s diskem používat pinzetu!!!
3. Po deseti minutách disk sejmeme a vložíme do Petriho misky, kde jej necháme po dobu 1 hodiny vychladnout na vzduchu v otevřené misce.
4. Poté disk zvážíme s přesností na setiny μg , toto vážení opakujeme pětkrát.
5. Na plotnu ohřátou na 200°C položíme disk a vyhřejeme.
6. Vzorek k alfaspektrometrii (nanesený na podložní mikroskopické sklíčko) naředíme deionizovanou vodou a na sklíčku zamícháme preparační jehlou či tenkou skleněnou tyčinkou.
7. Na mikropipetě nastavíme objem 300 μl a čistou špičkou opatrně nasajeme suspenzi ze vzorku. Počkáme, až hrubší částice suspenze ve špičce klesnou a tento sediment odkápneme zpět ke vzorku.
8. Těsně před nanesením vzorku umístíme na disk kapku deionizované vody. Bezprostředně po jejím odpaření nanášíme jemnozrnnou část vzorku ze špičky. Při odpařování vody ze vzorku suspenzi jemně skleněnou tyčinkou roztíráme do okrajů disku až do úplného odpaření. (Zde je třeba dbát na to, aby nedošlo ke kontaminaci boční či spodní části disku.). Snažíme se nanést množství vzorku v rozmezí 200 – 350 μg .
9. Po nanesení vzorku provedeme jeho vážení (stejným způsobem jako v bodě 4).
10. Disk je nyní připraven k měření na alfa detektoru.

Příloha č. II:

Vývoj pozadí alfa-detektoru v průběhu měření.

Během měření na alfa detektoru bylo průběžně měřeno pozadí okolí detektoru. Získané hodnoty byly potom odečítány od naměřených aktivit vzorků vždy v aktuálních hodnotách pro příslušné časové období. Na grafu je patrné zvyšování hodnot pozadí s narůstajícím časem měření. Způsobuje to zpětný odraz jader po alfa rozpadu, což má za následek kontaminaci detektoru.

Mírný pokles četnosti impulsů v období mezi 20.2.2007 a 18.3.2007 byl způsoben delší odstávkou aparatury v důsledku poruchy na vývěvě.



Graf četnosti impulsů pozadí platí pro energie v oblasti 2 – 10 MeV (ROI 2 – 10 MeV).

Příloha č. III:

Tabulka naměřených hodnot pozadí detektoru. V tabulce je uveden čas měření v hodinách, počty impulsů pro celkové okno, počty impulsů pro jednotlivá okna a jejich přepočet na aktivitu v mBq.

BKG 4.12.2006		R0 (2-10 Mev)	ROI 1	ROI 2	ROI 3	ROI 4	ROI 5	ROI 6	ROI 7	ROI 8
počet impulsů	izotop	celk. alfa akt.	238U	235U	234U	223Ra	210Po	222Rn+218Po+214Po	218Po	214Po
78,00	šířka okna [CH]	818	30	17	42	10	20	246	55	55
imp/hod.	šířka okna [keV]	8000	293,82	157,25	388,5	92,5	185	2409,324	538,67	538,67
1,07	count [imp]	78	6	4	5	0	0	30	3	9
čas (hod.)	sigma [%]	11,32	40,82	50,00	44,72	0	0	18,26	57,74	33,33
72,78	aktivita [cps]	0,000298	0,000023	0,000015	0,000019	0,000000	0,000000	0,000115	0,000011	0,000034
	aktivita [mBq]	0,2977	0,0229	0,0153	0,0191	0,0000	0,0000	0,1145	0,0115	0,0344
BKG 27.12.2006		R0 (2-10 Mev)	ROI 1	ROI 2	ROI 3	ROI 4	ROI 5	ROI 6	ROI 7	ROI 8
počet impulsů	izotop	celk. alfa akt.	238U	235U	234U	223Ra	210Po	222Rn+218Po+214Po	218Po	214Po
297,00	šířka okna [CH]	818	30	17	42	10	20	246	55	55
imp/hod.	šířka okna [keV]	8000	293,82	157,25	388,5	92,5	185	2409,324	538,67	538,67
2,55	count [imp]	297	29	15	21	3	12	60	19	18
čas (hod.)	sigma [%]	5,80	18,57	25,82	21,82	57,74	28,87	12,91	22,94	23,57
116,25	aktivita [cps]	0,000710	0,000069	0,000036	0,000050	0,000007	0,000029	0,000143	0,000045	0,000043
	aktivita [mBq]	0,7097	0,0693	0,0358	0,0502	0,0072	0,0287	0,1434	0,0454	0,0430
BKG 21.1.2007		R0 (2-10 Mev)	ROI 1	ROI 2	ROI 3	ROI 4	ROI 5	ROI 6	ROI 7	ROI 8
počet impulsů	izotop	celk. alfa akt.	238U	235U	234U	223Ra	210Po	222Rn+218Po+214Po	218Po	214Po
204,00	šířka okna [CH]	818	30	17	42	10	20	246	55	55
imp/hod.	šířka okna [keV]	8000	293,82	157,25	388,5	92,5	185	2409,324	538,67	538,67
2,82	count [imp]	204	17	11	18	5	8	49	27	12
čas (hod.)	sigma [%]	7,00	24,25	30,15	23,57	44,72	35,36	14,29	19,25	28,87
72,42	aktivita [cps]	0,000782	0,000065	0,000042	0,000069	0,000019	0,000031	0,000188	0,000104	0,000046
	aktivita [mBq]	0,7825	0,0652	0,0422	0,0690	0,0192	0,0307	0,1880	0,1036	0,0460
BKG 20.2.2007		R0 (2-10 Mev)	ROI 1	ROI 2	ROI 3	ROI 4	ROI 5	ROI 6	ROI 7	ROI 8
počet impulsů	izotop	celk. alfa akt.	238U	235U	234U	223Ra	210Po	222Rn+218Po+214Po	218Po	214Po
419,00	šířka okna [CH]	818	30	17	42	10	20	246	55	55
imp/hod.	šířka okna [keV]	8000	293,82	157,25	388,5	92,5	185	2409,324	538,67	538,67
3,79	count [imp]	419	38	20	29	6	18	132	50	49
čas (hod.)	sigma [%]	4,89	16,22	22,36	18,57	40,82	23,57	8,70	14,14	14,29
110,59	aktivita [cps]	0,001052	0,000095	0,000050	0,000073	0,000015	0,000045	0,000332	0,000126	0,000123
	aktivita [mBq]	1,0525	0,0955	0,0502	0,0728	0,0151	0,0452	0,3316	0,1256	0,1231
BKG 18.3.2007		R0 (2-10 Mev)	ROI 1	ROI 2	ROI 3	ROI 4	ROI 5	ROI 6	ROI 7	ROI 8
počet impulsů	izotop	celk. alfa akt.	238U	235U	234U	223Ra	210Po	222Rn+218Po+214Po	218Po	214Po
239,00	šířka okna [CH]	818	30	17	42	10	20	246	55	55
imp/hod.	šířka okna [keV]	8000	293,82	157,25	388,5	92,5	185	2409,324	538,67	538,67
3,03	count [imp]	239	28	22	24	4	15	39	12	11
čas (hod.)	sigma [%]	6,47	18,90	21,32	20,41	50,00	25,82	16,01	28,87	30,15
78,83	aktivita [cps]	0,000842	0,000099	0,000078	0,000085	0,000014	0,000053	0,000137	0,000042	0,000039
	aktivita [mBq]	0,8421	0,0987	0,0775	0,0846	0,0141	0,0529	0,1374	0,0423	0,0388
BKG 20.4.2007		R0 (2-10 Mev)	ROI 1	ROI 2	ROI 3	ROI 4	ROI 5	ROI 6	ROI 7	ROI 8
počet impulsů	izotop	celk. alfa akt.	238U	235U	234U	223Ra	210Po	222Rn+218Po+214Po	218Po	214Po
758,00	šířka okna [CH]	818	30	17	42	10	20	246	55	55
imp/hod.	šířka okna [keV]	8000	293,82	157,25	388,5	92,5	185	2409,324	538,67	538,67
5,55	count [imp]	758	63	38	72	16	32	184	54	38
čas (hod.)	sigma [%]	3,63	12,60	16,22	11,79	25,00	17,68	7,37	13,61	16,22
136,67	aktivita [cps]	0,001541	0,000128	0,000077	0,000146	0,000033	0,000065	0,000374	0,000110	0,000077
	aktivita [mBq]	1,5406	0,1280	0,0772	0,1463	0,0325	0,0650	0,3740	0,1098	0,0772
BKG 23.5.2007		R0 (2-10 Mev)	ROI 1	ROI 2	ROI 3	ROI 4	ROI 5	ROI 6	ROI 7	ROI 8
počet impulsů	izotop	celk. alfa akt.	238U	235U	234U	223Ra	210Po	222Rn+218Po+214Po	218Po	214Po
447,00	šířka okna [CH]	818	30	17	42	10	20	246	55	55
imp/hod.	šířka okna [keV]	8000	293,82	157,25	388,5	92,5	185	2409,324	538,67	538,67
6,22	count [imp]	447	43	19	40	13	18	114	33	18
čas (hod.)	sigma [%]	4,73	15,25	22,94	15,81	27,74	23,57	9,37	17,41	23,57
71,91	aktivita [cps]	0,001727	0,000166	0,000073	0,000155	0,000050	0,000070	0,000440	0,000127	0,000070
	aktivita [mBq]	1,7267	0,1661	0,0734	0,1545	0,0502	0,0695	0,4404	0,1275	0,0695
BKG 22.6.2007		R0 (2-10 Mev)	ROI 1	ROI 2	ROI 3	ROI 4	ROI 5	ROI 6	ROI 7	ROI 8
počet impulsů	izotop	celk. alfa akt.	238U	235U	234U	223Ra	210Po	222Rn+218Po+214Po	218Po	214Po
114,00	šířka okna [CH]	818	30	17	42	10	20	246	55	55
imp/hod.	šířka okna [keV]	8000	293,82	157,25	388,5	92,5	185	2409,324	538,67	538,67
4,83	count [imp]	114	4	4	11	3	6	30	10	10
čas (hod.)	sigma [%]	9,37	50,00	50,00	30,15	57,74	40,82	18,26	31,62	31,62
23,62	aktivita [cps]	0,001341	0,000047	0,000047	0,000129	0,000035	0,000071	0,000353	0,000118	0,000118
	aktivita [mBq]	1,3408	0,0470	0,0470	0,1294	0,0353	0,0706	0,3528	0,1176	0,1176
BKG 17.7.2007		R0 (2-10 Mev)	ROI 1	ROI 2	ROI 3	ROI 4	ROI 5	ROI 6	ROI 7	ROI 8
počet impulsů	izotop	celk. alfa akt.	238U	235U	234U	223Ra	210Po	222Rn+218Po+214Po	218Po	214Po
749,00	šířka okna [CH]	818	30	17	42	10	20	246	55	55
imp/hod.	šířka okna [keV]	8000	293,82	157,25	388,5	92,5	185	2409,324	538,67	538,67
5,08	count [imp]	749	80	37	84	23	33	174	61	37
čas (hod.)	sigma [%]	3,65	11,18	16,44	10,91	20,85	17,41	7,58	12,80	16,44
147,43	aktivita [cps]	0,001411	0,000151	0,000070	0,000158	0,000043	0,000062	0,000328	0,000115	0,000070
	aktivita [mBq]	1,4112	0,1507	0,0697	0,1583	0,0433	0,0622	0,3278	0,1149	0,0697
BKG 23.7.2007		R0 (2-10 Mev)	ROI 1	ROI 2	ROI 3	ROI 4	ROI 5	ROI 6	ROI 7	ROI 8
počet impulsů	izotop	celk. alfa akt.	238U	235U	234U	223Ra	210Po	222Rn+218Po+214Po	218Po	214Po
364,00	šířka okna [CH]	818	30	17	42	10	20	246	55	55
imp/hod.	šířka okna [keV]	8000	293,82	157,25	388,5	92,5	185	2409,324	538,67	538,67
5,11	count [imp]	364	31	11	43	12	14	104	37	12
čas (hod.)	sigma [%]	5,24	17,96	30,15	15,25	28,87	26,73	9,81	16,44	28,87
71,28	aktivita [cps]	0,001419	0,000121	0,000043	0,000168	0,000047	0,000055	0,000405	0,000144	0,000047
	aktivita [mBq]	1,4186	0,1208	0,0429	0,1676	0,0468	0,0546	0,4053	0,1442	0,0468

Příloha č. IV:

Příprava vzorků pro měření metodou destruktivní alfaspektrometrie.

1. Provedeme kyselinový rozklad naváženého vzorku uranového minerálu. Vypočteme jeho objemovou aktivitu (1 mg U = 12,35 Bq).
2. Opipetujeme předem spočítaný objem vzorku o aktivitě přibližně 1 Bq a přidáme k němu vnitřní standard $^{232}\text{U}/^{228}\text{Th}$ o známé podobné aktivitě (1 Bq).
3. Vzorek odpaříme v teflonové kádince do sucha a přidáme 4 ml roztoku 0,5M $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ ve 4M HNO_3 , vzniklou směs mírně zahřejeme.
4. Do stojánku upevníme prázdnou separační kolonku, kterou promyjeme postupně deionizovanou vodou (přibližně 10 ml) a stejným objemem ethanolu.
5. Naplníme kolonku vodnou suspenzí sorbentu UTEVA[®] do sedimentované výšky 20 (± 1) mm. Promyjeme 5 ml vody a 15 ml 3M HNO_3 do vyprázdnění kolony (dojde k aktivaci sorbentu).
6. Vychladlý vzorek nalijeme do kolonky a necháme protéct. Poté kolonku promyjeme 15 ml 3M HNO_3 (dojde k sorpci a fixaci U a Th).
7. Po promytí do kolonky pipetou přidáme 1 ml 6M HCl, tuto frakci vylijeme do odpadu (dochází k rozdělení U a Th ve sloupci sorbentu).
8. Promýváme 5 ml 6M HCl (celý objem promývacího roztoku aplikujeme naráz) – roztok jímáme - separujeme thoriovou frakci.
9. Po této separaci promyjeme kolonku 7 ml 5M HCl, vylijeme do odpadu (dochází k vyčištění od zbytku Th).
10. Promýváme kolonku 15 ml 0,02M HCl (naráz), roztok jímáme. Získáme uranovou frakci.
11. K roztokům obou frakcí přidáme po 1 ml 0,3M Na_2SO_4 a v teflonové kádince odpaříme na plotně do sucha (dojde k odkouření zbylé HCl a chloridů).
12. Odparky rozpustíme ve 300 μl koncentrované H_2SO_4 , přidáme 2,5 ml deionizované vody a pomocí amoniaku pH upravíme na 2,2. Přesné nastavení pH roztoků kontrolujeme směsným indikátorem (0,04 % metakresolového purpuru + 0,04 % kresolové červeně v ethanolu + kapka amoniaku.) Barevný přechod je z fialové do sytě žluté = pH 2.2.
13. Ke vzorkům přidáme po 5 ml síranového pufru (0,3 M Na_2SO_4 + konc. H_2SO_4 do pH 1,6).
14. Takto získané roztoky převedeme do elektrodepoziční cely.
15. Elektrodepozice probíhá cca 1 hodinu při plošném proudu 0,22 A/cm^2 pro uranovou frakci a 0,34 A/cm^2 pro thoriovou frakci. Minusový pól připojíme k nosiči vzorku (disku), plusový pól na Pt-Ir elektrodu.
16. Po skončení elektrodepozice odpojíme přívod proudu, elektrolyt okamžitě vylijeme a opatrně propláchneme celou roztokem amoniaku a vody (1:1).
17. Vyjmeme opatrně disky a opět opláchneme vodným roztokem amoniaku (1:1) a dáme vysušit na plotnu vyhřátou na teplotu 60 – 80 °C.
18. Takto připravené vzorky pak měříme na alfaspektrometrické aparatuře.

Příloha č.V:

Navážky vzorků pro měření metodou nedestruktivní alfaspektrometrie.

JANSKA ZILA 1. SERIE - VZORKY PRO NEDESTRUKTIVNI ALFA SPEKTROMETRII										
prázdné										
vzo rek	1	2	3	4	5	8	9	10	11	12
	2J4_1	1J2_2	2J2_2	2J2_3B	1J3_1B	2J5_1	J_6	1J1_1	1J1_7	1J1_5
	kasolit	kasolit	anglesit	kasolit	masuyit	metaautunit	metatorbernit	ZnAsOUO	nová fáze	nová fáze
1	2,96029	2,96483	2,84429	2,96042	2,94635	2,94717	2,97963	2,95409	2,95662	2,98292
2	2,96028	2,96484	2,84428	2,96042	2,94634	2,94717	2,97963	2,9541	2,95662	2,98291
3	2,96028	2,96485	2,84429	2,96041	2,94634	2,94716	2,97962	2,9541	2,95663	2,98291
4	2,96029	2,96484	2,8443	2,96041	2,94635	2,94718	2,97963	2,95409	2,95663	2,98292
5	2,96028	2,96483	2,84429	2,96041	2,94635	2,94717	2,97963	2,9541	2,95663	2,98292
průměr	2,960284	2,964838	2,84429	2,960414	2,946346	2,94717	2,979628	2,954096	2,956626	2,982916
std.	4,89898E-06	7,48331E-06	6,32456E-06	4,89898E-06	4,89898E-06	6,32456E-06	4E-06	4,89898E-06	4,89898E-06	4,89898E-06
plné										
vzo rek	1	2	3	4	5	8	9	10	11	12
1	2,9604	2,96499	2,84446	2,96071	2,94636	2,94732	2,97973	2,9543	2,95669	2,98306
2	2,96041	2,965	2,84444	2,96071	2,94637	2,94732	2,97973	2,95431	2,9567	2,98305
3	2,96039	2,96501	2,84444	2,9607	2,94636	2,94733	2,97973	2,9543	2,9567	2,98306
4	2,96041	2,965	2,84444	2,96069	2,94635	2,94732	2,97972	2,95431	2,95669	2,98306
5	2,96039	2,96501	2,84445	2,96071	2,94637	2,94733	2,97972	2,9543	2,95669	2,98305
průměr	2,9604	2,965002	2,844446	2,960704	2,946362	2,947324	2,979726	2,954304	2,956694	2,983056
std.	8,94427E-06	7,48331E-06	8E-06	8E-06	7,48331E-06	4,89898E-06	4,89898E-06	4,89898E-06	4,89898E-06	4,89898E-06
navážka [mg]	0,116	0,164	0,156	0,29	0,016	0,154	0,098	0,208	0,068	0,14
std. [mg]	0,0138	0,0150	0,0143	0,0129	0,0124	0,0112	0,0089	0,0098	0,0098	0,0098
std. [%]	11,9	9,1	9,2	4,4	77,4	7,3	9,1	4,7	14,4	7,0

JANSKA ZILA 1. SERIE - VZORKY PRO NEDESTRUKTIVNI ALFA SPEKTROMETRII										
Prázdné										
vzo rek	13	14	15	16	17	19	20	21	22	23
	2J2_1	1J2_5	2J1_1	2J1_5	1J1_8	2J1_3(1)	8J1	J1	2J2_10A	1J2_1B
	widenmannit	widenmannit	cerusit	mangan. ox.	beudantit	pyromorfit	uraninit	uraninit	gummit	reziduum
1	2,88311	2,98652	2,86735	2,96263	2,94846	2,84953	2,96891	2,96028	2,93566	2,97115
2	2,88311	2,98652	2,86736	2,96263	2,94846	2,84953	2,96891	2,96028	2,93566	2,97114
3	2,88312	2,98651	2,86736	2,96262	2,94845	2,84952	2,96892	2,96029	2,93565	2,97114
4	2,88312	2,98651	2,86737	2,96262	2,94846	2,84953	2,96891	2,96029	2,93565	2,97115
5	2,88312	2,98651	2,86736	2,96262	2,94845	2,84952	2,96891	2,96029	2,93565	2,97114
průměr	2,883116	2,986514	2,86736	2,962624	2,948456	2,849526	2,968912	2,960286	2,935664	2,971144
std.	4,89898E-06	4,89898E-06	6,32456E-06	4,89898E-06	4,89898E-06	4,89898E-06	4E-06	4,89898E-06	4,89898E-06	4,89898E-06
plné										
vzo rek	1	2	3	4	5	8	9	10	11	12
1	2,8833	2,98671	2,86746	2,96278	2,9486	2,84966	2,96928	2,96051	2,93603	2,97132
2	2,88331	2,98671	2,86745	2,96278	2,9486	2,84967	2,96928	2,96051	2,93603	2,97132
3	2,88331	2,98672	2,86746	2,96277	2,9486	2,84966	2,96928	2,9605	2,93603	2,97132
4	2,88332	2,98672	2,86747	2,96278	2,94859	2,84967	2,96929	2,96051	2,93603	2,97132
5	2,88331	2,98671	2,86745	2,96278	2,9486	2,84967	2,96929	2,96051	2,93603	2,97131
průměr	2,88331	2,986714	2,867458	2,962778	2,948598	2,849666	2,969284	2,960508	2,93603	2,971318
std.	6,32456E-06	4,89898E-06	7,48331E-06	4E-06	4E-06	4,89898E-06	4,89898E-06	4E-06	0	4E-06
navážka [mg]	0,194	0,2	0,098	0,154	0,142	0,14	0,372	0,222	0,376	0,174
std. [mg]	0,0112	0,0098	0,0138	0,0089	0,0089	0,0098	0,0089	0,0089	0,0049	0,0089
std. [%]	5,8	4,9	14,1	5,8	6,3	7,0	2,4	4,0	1,3	5,1

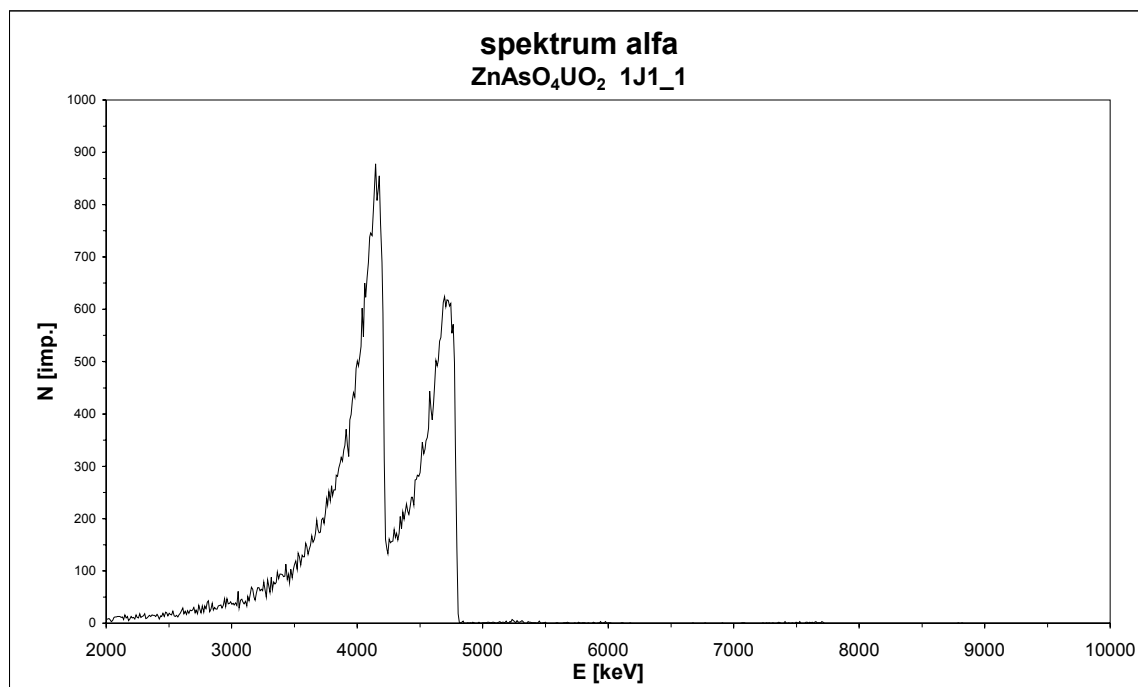
JANSKA ŽILA 2. SÉRIE - VZORKY PRO NEDESTRUKTIVNÍ ALFA SPEKTROMETRII										
Prázdňé										
vzo rek	24	25	27	28	29	30	31	32	33	34
	2J1_4	1J4_2	2J5_3	2J5_4	2J5_5	2J5_9	2J2_12	2J2_11	2J5_8	2J5_6
	pyromorfit	Mn-oxidy	Mn-oxidy	Mn-oxidy	"přímazek"	Mn-oxidy	galenit	amorf. U-sek.	uraninit	jarosit
1	2,98225	2,97875	2,95243	2,96287	2,95456	2,95166	2,99286	2,94471	2,9659	2,95081
2	2,98225	2,97874	2,95244	2,96287	2,95456	2,95166	2,99286	2,94471	2,9659	2,95081
3	2,98225	2,97874	2,95243	2,96287	2,95455	2,95166	2,99286	2,94471	2,9659	2,95081
4	2,98224	2,97874	2,95243	2,96286	2,95456	2,95166	2,99286	2,94472	2,96589	2,95081
5	2,98224	2,97874	2,95243	2,96286	2,95455	2,95165	2,99287	2,94471	2,96589	2,9508
průměr	2,982246	2,978742	2,952432	2,962866	2,954556	2,951658	2,992862	2,944712	2,965896	2,950806
std.	4,89898E-06	4E-06	4E-06	4,89898E-06	4,89898E-06	4E-06	4E-06	4E-06	4,89898E-06	4,89898E-06
plňé										
vzo rek										
1	2,98229	2,97901	2,95306	2,96339	2,95507	2,95201	2,99517	2,94522	2,96619	2,95127
2	2,98229	2,97901	2,95306	2,96339	2,95507	2,95201	2,99517	2,94522	2,96619	2,95126
3	2,9823	2,97901	2,95306	2,96339	2,95506	2,95201	2,99516	2,94522	2,96619	2,95126
4	2,9823	2,97901	2,95305	2,96338	2,95506	2,952	2,99517	2,94522	2,9662	2,95127
5	2,98229	2,97901	2,95305	2,96338	2,95506	2,952	2,99516	2,94521	2,96619	2,95127
průměr	2,982294	2,97901	2,953056	2,963386	2,955064	2,952006	2,995166	2,945218	2,966192	2,951266
std.	4,89898E-06	0	4,89898E-06	4,89898E-06	4,89898E-06	4,89898E-06	4,89898E-06	4E-06	4E-06	4,89898E-06
navážka [mg]	0,048	0,268	0,624	0,52	0,508	0,348	2,304	0,506	0,296	0,46
std. [mg]	0,0098	0,0040	0,0089	0,0098	0,0098	0,0089	0,0089	0,0080	0,0089	0,0098
std. [%]	20,4	1,5	1,4	1,9	1,9	2,6	0,4	1,6	3,0	2,1

JANSKA ŽILA 2. SÉRIE - VZORKY PRO NEDESTRUKTIVNÍ ALFA SPEKTROMETRII									
Prázdňé									
vzo rek	35	36	37	38	39	40	41	42	
	2J5_7	1J5_2	1J5_1	J_9	1J1_9	1J1_10	2J2_13	2J5_10	
	jarosit	pyromorfit	pyromorfit	zink zippeit	galenit	limonit	cerusit	uraninit	
1	2,97699	2,9616	2,93674	2,95789	2,95473	2,95665	2,9777	2,9481	
2	2,97699	2,9616	2,93674	2,95789	2,95473	2,95664	2,9777	2,9481	
3	2,97699	2,9616	2,93674	2,95789	2,95473	2,95665	2,9777	2,94811	
4	2,97699	2,96161	2,93674	2,95789	2,95473	2,95664	2,97769	2,9481	
5	2,97698	2,96161	2,93674	2,95789	2,95473	2,95665	2,9777	2,94811	
průměr	2,976988	2,961604	2,93674	2,95789	2,95473	2,956646	2,977698	2,948104	
std.	4E-06	4,89898E-06	0	0	0	4,89898E-06	4E-06	4,89898E-06	
plňé									
vzo rek									
1	2,97768	2,96225	2,93727	2,95791	2,95489	2,95689	2,97775	2,94832	
2	2,97767	2,96225	2,93727	2,95791	2,95488	2,95688	2,97775	2,94831	
3	2,97767	2,96224	2,93728	2,95792	2,95488	2,95688	2,97774	2,94832	
4	2,97768	2,96224	2,93728	2,95792	2,95489	2,95689	2,97774	2,94832	
5	2,97768	2,96225	2,93728	2,95792	2,95489	2,95689	2,97774	2,94831	
průměr	2,977676	2,962246	2,937276	2,957916	2,954886	2,956886	2,977744	2,948316	
std.	4,89898E-06	4,89898E-06	4,89898E-06	4,89898E-06	4,89898E-06	4,89898E-06	4,89898E-06	4,89898E-06	
navážka [mg]	0,688	0,642	0,536	0,026	0,156	0,24	0,046	0,212	
std. [mg]	0,0089	0,0098	0,0049	0,0049	0,0049	0,0098	0,0089	0,0098	
std. [%]	1,3	1,5	0,9	18,8	3,1	4,1	19,3	4,6	

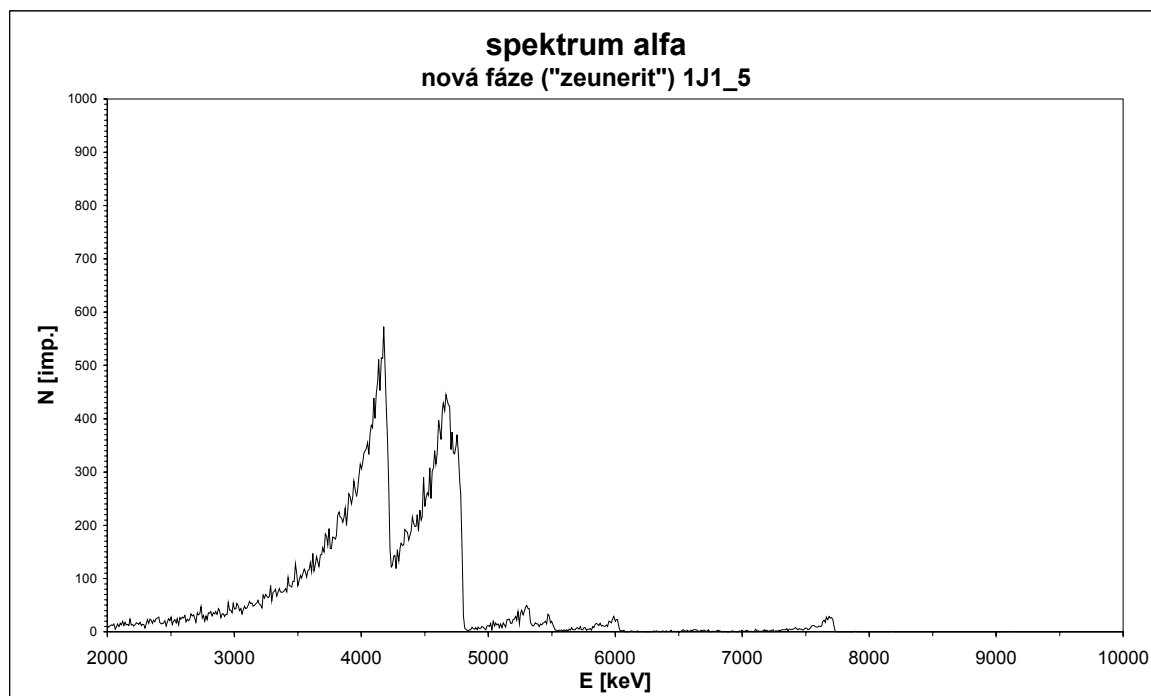
Příloha č.VI:

Alfa spektra vzorků Jánské žily – nedestruktivní alfaspektrometrie.

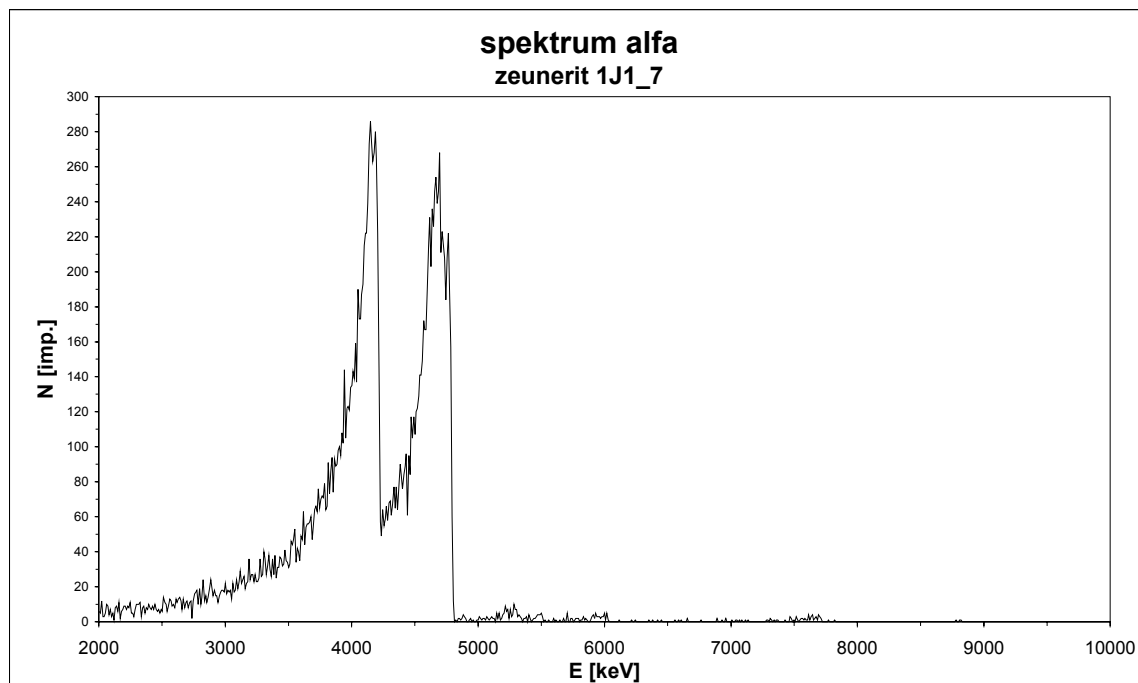
spektrum lodevitu - 1J1_1 ve stavu radioaktivní nerovnováhy, obsah rádia je téměř nulový



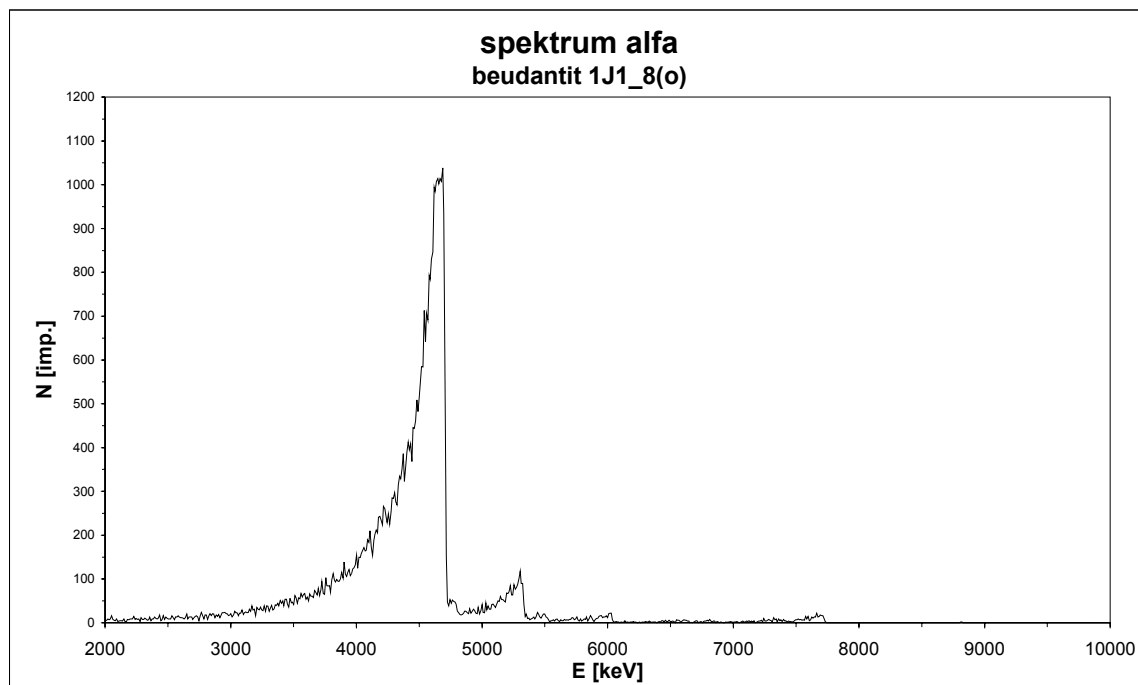
spektrum zeuneritu – 1J1_5 ve stavu radioaktivní nerovnováhy, uran značně převažuje nad rádiem, nízké aktivity rádia a polonia ukazují na nevelké stáří vzorku



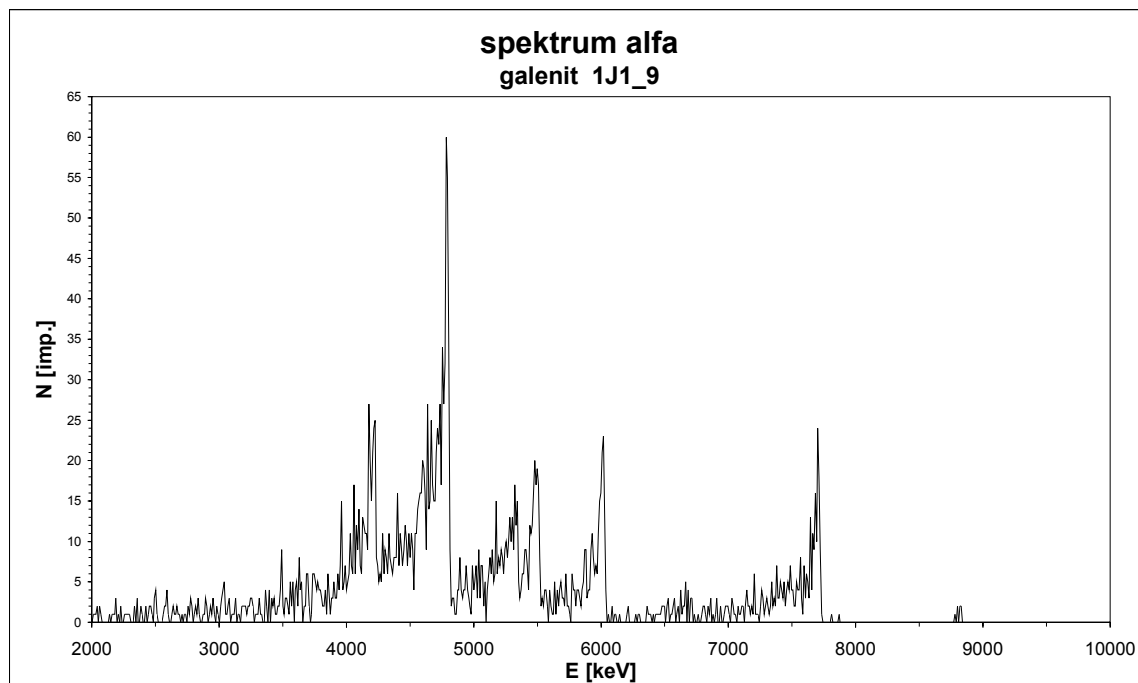
spektrum zeuneritu – 1J1_7 ve stavu radioaktivní nerovnováhy, obsah rádia je blízky nule



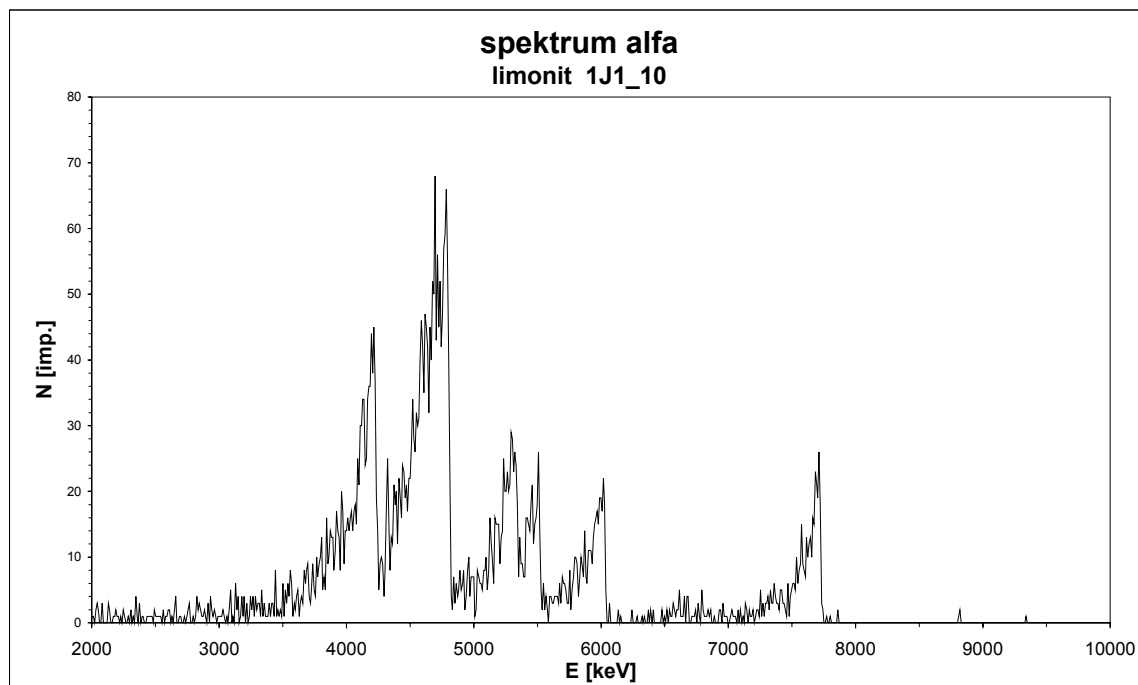
spektrum beudantitu - 1J1_8 ve stavu radioaktivní nerovnováhy, u tohoto vzorku není přítomen uran, thorium značně převažuje nad ^{210}Po , aktivita ^{226}Ra je blízka nule



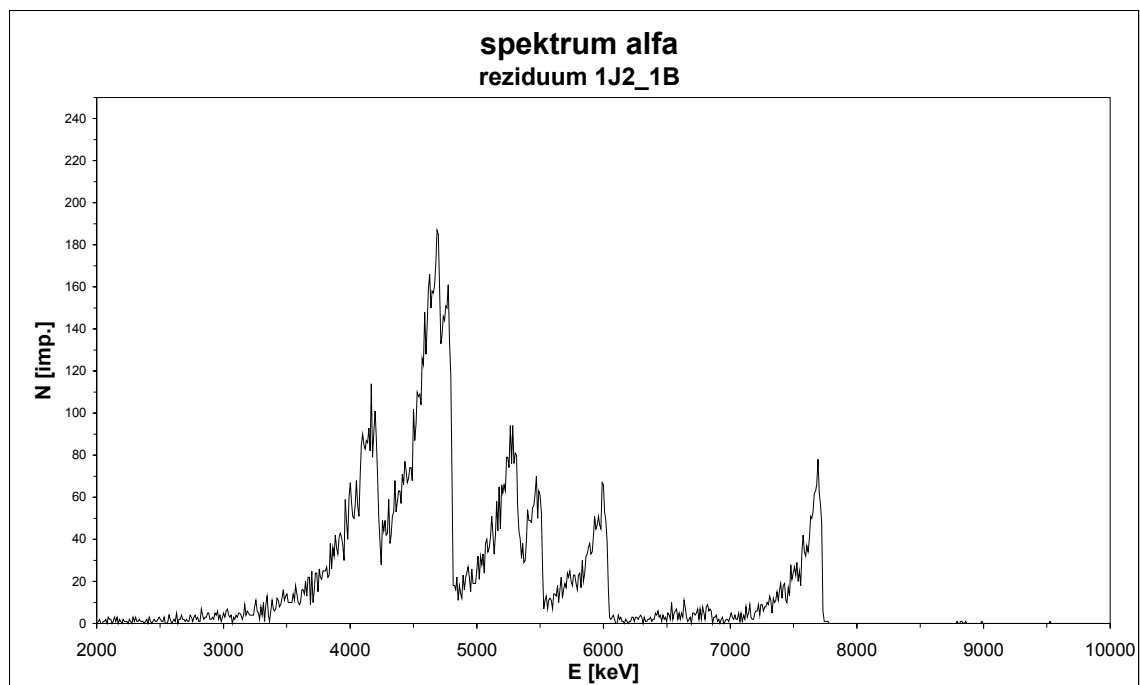
spektrum galenitu - 1J1_9 vzorek se patrně nachází ve stavu radioaktivní rovnováhy, vzhledem k nízké aktivitě vzorku však rovnováhu nelze s jistotou určit



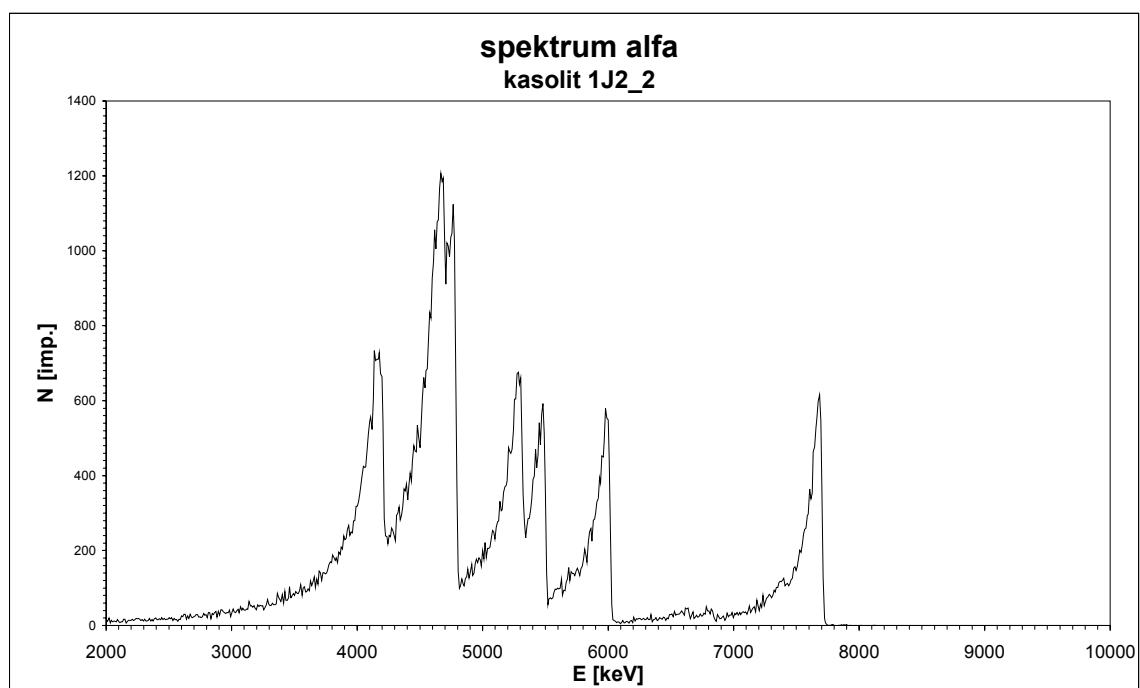
spektrum hydratovaných oxidů železa – 1J1_10 vzhledem k nízké aktivitě nelze radioaktivní rovnováhu přesně určit, pravděpodobně je tento vzorek rovnovážný s nízkým koeficientem emanace



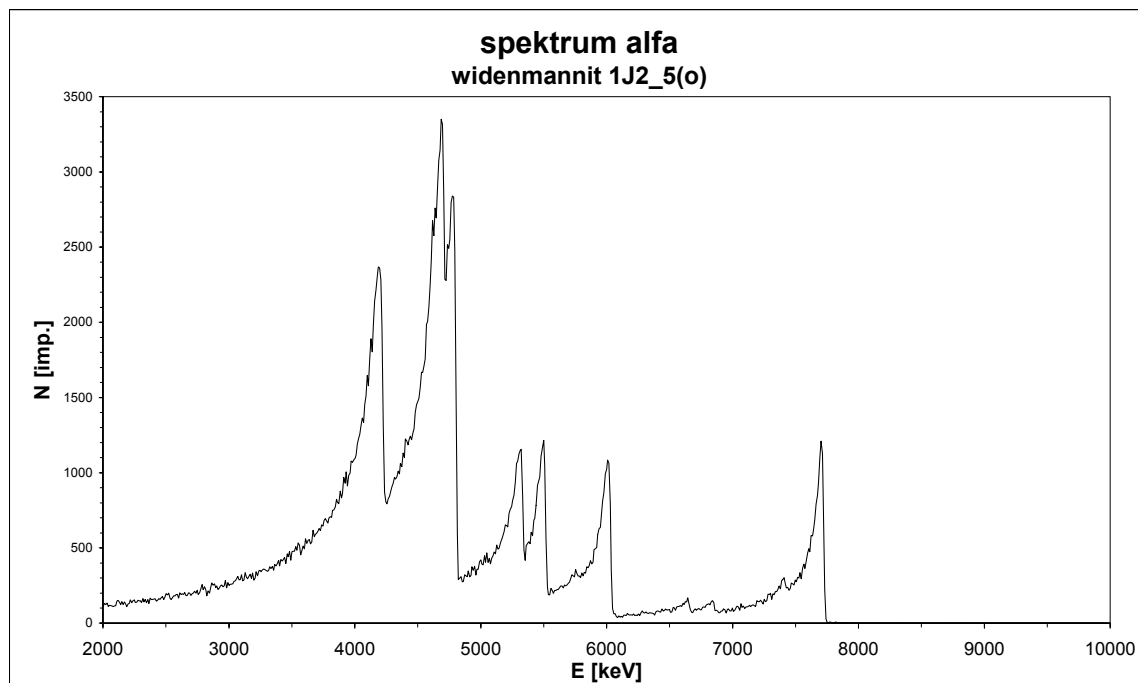
spektrum goethitu s kasolitem - 1J2_1B v rovnovážném stavu s nízkým koeficientem emanace



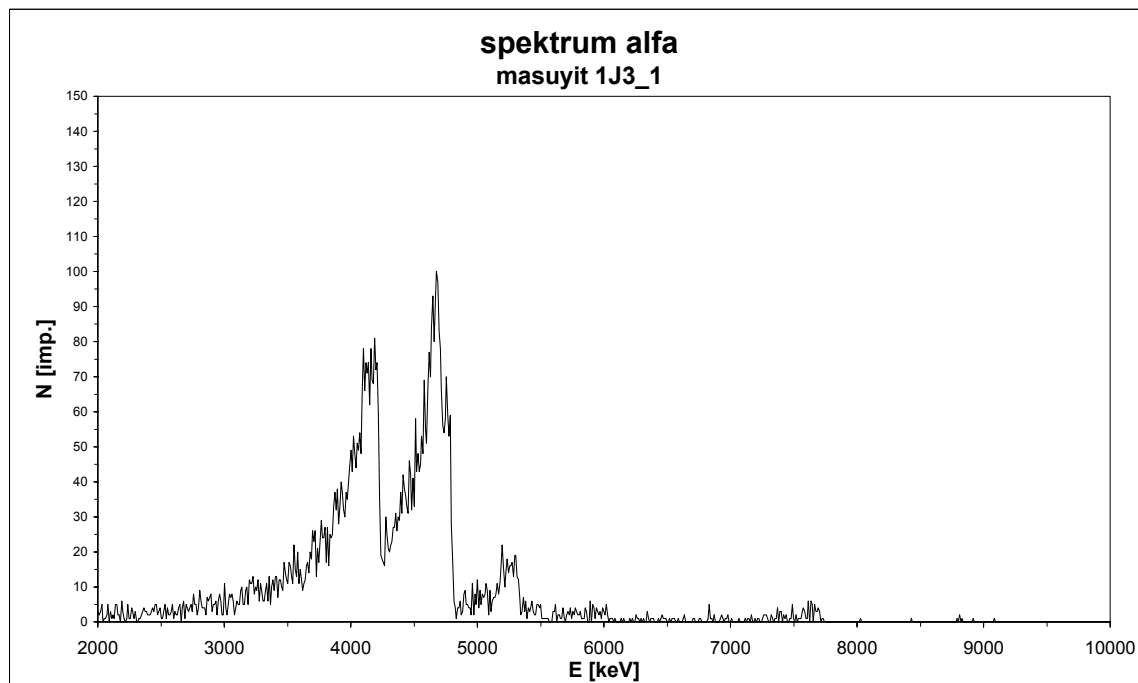
spektrum kasolitu – 1J2_2 ve stavu blízkému radioaktivní rovnováže



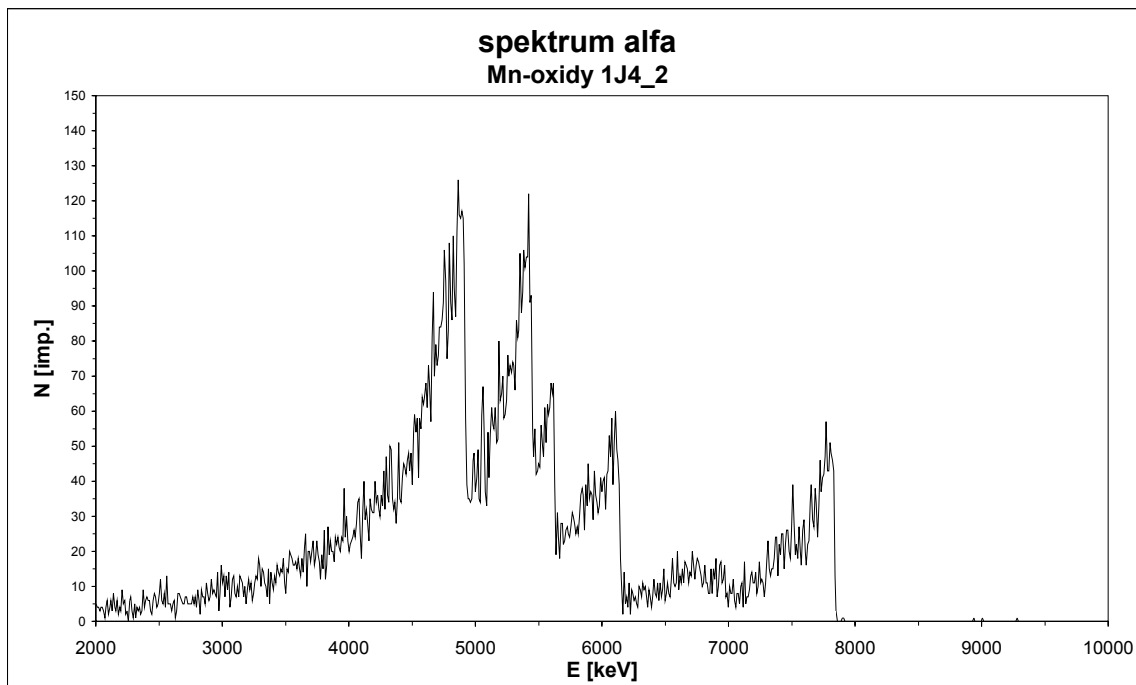
spektrum widenmannitu - 1J2_5 ve stavu blízkém radioaktivní rovnováze, zvýšené intenzity energetických linií dceřinných izotopů ^{235}U ukazují na zvýšený koeficient emanace



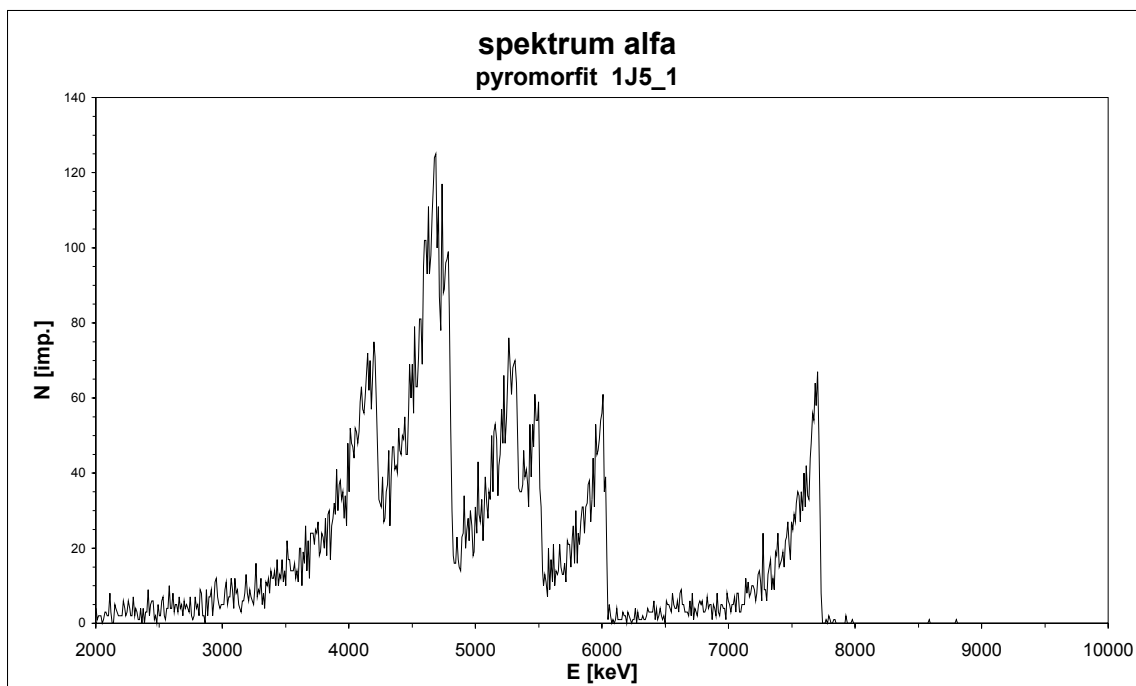
spektrum masuyitu – 1J3_1 ve stavu radioaktivní nerovnováhy, nelze přesně stanovit kvůli nízké aktivitě vzorku



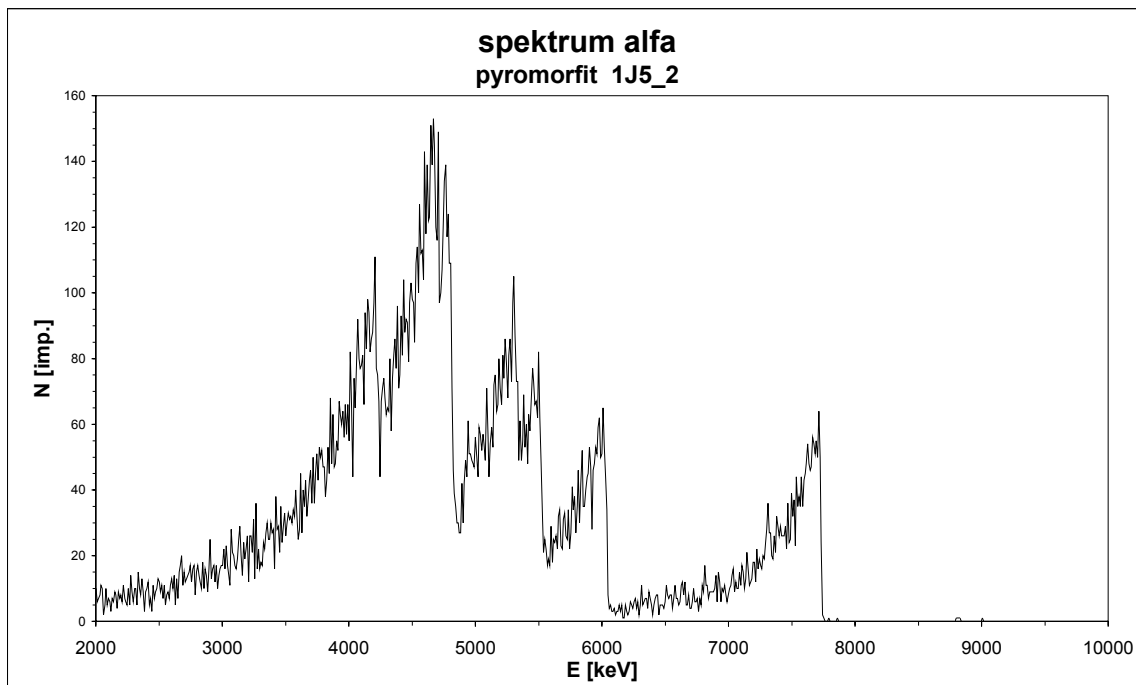
spektrum manganových oxidů - 1J4_2 tento vzorek neobsahuje uran, patrný zvýšený koeficient emanace



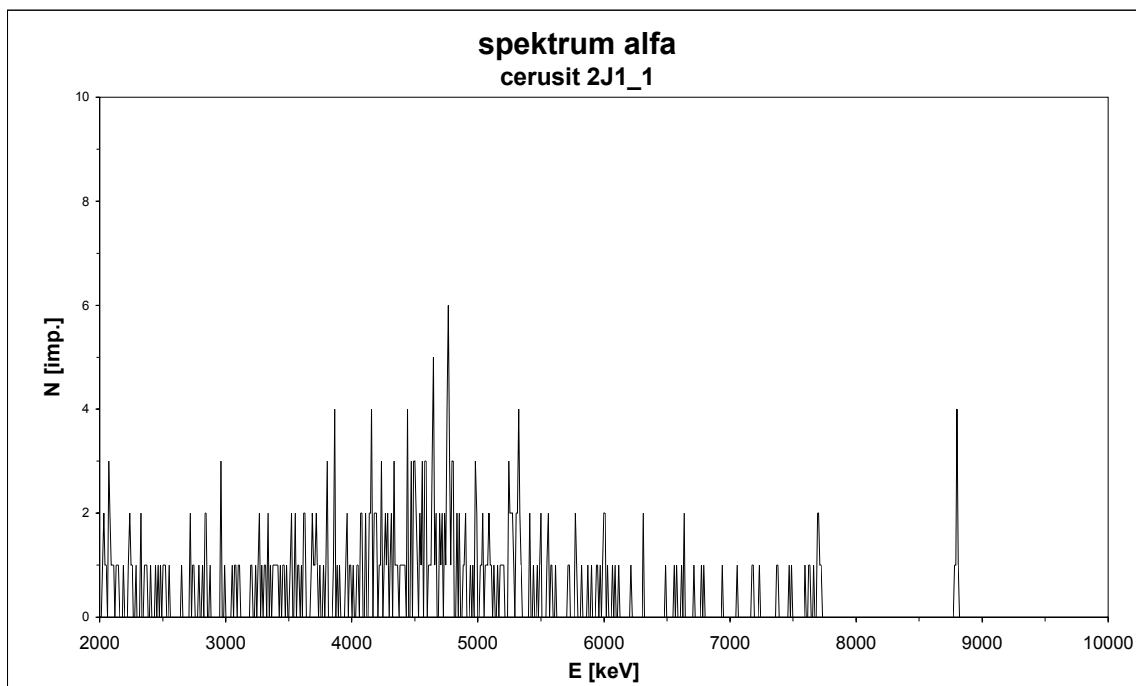
spektrum pyromorfitu – 1J5_1 ve stavu radioaktivní rovnováhy, slabě aktivní vzorek



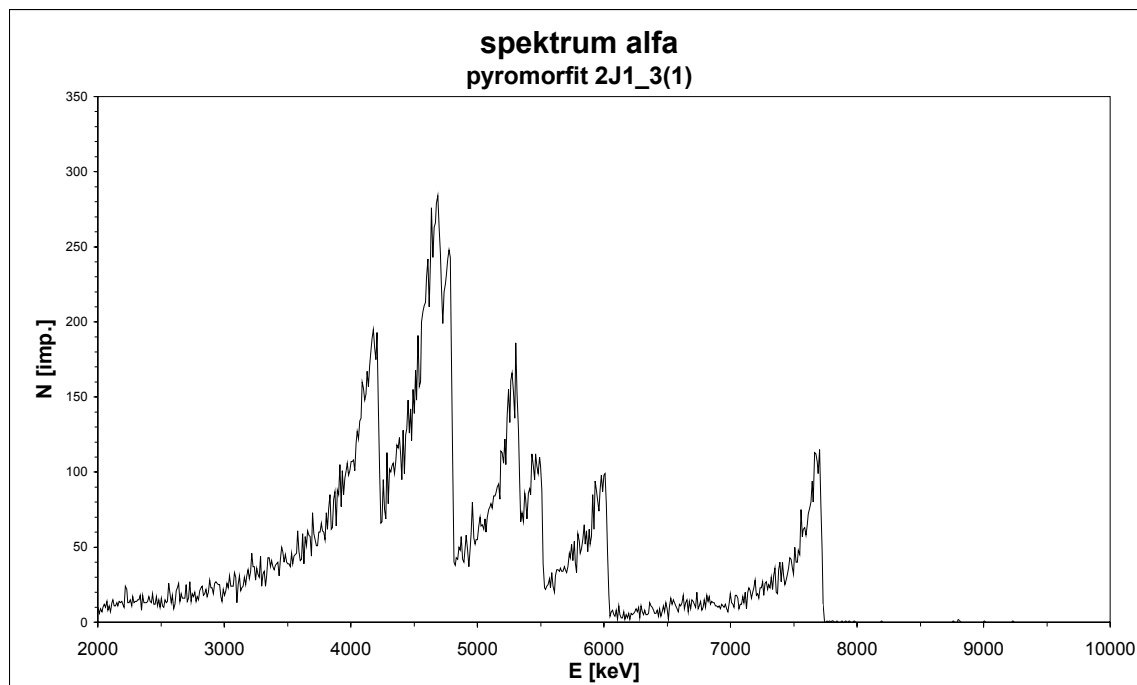
spektrum pyromorfitu – 1J5_2 v radioaktivní rovnováze, pravděpodobně nízký koeficient emanace, slabě aktivní vzorek



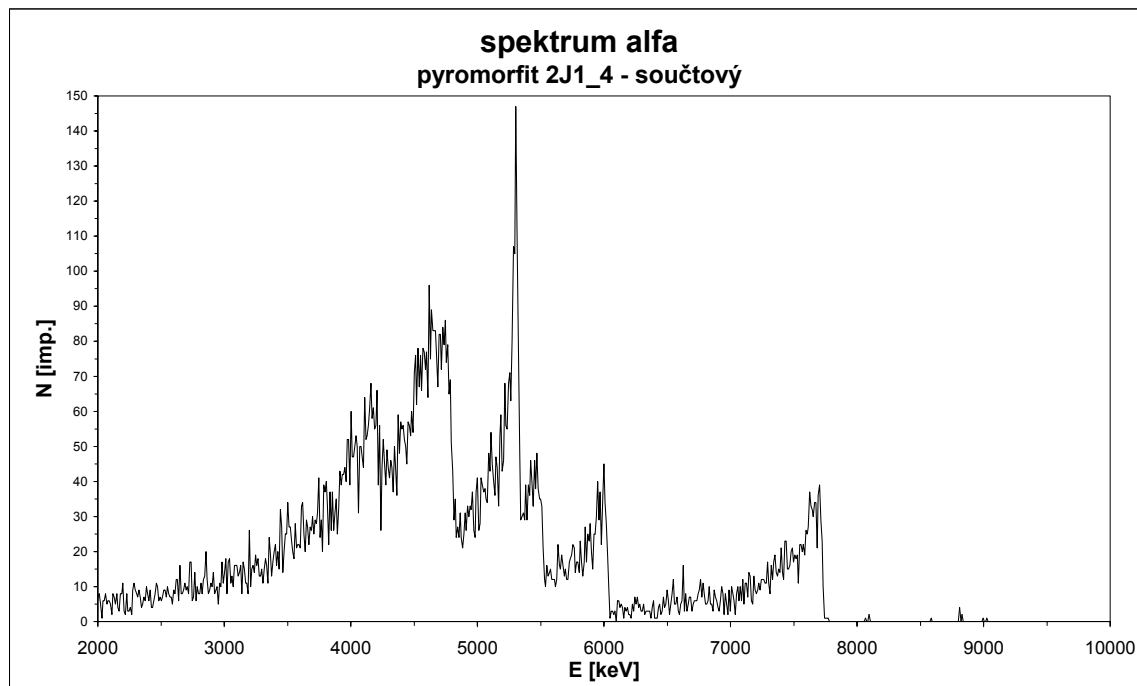
spektrum cerusitu – 2J1_1 stupeň radioaktivní rovnováhy nelze spolehlivě stanovit z důvodu příliš nízké aktivity vzorku



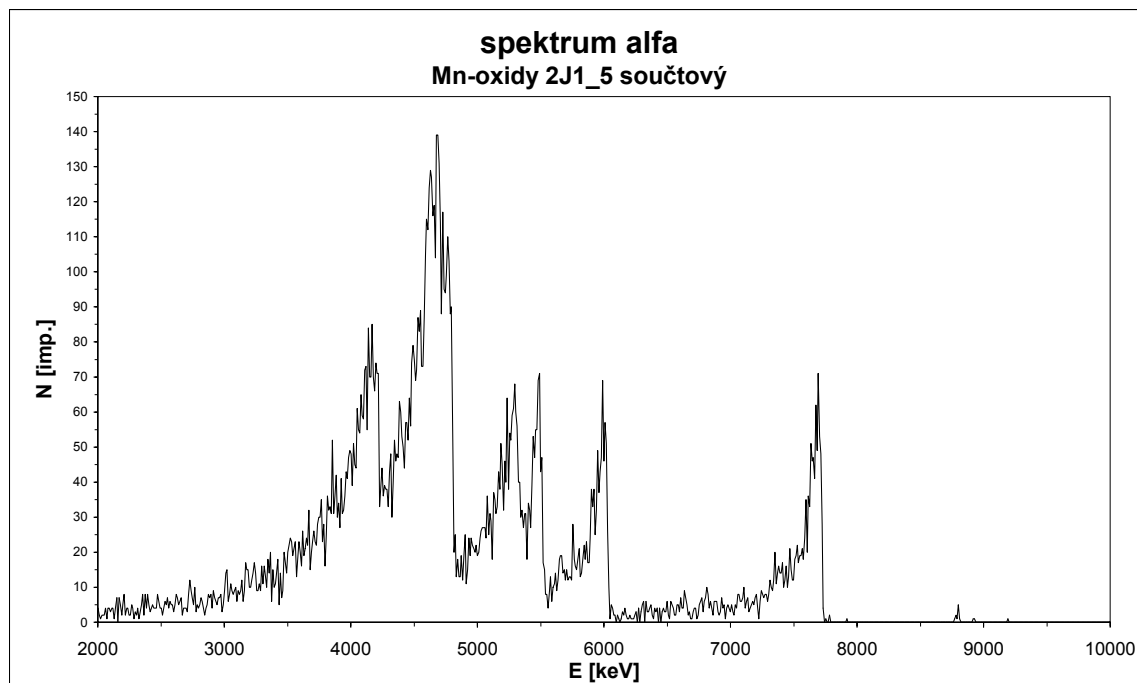
spektrum pyromorfitu – 2J1_3 ve stavu radioaktivní rovnováhy



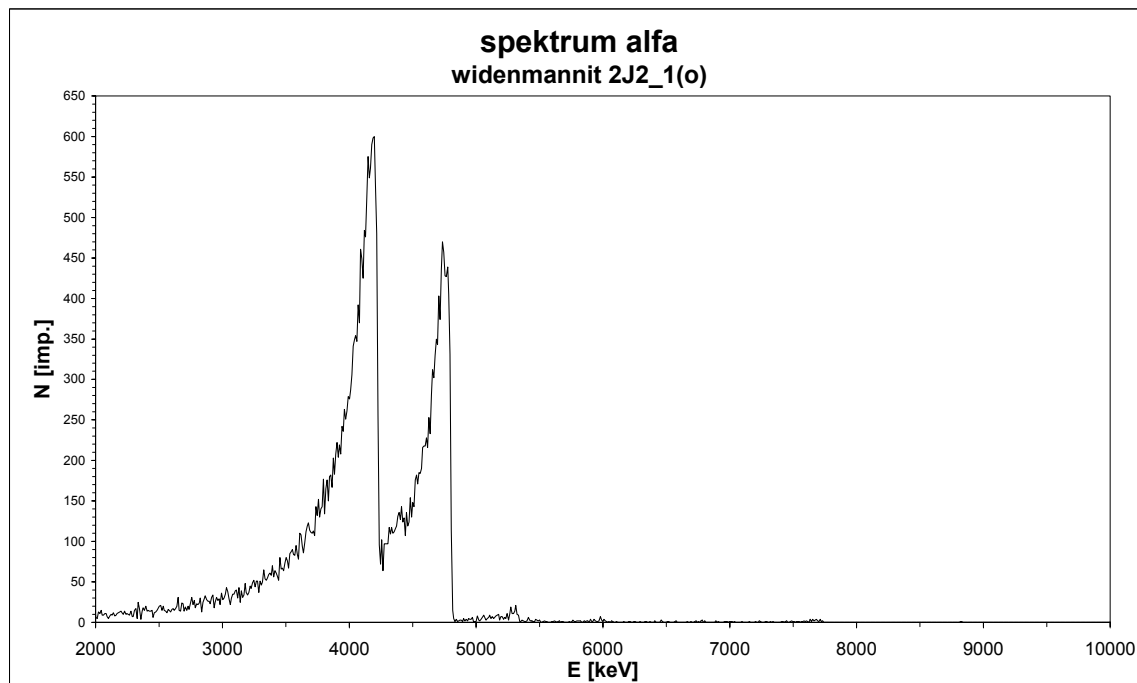
spektrum pyromorfitu – 2J1_4 ve stavu radioaktivní rovnováhy, zajímavá je energetická linie pro ^{210}Po , která ukazuje na zvýšený obsah tohoto izotopu ve vzorku



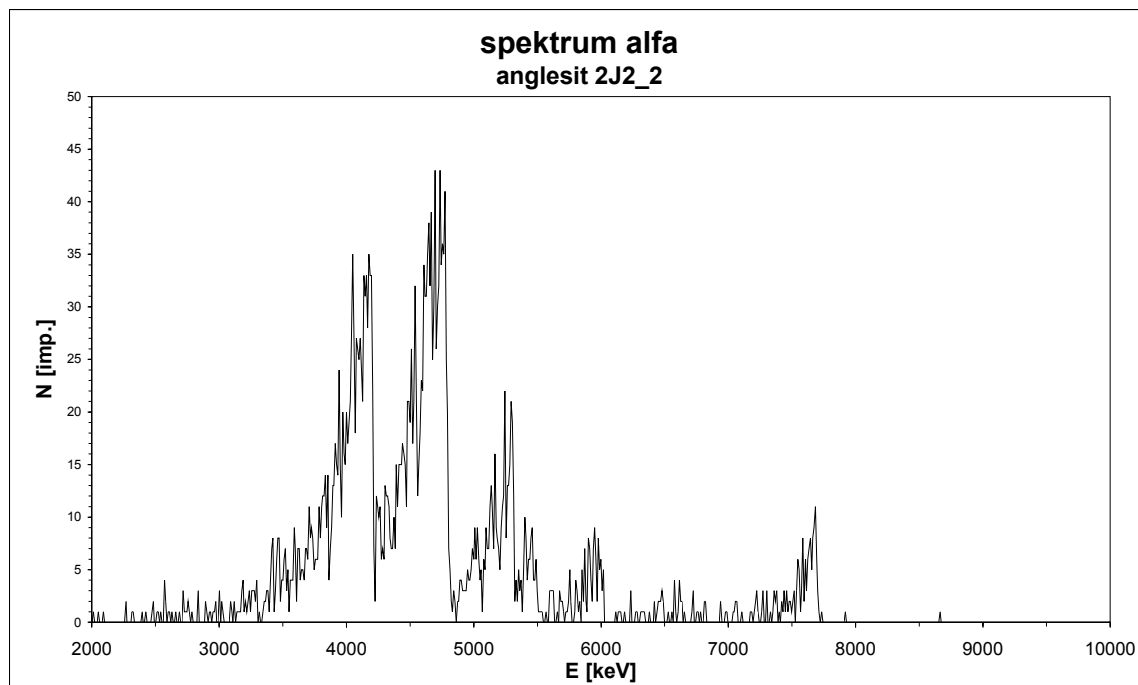
spektrum manganových oxidů – 2J1_5 ve stavu radioaktivní rovnováhy



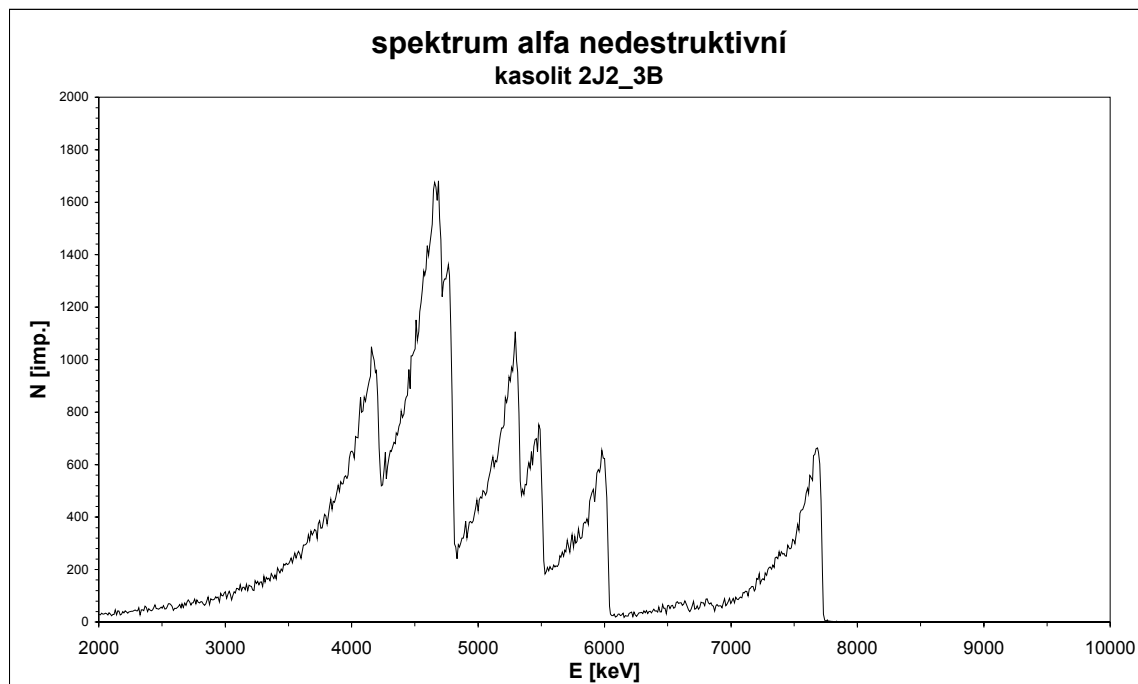
spektrum widenmannitu – 2J2_1 ve stavu radioaktivní nerovnováhy, kdy uran značně převažuje nad ^{210}Po a obsah ^{226}Ra je blízky nule



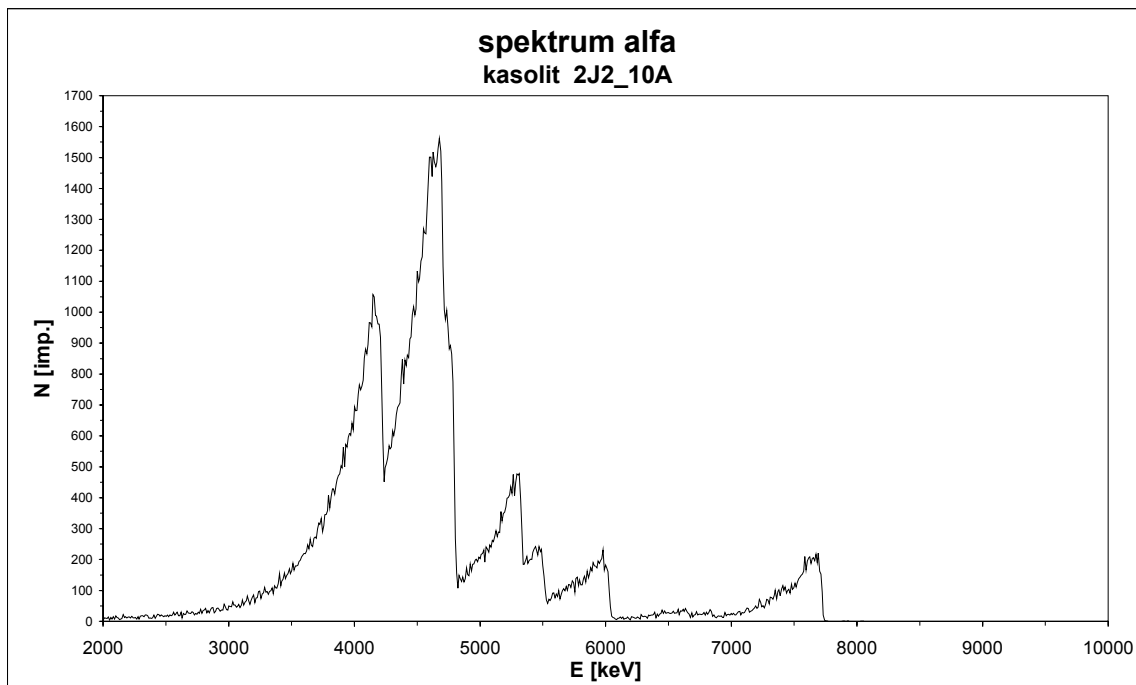
spektrum anglesitu – 2J2_2 ve stavu radioaktivní rovnováhy, vzorek se slabou aktivitou



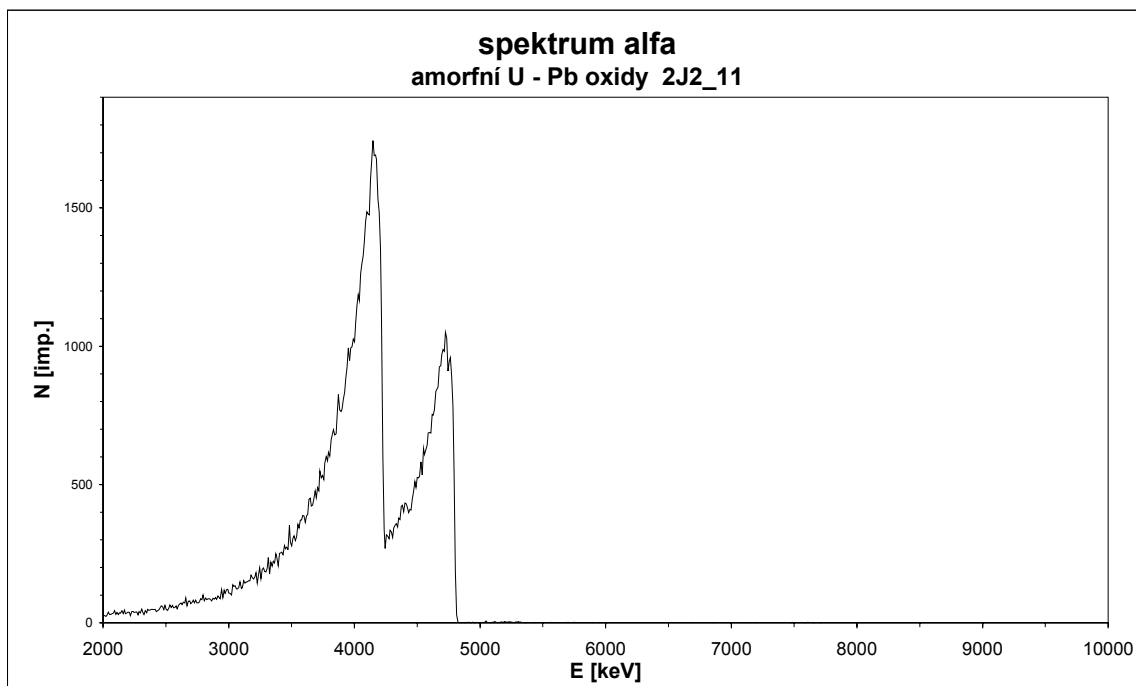
spektrum kasolitu – 2J2_3B ve stavu radioaktivní rovnováhy



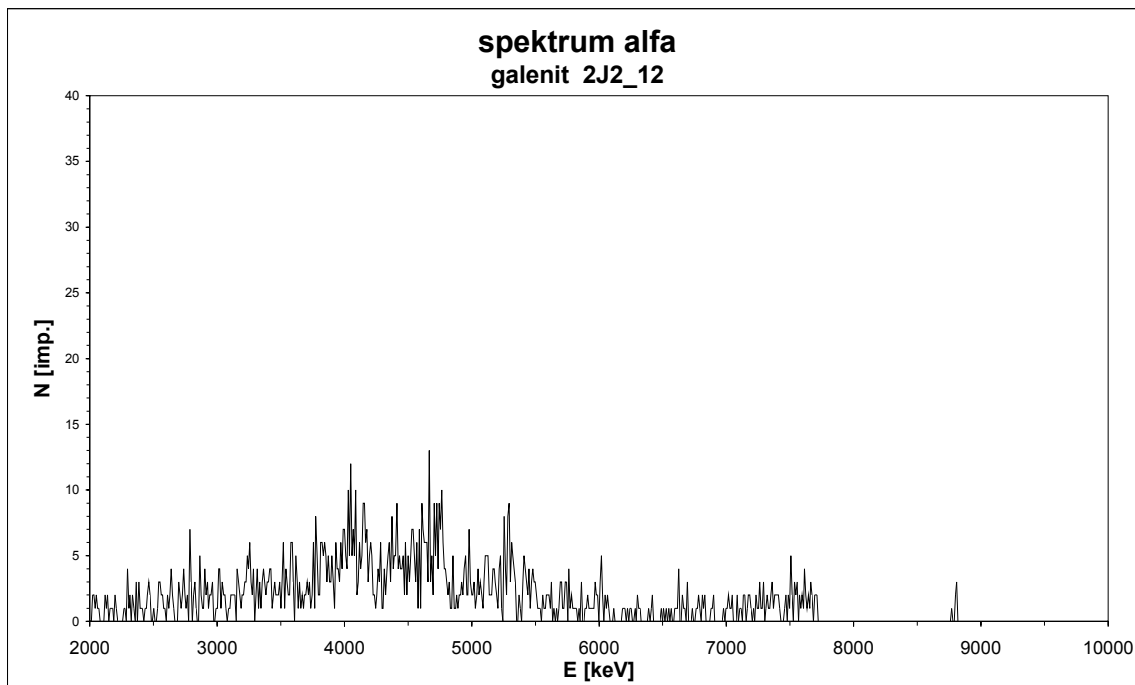
spektrum kasolitu – 2J2_10A ve stavu radioaktivní nerovnováhy, kdy uran převažuje nad rádiem, mírně zvýšená aktivita u produktů rozpadové řady ^{235}U ukazuje na možný zvýšený koeficient emanace



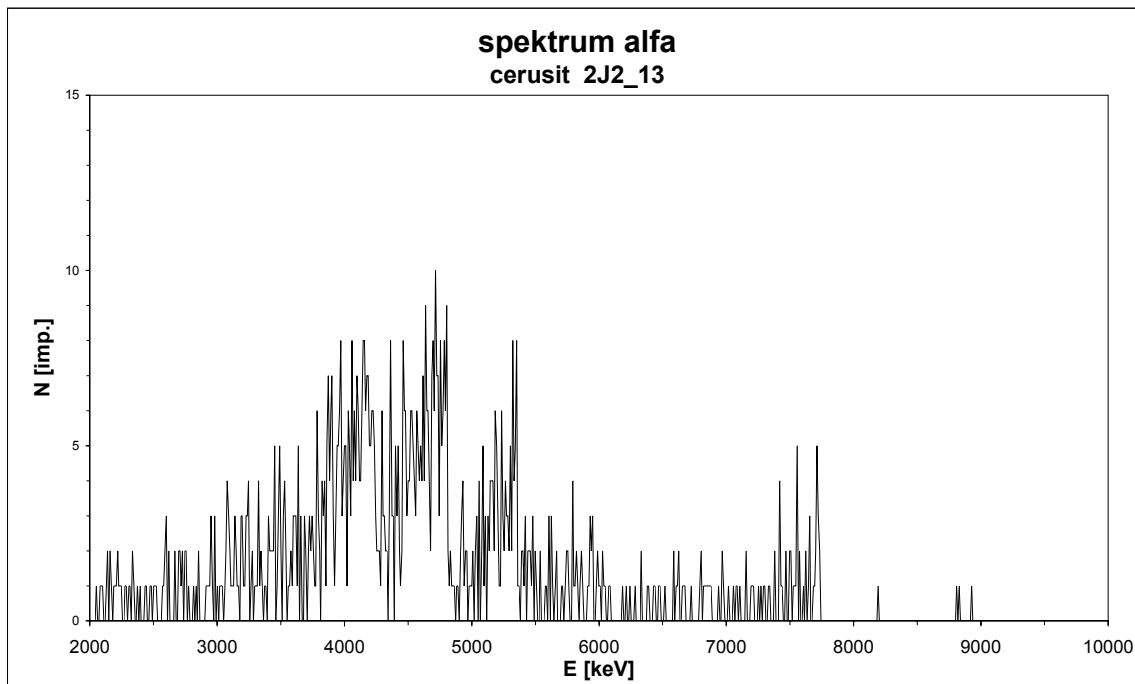
spektrum amorfních U-Pb oxidů 2J2_11 ve stavu radioaktivní nerovnováhy, s nulovým obsahem rádia i dalších produktů rozpadu řady ^{238}U , tato nerovnováha ukazuje na nízké stáří vzorku



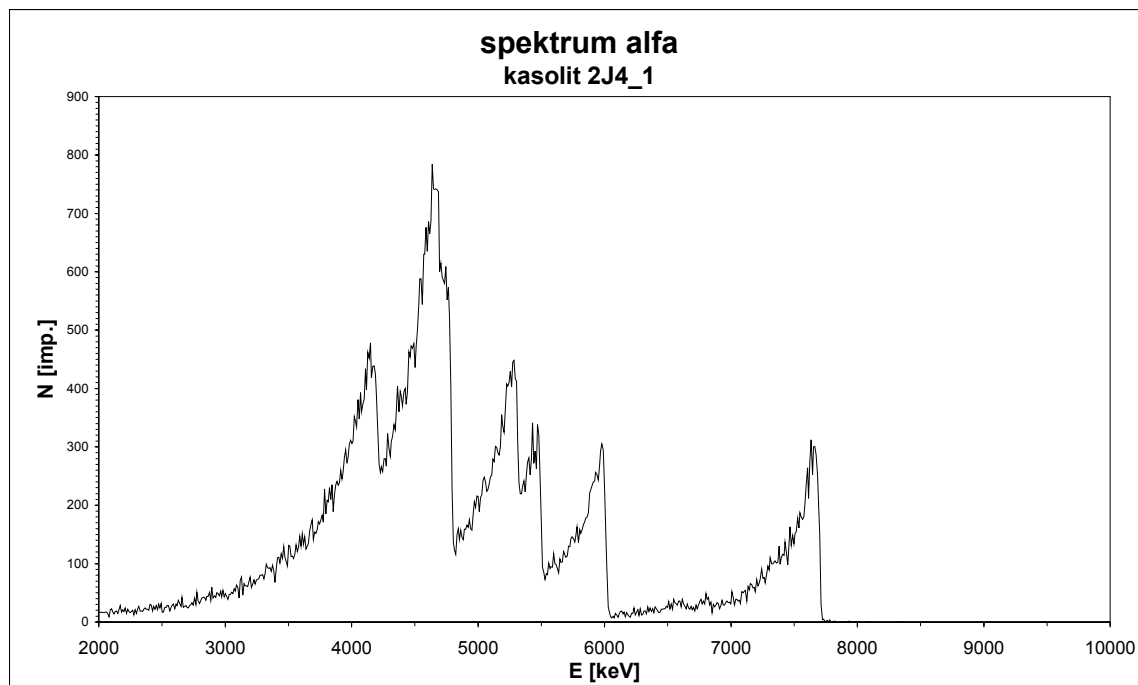
spektrum galenitu – 2J2_12 pravděpodobně ve stavu radioaktivní rovnováhy, vzhledem k velmi nízké aktivitě vzorku nelze rovnováhu přesněji stanovit



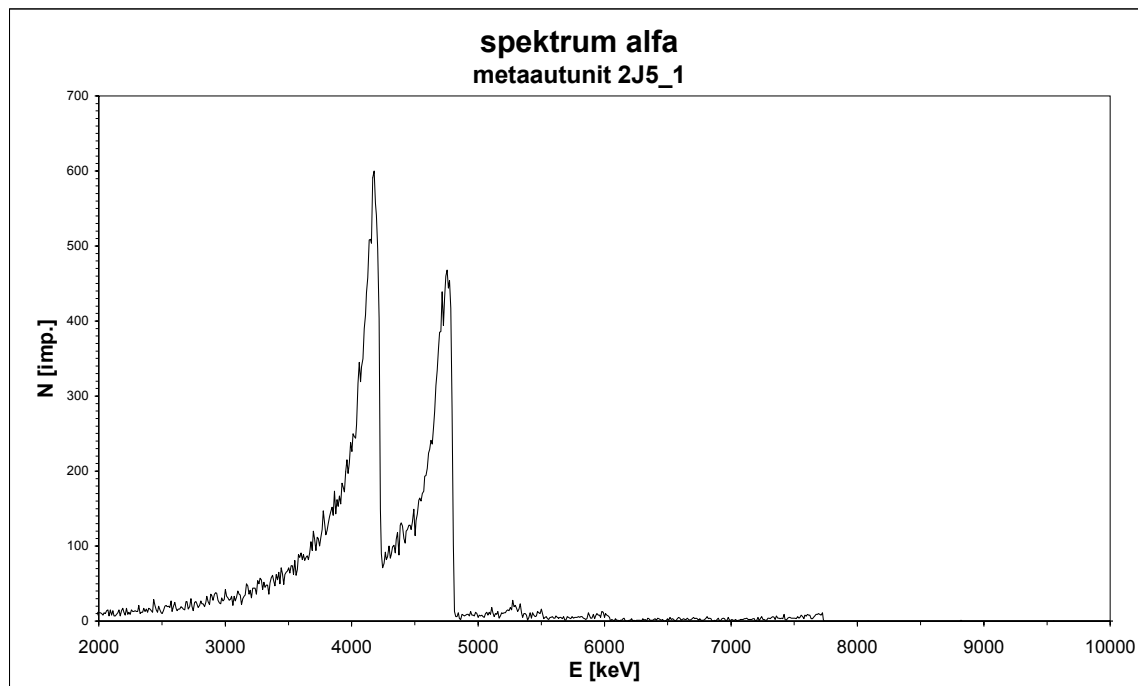
spektrum cerusitu – 2J2_13 pravděpodobně ve stavu radioaktivní rovnováhy, vzhledem k velice nízké aktivitě vzorku je přesnější stanovení rovnováhy stejně jako v předešlém případě nemožné



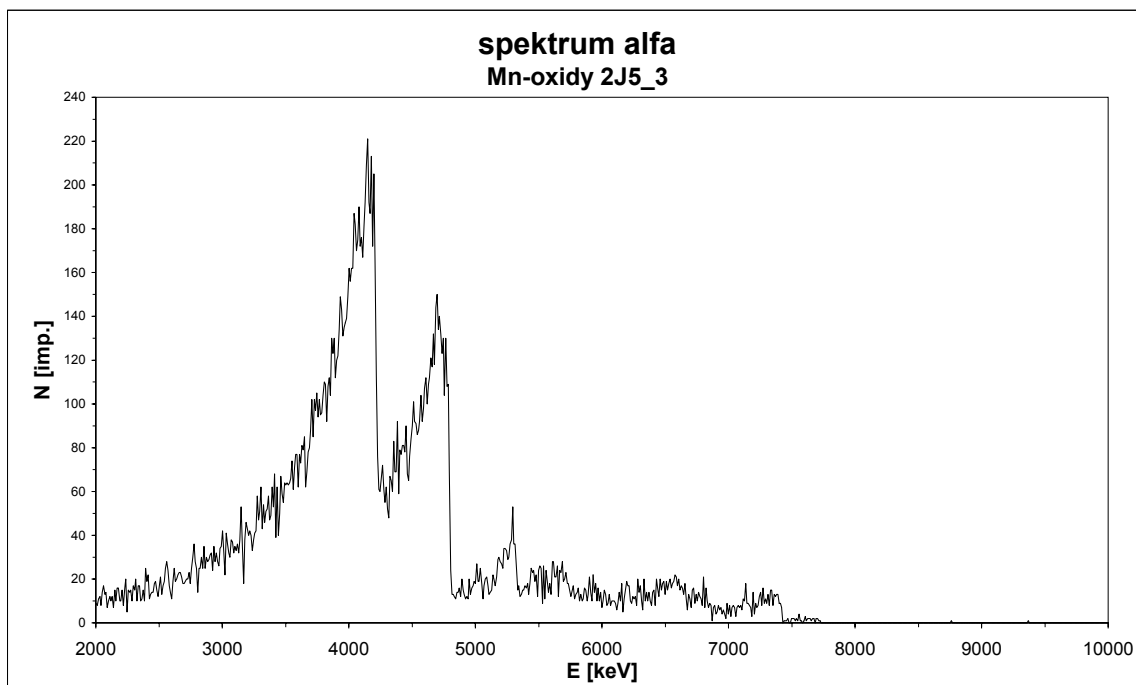
spektrum kasolitu – 2J4_1 ve stavu radioaktivní rovnováhy



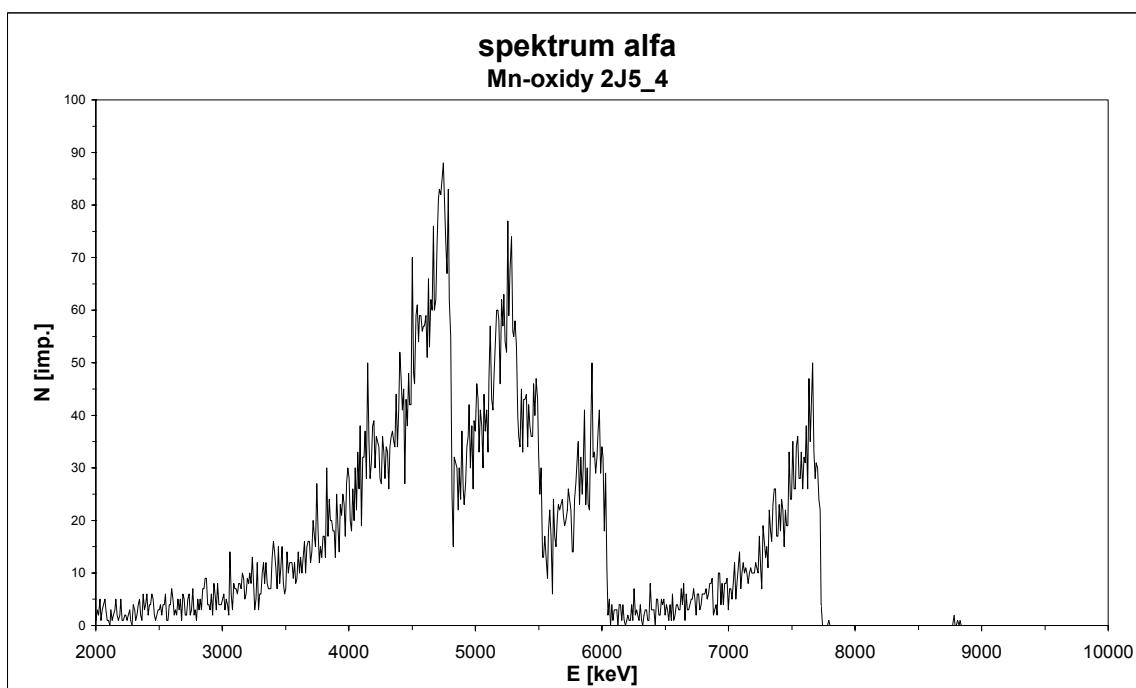
spektrum metaautunitu – 2J5_1 ve stavu radioaktivní nerovnováhy, kdy je nerovnovážný uran a obsah rádia je blízký nule



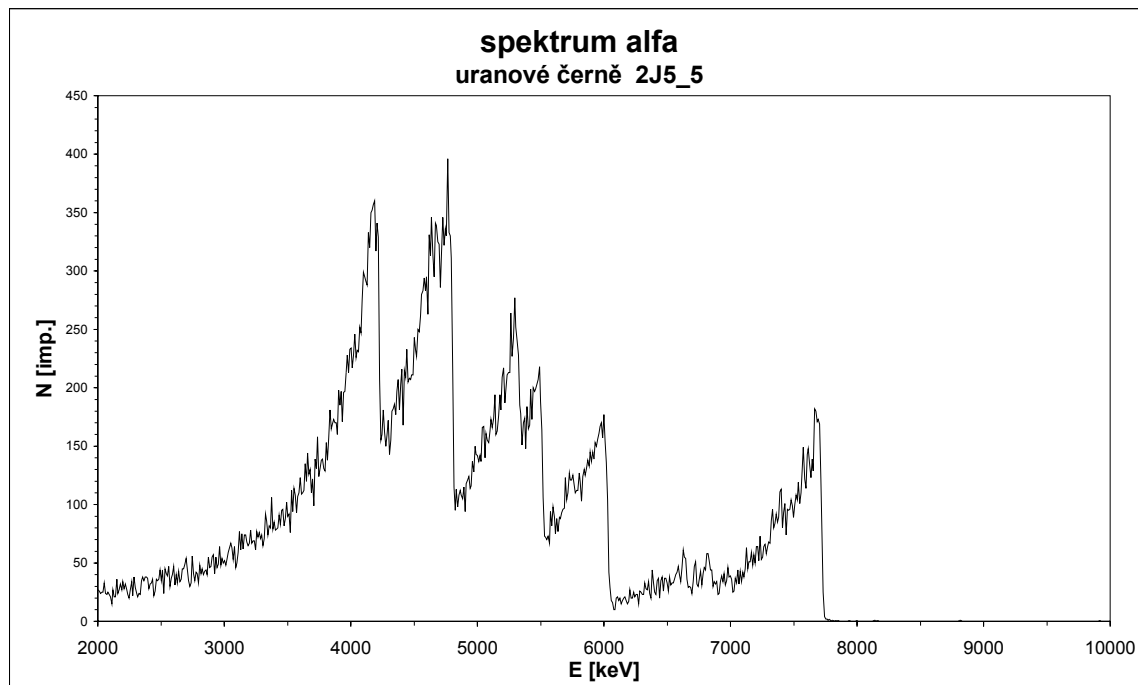
spektrum manganových oxidů – 2J5_3 ve stavu radioaktivní nerovnováhy, kdy je patrná nerovnováha uranu a velice nízký obsah rádia, zvýšené obsahy produktů rozpadové řady ^{235}U ukazují na zvýšený koeficient emanace



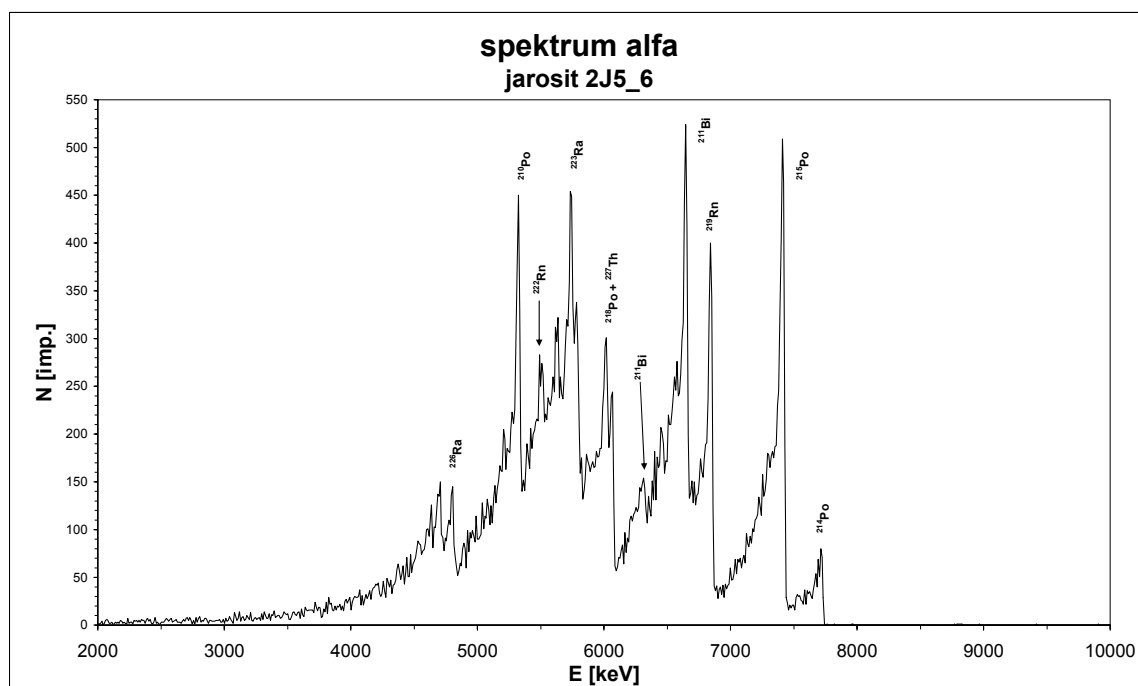
spektrum manganových oxidů – 2J5_4 ve stavu radioaktivní nerovnováhy, kdy rádium převažuje nad uranem, pravděpodobně zvýšený koeficient emanace, přesnější hodnocení vzorku v důsledku nízké aktivity nelze konstatovat



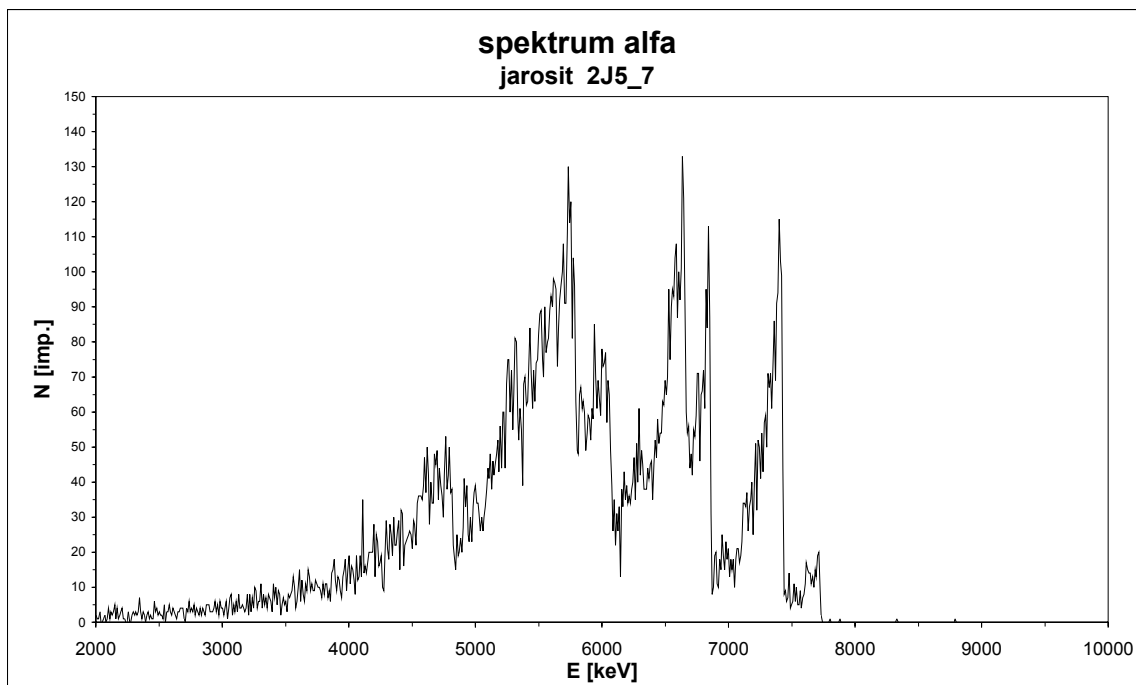
spektrum uranové černě – 2J5_5 ve stavu radioaktivní rovnováhy se zvýšeným koeficientem emanace



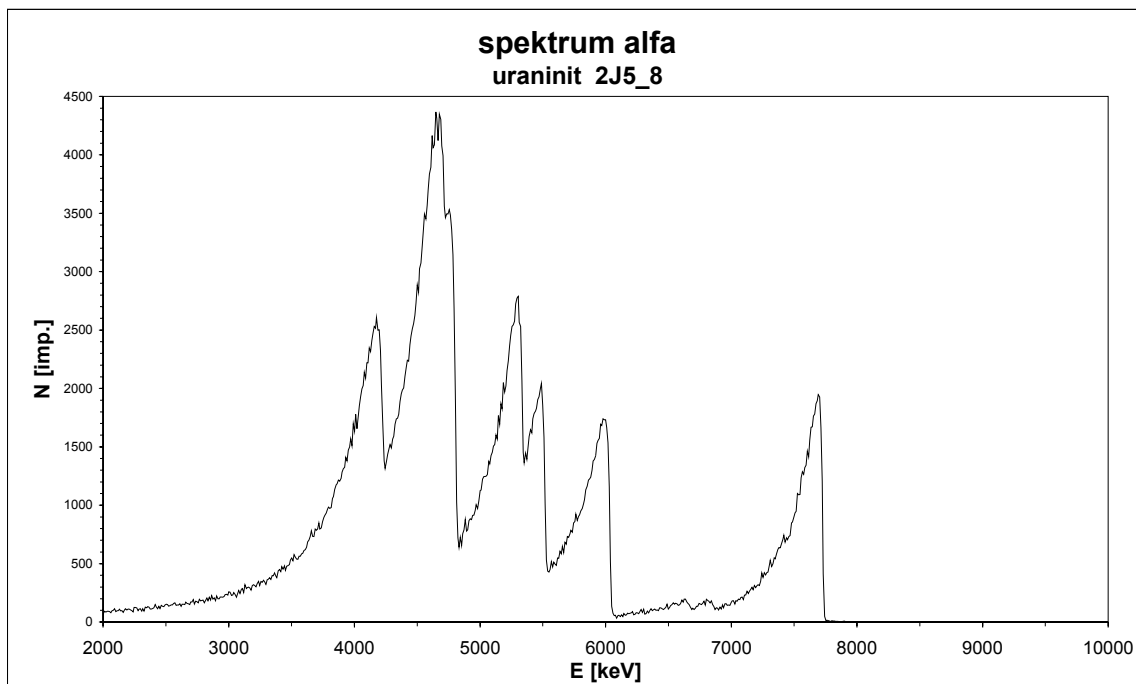
spektrum jarositu – 2J5_6 ze kterého je patrná velice neobvyklá asociace radionuklidů, energetické linie uranu nejsou vůbec přítomné a aktivity dceřinných radionuklidů rozpadové řady ^{235}U zcela převládají nad izotopy ^{210}Po a ^{226}Ra , mateřským izotopem v případě dceřinných produktů řady ^{235}U je ^{227}Ac , který se však ve spektru nevyskytuje, neboť se rozpadá β přeměnou



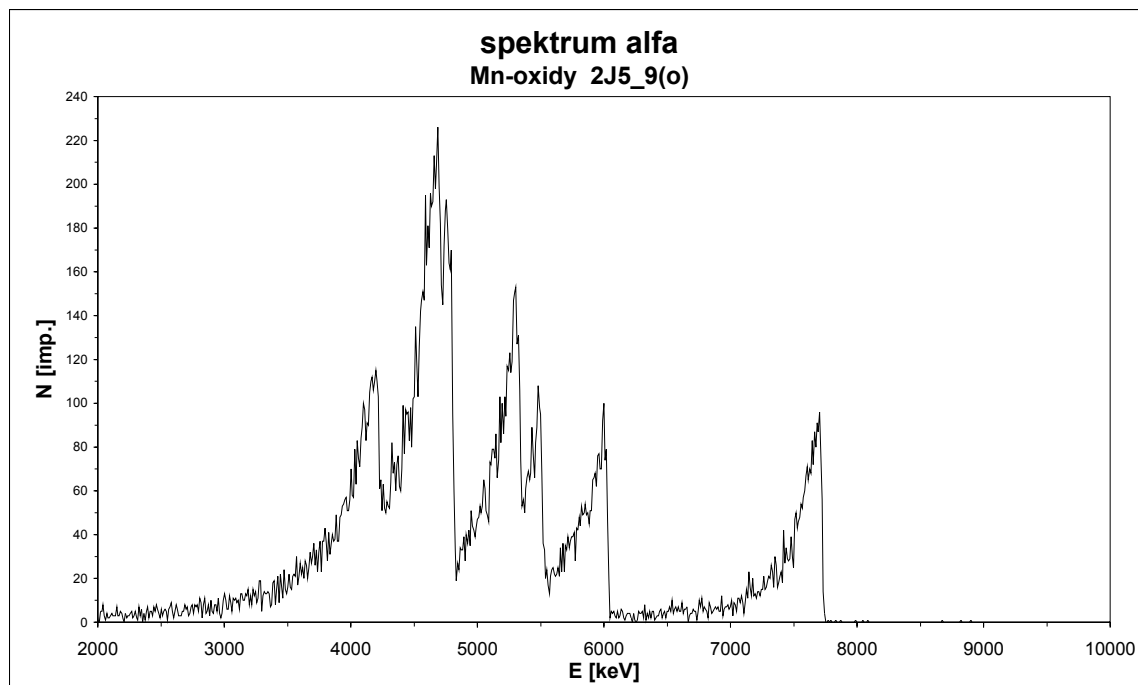
spektrum jarositu – 2J5_7 vykazuje podobné parametry jako spektrum vzorku 2J5_6



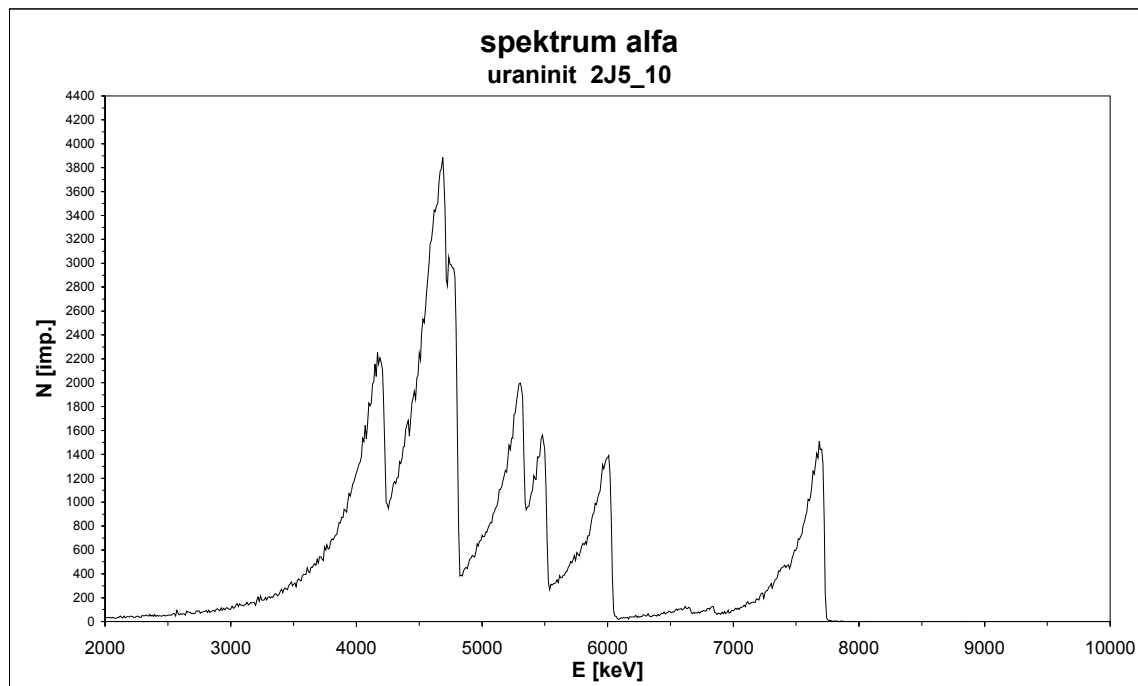
spektrum uraninitu – 2J5_8 ve stavu radioaktivní rovnováhy



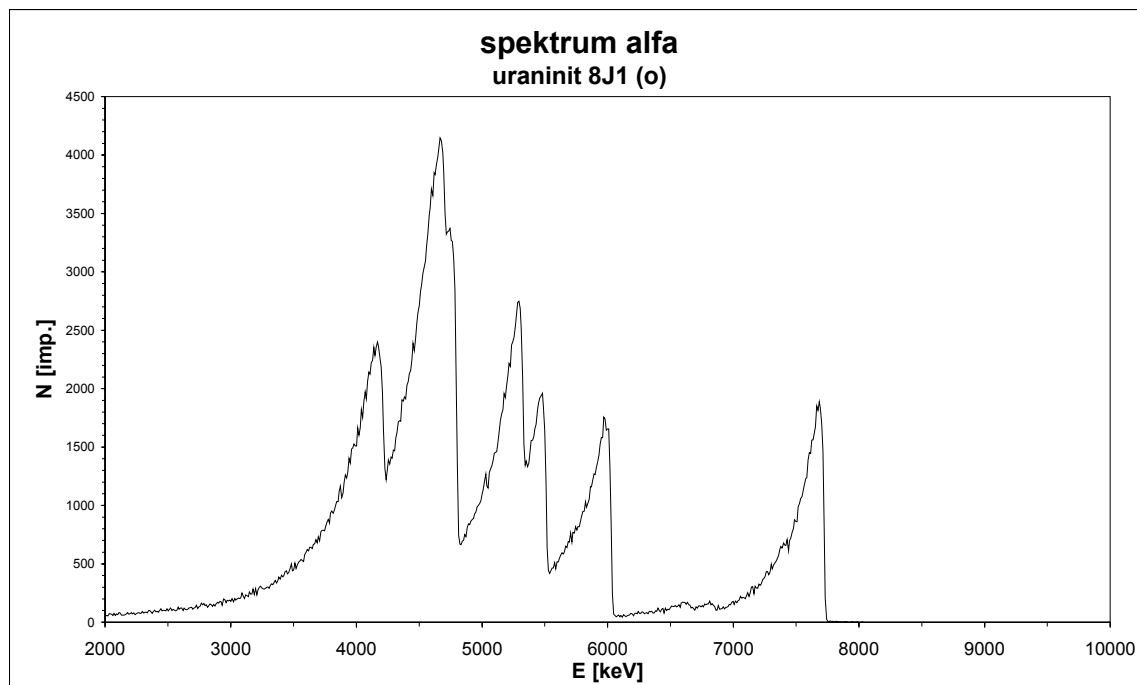
spektrum manganových oxidů – 2J5_9 ve stavu radioaktivní rovnováhy



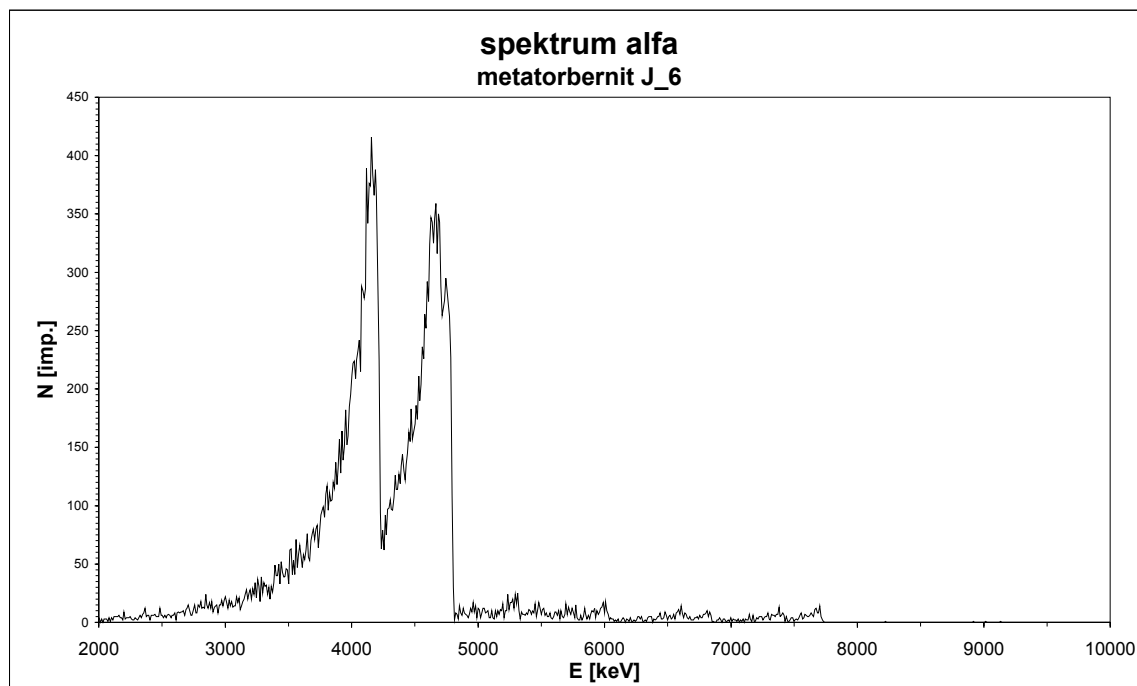
spektrum uraninitu – 2J5_10 ve stavu radioaktivní rovnováhy



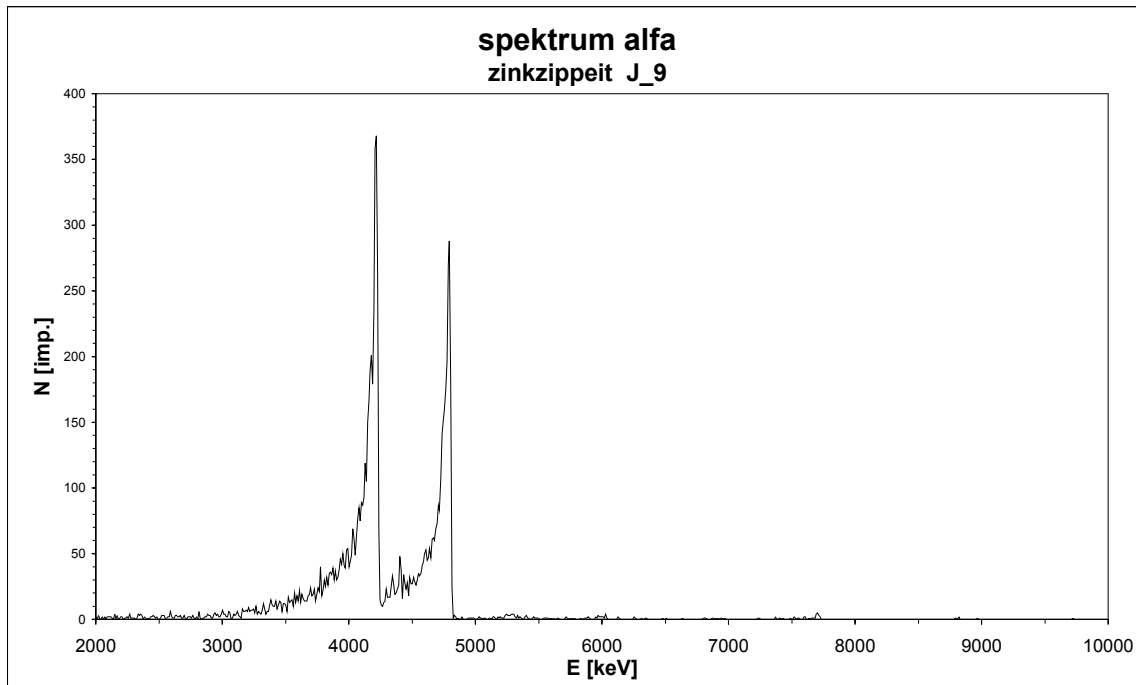
spektrum uraninitu – 8J1 ve stavu radioaktivní rovnováhy



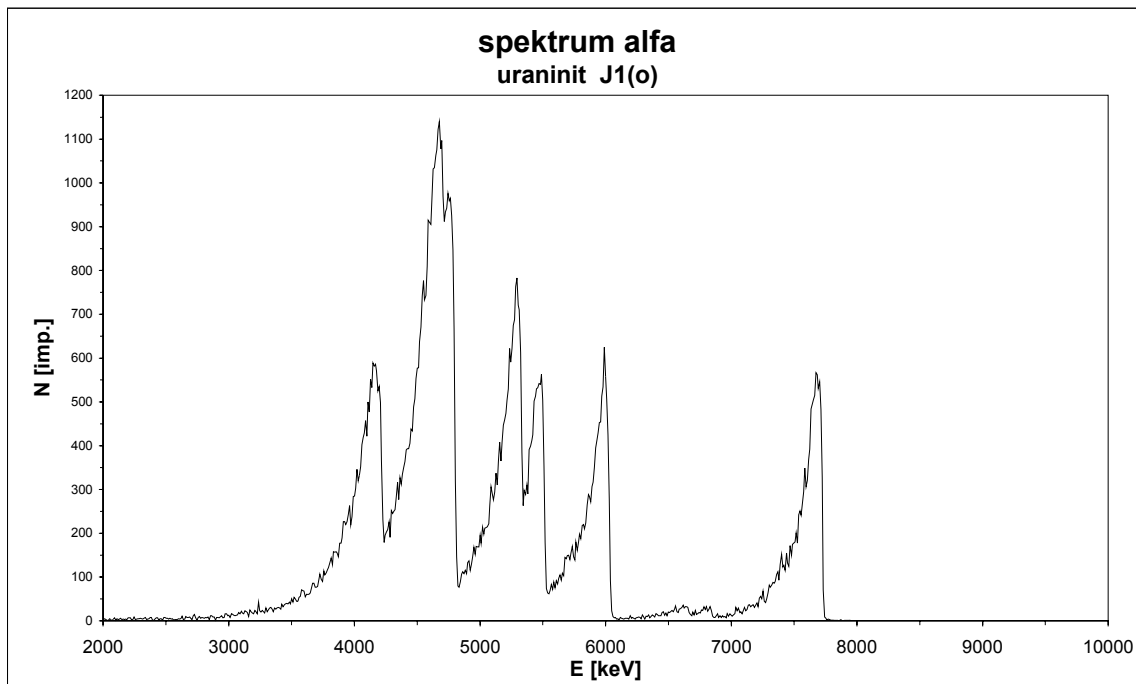
spektrum metatorbernitů – J_6 ve stavu radioaktivní nerovnováhy, kdy obsah uranu značně převyšuje obsah rádia



spektrum zinkzippeitu – J_9 ve stavu radioaktivní nerovnováhy, uran je v nerovnováze, obsah rádia je blízky nule



spektrum uraninitu – J1 ve stavu radioaktivní rovnováhy



Příloha č.VII:

Model výpočetní tabulky pro vyhodnocení spekter pořízených metodou nedestruktivní alfaspektrometrie.

Tato tabulka byla použita ke kvantifikaci výsledků nedestruktivní alfaspektrometrie. V první polovině tabulky jsou ve sloupcích vyznačena jednotlivá energetická okna (ROI) charakteristická pro daný izotop. První řádek vymezuje šířku okna v kanálech multikanálového analyzátoru, ve druhém řádku je šířka okna vyjádřená v [keV], dále počet impulsů příslušných po dobu měření do vymezeného okna, neurčitost v [%], hodnota pozadí, která je dosazena dle aktuálního stavu pozadí detektoru, aktivita jednotlivých izotopů v [mBq], dále počet impulsů po odečtu pulsů degradovaných energií, přepoččet [imp./mg], dále vyčíslená hmotnostní aktivita s vyjádřenou neurčitostí v [mBq/mg] a [%], nakonec je vyčíslený procentuelní obsah ekvivalentu uranu [%eU].

Ve druhé polovině tabulky je čas měření vzorku na detektoru, hmotnost navážky s vyjádřenou neurčitostí v [mg] a [%], dále FWHM vyjádřená v [keV] a nakonec konstanty citlivosti detektoru, které jsou závislé na FWHM.

	ROI (2-10 Mev)	ROI 1	ROI 5	ROI 6	ROI 8
izotop	celk. alfa akt.	²³⁸ U	²¹⁰ Po	²²² Rn+ ²¹⁸ Po+ ²¹⁴ Po	²¹⁴ Po
šířka okna [CH]	818	30	30	79	30
šířka okna [keV]	8000	293,82	293,82	773,726	293,82
count [imp]	44354	4998	6183	10878	3964
sigma [%]	0,47	2,65	2,44	0,96	1,59
background [mBq]		0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
aktivita [mBq]	395,16	29,78	36,60	96,91	35,32
count bez degradovaných energií [imp]		3343,03	4107,85		
četnost [imp./mg]	1344,08	101,31	124,48	329,64	120,12
hmot. aktivita [mBq/mg]	3527,88	546,73	671,81	666,89	648,28
chyba [%]	6,12	4,32	4,10	2,63	3,25
chyba [mBq/mg]	215,73	23,61	27,56	17,51	21,10
% eU		4,43	5,44	5,40	5,25
chyba eU abs.		0,19	0,22	0,14	0,17
čas měření [s]					
čas měření [s]	112243				
hmotnost [mg]					
hmotnost [mg]	0,294				
chyba vážení [mg]					
chyba vážení [mg]	0,0049				
chyba vážení [%]					
chyba vážení [%]	1,67				
FWHM ²¹⁴Po					
FWHM ²¹⁴ Po	166				
FWHM ²³⁸U					
FWHM ²³⁸ U	168,24				
konstanty citlivosti at					
konstanty citlivosti at	0,38			0,49	0,19
chyby [%]					
chyby [%]	3,97				

Příloha č.VIII:

Kvantifikace spekter vzorků minerálů Jánské žily naměřených metodou nedestruktivní alfa-spektrometrie:

1J1_1 - lodevit

	R0 (2-10 Mev)	ROI 1	ROI 2	ROI 3	ROI 4	ROI 5	ROI 6	ROI 7	ROI 8
izotop	celk. alfa akt.	²³⁸ U	²³⁵ U	²³⁴ U	²²³ Ra	²¹⁰ Po	²²² Rn+ ²¹⁸ Po+ ²¹⁴ Po	²¹⁸ Po	²¹⁴ Po
šířka okna [CH]	818	30	17	42	10	30	79	55	30
šířka okna [keV]	8000	293.82	157.25	388.5	92.5	293.82	773.726	538.67	293.82
count [imp]	52931	17994	7009	11690	22	66	72	32	30
sigma [%]	0.43	0.75	1.19	0.92	21.32	20.16	11.79	17.68	23.83
background [mBq]		0.0229				0.0000	0.0000		0.0344
aktivita [mBq]	650.37	221.07	86.12	143.64	0.27	0.66	0.88	0.39	0.33
count bez chvostu [imp]						53.74			
četnost [imp./mg]	3126.78	1062.84				3.17	4.25	1.89	1.61
hmot. aktivita [mBq/mg]	8207.00	4479.50				21.49	11.99	6.41	10.88
chyba [%]	9.12	5.46				24.87	16.50	22.39	28.55
chyba [mBq/mg]	748.46	244.79				5.34	1.98	1.44	3.10
% eU		36.27				0.17	0.10		0.09
chyba eU abs.		1.98				0.04	0.02		0.03
čas měření [s]	81386								
hmotnost [mg]	0.208								
chyba vážení [mg]	0.0098								
chyba vážení [%]	4.71								
FWHM ²³⁸ U	229.4								
konstanty citlivosti at	0.38	0.24					0.35	0.29	0.15
chyby [%]	3.97								

1J1_5 - zeunerit

	R0 (2-10 Mev)	ROI 1	ROI 2	ROI 3	ROI 4	ROI 5	ROI 6	ROI 7	ROI 8
izotop	celk. alfa akt.	²³⁸ U	²³⁵ U	²³⁴ U	²²³ Ra	²¹⁰ Po	²²² Rn+ ²¹⁸ Po+ ²¹⁴ Po	²¹⁸ Po	²¹⁴ Po
šířka okna [CH]	818	30	17	42	10	30	79	55	30
šířka okna [keV]	8000	293.82	157.25	388.5	92.5	293.82	773.726	538.67	293.82
count [imp]	41927	11142	4719	9650	238	739	1051	483	372
sigma [%]	0.49	1.00	1.46	1.02	6.48	5.43	3.37	4.55	5.63
background [mBq]		0.0229				0.0000	0.1145		0.0344
aktivita [mBq]	526.42	139.85	59.25	121.16	2.99	7.95	13.08	6.06	4.64
count bez chvostu [imp]		11140.12				633.53			
četnost [imp./mg]	3760.17	998.92				56.82	93.44	43.32	33.12
hmot. aktivita [mBq/mg]	9869.49	4348.74				247.35	141.73	147.00	144.17
chyba [%]	11.46	8.00				12.43	10.37	11.55	12.63
chyba [mBq/mg]	1131.24	347.87				30.74	14.70	16.98	18.21
% eU		35.21				2.00	1.15		1.17
chyba eU abs.		2.82				0.25	0.12		0.15
čas měření [s]	79645								
hmotnost [mg]	0.14								
chyba vážení [mg]	0.0098								
chyba vážení [%]	7.00								
FWHM ²¹⁴ Po	91.01								
FWHM ²³⁸ U	168.24						0.66	0.29	0.23
konstanty citlivosti at	0.38								
chyby [%]	3.97								

1J1_7 - zeunerit

	R0 (2-10 Mev)	ROI 1	ROI 2	ROI 3	ROI 4	ROI 5	ROI 6	ROI 7	ROI 8
izotop	celk. alfa akt.	²³⁸ U	²³⁵ U	²³⁴ U	²²³ Ra	²¹⁰ Po	²²² Rn+ ²¹⁸ Po+ ²¹⁴ Po	²¹⁰ Po	²¹⁴ Po
šířka okna [CH]	818	30	17	42	10	30	79	55	30
šířka okna [keV]	8000	293.82	157.25	388.5	92.5	293.82	773.726	538.67	293.82
count [imp]	19239	5572	2015	5132	46	116	149	76	48
sigma [%]	0.72	1.36	2.23	1.40	14.74	14.30	10.31	11.47	18.03
background [mBq]		0.0229				0.0000	0.1145		0.0344
aktivita [mBq]	221.93	64.25	23.24	59.20	0.53	1.14	1.60	0.88	0.52
count bez chvostu [imp]						98.62			
četnost [imp./mg]	3263.70	944.89				16.73	23.59	12.89	7.64
hmot. aktivita [mBq/mg]	8566.38	3826.58				98.99	54.39	43.75	45.19
chyba [%]	19.11	15.78				28.71	24.72	25.88	32.44
chyba [mBq/mg]	1636.72	603.71				28.42	13.44	11.32	14.66
% eU		30.98				0.80	0.44		0.37
chyba eU abs.		4.89				0.23	0.11		0.12
čas měření [s]	86689								
hmotnost [mg]	0.068								
chyba vážení [mg]	0.0098								
chyba vážení [%]	14.41								
FWHM ²³⁸ U	193.5								
konstanty citlivosti at	0.38	0.25					0.43	0.29	0.17
chyby [%]	3.97								

1J1_8 - beudantit

	R0 (2-10 Mev)	ROI 1	ROI 2	ROI 3	ROI 4	ROI 5	ROI 6	ROI 7	ROI 8
izotop	celk. alfa akt.	²³⁸ U	²³⁵ U	²³⁰ Th	²²⁶ Ra	²¹⁰ Po	²²² Rn+ ²¹⁸ Po+ ²¹⁴ Po	²¹⁰ Po	²¹⁴ Po
šířka okna [CH]	818	30	17	9	9	30	79	55	30
šířka okna [keV]	8000	293.82	157.25	88.146	88.146	293.82	773.726	538.67	293.82
count [imp]	52265	6805	2593	10166	456	2233	1049	596	338
sigma [%]	0.44	1.39	1.96	0.99	4.68	2.83	3.84	4.10	6.69
background [mBq]		0.0987				0.0529	0.1374		0.0388
aktivita [mBq]	113.76	14.66	5.64	22.13	0.99	4.57	2.15	1.30	0.70
count bez chvostu [imp]		6782.45		9896	292.218105	2125.04			
četnost [imp./mg]	801.16	103.27				32.20	15.11	9.14	4.91
hmot. aktivita [mBq/mg]	2102.84	462.97				144.36	23.81	31.00	22.00
chyba [%]	10.68	7.66			10.44	9.10	10.11	10.36	12.96
chyba [mBq/mg]	224.55	35.45				13.13	2.41	3.21	2.85
% eU		3.75				1.17	0.19		0.18
chyba eU abs.		0.29				0.11	0.02		0.02
čas měření [s]	459413								
hmotnost [mg]	0.142								
chyba vážení [mg]	0.0089								
chyba vážení [%]	6.27								
FWHM ²¹⁴ Po	102.22								
FWHM ²³⁸ U	168.24								
konstanty citlivosti at	0.38						0.63	0.29	0.22
chyby [%]	3.97								

1J1_9 - galenit

	R0 (2-10 Mev)	ROI 1	ROI 2	ROI 3	ROI 4	ROI 5	ROI 6	ROI 7	ROI 8
izotop	celk. alfa akt.	²³⁸ U	²³⁵ U	²³⁴ U	²²³ Ra	²¹⁰ Po	²²² Rn+ ²¹⁸ Po+ ²¹⁴ Po	²¹⁸ Po	²¹⁴ Po
šířka okna [CH]	818	30	17	42	10	30	79	55	30
šířka okna [keV]	8000	293.82	157.25	388.5	92.5	293.82	773.726	538.67	293.82
count [imp]	2803	351	91	823	79	253	605	282	196
sigma [%]	1.89	6.84	10.48	3.49	11.25	12.54	5.96	5.95	10.53
background [mBq]		0.0470				0.0706	0.3528		0.1176
aktivita [mBq]	7.49	0.93	0.24	2.20	0.21	0.48	1.26	0.75	0.41
count bez chvostů [imp]		366.13				206.80			
četnost [imp./mg]	48.02	5.97				3.09	8.10	4.83	2.60
hmot. aktivita [mBq/mg]	126.05	25.03				12.96	11.71	16.40	10.92
chyba [%]	9.00	9.98				15.68	9.11	9.10	13.67
chyba [mBq/mg]	11.35	2.50				2.03	1.07	1.49	1.49
% eU		0.20				0.10	0.09		0.09
chyba eU abs.		0.02				0.02	0.01		0.01
čas měření [s]	374152								
hmotnost [mg]	0.156								
chyba vážení [mg]	0.0049								
chyba vážení [%]	3.14								
FWHM ²¹⁴ Po	76.06								
FWHM ²³⁸ U	168.24								
konstanty citlivosti at	0.38						0.69	0.29	0.24
chyby [%]	3.97								

1J1_10 - limonit (HFO)

	R0 (2-10 Mev)	ROI 1	ROI 2	ROI 3	ROI 4	ROI 5	ROI 6	ROI 7	ROI 8
izotop	celk. alfa akt.	²³⁸ U	²³⁵ U	²³⁴ U	²²³ Ra	²¹⁰ Po	²²² Rn+ ²¹⁸ Po+ ²¹⁴ Po	²¹⁸ Po	²¹⁴ Po
šířka okna [CH]	818	30	17	42	10	30	79	55	30
šířka okna [keV]	8000	293.82	157.25	388.5	92.5	293.82	773.726	538.67	293.82
count [imp]	4840	735	234	1385	138	474	893	420	307
sigma [%]	1.44	4.90	6.54	2.69	8.51	8.37	4.03	4.88	6.86
background [mBq]		0.0470				0.0706	0.3528		0.1176
aktivita [mBq]	45.23	6.49	2.19	12.94	1.29	3.36	7.99	3.93	2.75
count bez chvostů [imp]		699.71				367.33			
četnost [imp./mg]	188.47	27.05				14.01	33.30	16.35	11.46
hmot. aktivita [mBq/mg]	494.69	124.16				64.30	54.12	55.50	52.62
chyba [%]	9.49	8.99				12.46	8.12	8.96	10.95
chyba [mBq/mg]	46.97	11.16				8.01	4.39	4.97	5.76
% eU		1.01				0.52	0.44		0.43
chyba eU abs.		0.09				0.06	0.04		0.05
čas měření [s]	107002								
hmotnost [mg]	0.24								
chyba vážení [mg]	0.0098								
chyba vážení [%]	4.08								
FWHM ²¹⁴ Po	110.99								
FWHM ²³⁸ U	168.24								
konstanty citlivosti at	0.38						0.62	0.29	0.22
chyby [%]	3.97								

1J2_1B - goethit + kasolit

	R0 (2-10 Mev)	ROI 1	ROI 2	ROI 3	ROI 4	ROI 5	ROI 6	ROI 7	ROI 8
izotop	celk. alfa akt.	²³⁸ U	²³⁵ U	²³⁴ U	²²³ Ra	²¹⁰ Po	²²² Rn+ ²¹⁸ Po+ ²¹⁴ Po	²¹⁸ Po	²¹⁴ Po
šířka okna [CH]	818	30	17	42	10	30	79	55	30
šířka okna [keV]	8000	293.82	157.25	388.5	92.5	293.82	773.73	538.67	293.82
count [imp]	15761	2119	781	3874	590	1756	3002	1406	1094
sigma [%]	0.80	2.92	3.58	1.61	4.12	4.05	1.93	2.67	3.17
background [mBq]		0.0652				0.0307	0.1880		0.0460
aktivita [mBq]	300.19	37.36	14.88	73.78	11.24	25.86	56.99	26.78	20.79
count bez chvostů [imp]		1964.91				1359.38			
četnost [imp./mg]	1725.21	214.71				148.62	327.52	153.90	119.49
hmot. aktivita [mBq/mg]	4528.24	998.25				691.00	541.39	522.28	555.53
chyba [%]	9.89	8.03				9.16	7.04	7.78	8.28
chyba [mBq/mg]	447.62	80.20				63.32	38.14	40.64	46.00
% eU		8.08				5.60	4.38		4.50
chyba eU abs.		0.65				0.51	0.31		0.37
čas měření [s]	52504								
hmotnost [mg]	0.174								
chyba vážení [mg]	0.0089								
chyba vážení [%]	5.11								
FWHM ²¹⁴ Po	115.7								
FWHM ²³⁸ U	168.24								
konstanty citlivosti at	0.38						0.60	0.29	0.22
chyby [%]	3.97								

1J2_2 - kasolit

	R0 (2-10 Mev)	ROI 1	ROI 2	ROI 3	ROI 4	ROI 5	ROI 6	ROI 7	ROI 8
izotop	celk. alfa akt.	²³⁸ U	²³⁵ U	²³⁴ U	²²³ Ra	²¹⁰ Po	²²² Rn+ ²¹⁸ Po+ ²¹⁴ Po	²¹⁸ Po	²¹⁴ Po
šířka okna [CH]	818	30	17	42	10	30	79	55	30
šířka okna [keV]	8000	293.82	157.3	388.5	92.5	293.82	773.726	538.67	293.82
count [imp]	110165	14084	4637	22748	3970	12237	23697	11025	8373
sigma [%]	0.30	1.10	1.47	0.66	1.59	1.52	0.66	0.95	1.11
background [mBq]		0.0229				0.0000	0.1145		0.0344
aktivita [mBq]	1510.41	181.25	63.58	311.89	54.43	128.68	324.78	151.16	114.76
count bez chvostů [imp]		13221.50				9385.79			
četnost [imp./mg]	9209.84	1105.18				784.66	1980.38	921.69	699.78
hmot. aktivita [mBq/mg]	24173.50	5042.89				3580.34	3193.67	3127.85	3193.04
chyba [%]	13.42	10.24				10.67	9.81	10.10	10.26
chyba [mBq/mg]	3244.37	516.46				381.95	313.24	315.87	327.55
% eU		40.83				28.99	25.86		25.85
chyba eU abs.		4.18				3.09	2.54		2.65
čas měření [s]	72937								
hmotnost [mg]	0.164								
chyba vážení [mg]	0.0150								
chyba vážení [%]	9.15								
FWHM ²¹⁴ Po	108.82								
FWHM ²³⁸ U	168.24								
konstanty citlivosti at	0.38						0.62	0.29	0.22
chyby [%]	3.97								

1J2_5 - widenmannit

	R0 (2-10 Mev)	ROI 1	ROI 2	ROI 3	ROI 4	ROI 5	ROI 6	ROI 7	ROI 8
izotop	celk. alfa akt.	²³⁸ U	²³⁵ U	²³⁴ U	²²³ Ra	²¹⁰ Po	²²² Rn+ ²¹⁸ Po+ ²¹⁴ Po	²¹⁸ Po	²¹⁴ Po
šířka okna [CH]	818	30	17	42	10	30	79	55	30
šířka okna [keV]	8000	293.82	157.25	388.5	92.5	293.82	773.726	538.67	293.82
count [imp]	312592	47336	17428	59507	6205	21009	45362	22011	15239
sigma [%]	0.18	0.52	0.76	0.41	1.27	1.13	0.49	0.67	0.84
background [mBq]		0.1280				0.0650	0.3740		0.0772
aktivita [mBq]	1225.17	187.17	68.31	233.23	24.32	66.55	177.42	86.27	59.65
count bez chvostů [imp]		47787.00				16995.47			
četnost [imp./mg]	6125.87	935.84				332.74	887.09	431.35	298.25
hmot. aktivita [mBq/mg]	16078.86	4009.01				1425.39	1317.84	1463.82	1277.67
chyba [%]	9.05	5.42				6.03	5.39	5.57	5.74
chyba [mBq/mg]	1455.53	217.25				85.98	71.05	81.59	73.33
% eU		32.46				11.54	10.67		10.35
chyba eU abs.		1.76				0.70	0.58		0.59
čas měření [s]	255141								
hmotnost [mg]	0.2								
chyba vážení [mg]	0.0098								
chyba vážení [%]	4.90								
FWHM ²¹⁴ Po	84.71								
FWHM ²³⁸ U	168.24								
konstanty citlivosti at	0.38						0.67	0.29	0.23
chyby [%]	3.97								

1J3_1 - masuyit

	R0 (2-10 Mev)	ROI 1	ROI 2	ROI 3	ROI 4	ROI 5	ROI 6	ROI 7	ROI 8
izotop	celk. alfa akt.	²³⁸ U	²³⁵ U	²³⁴ U	²²³ Ra	²¹⁰ Po	²²² Rn+ ²¹⁸ Po+ ²¹⁴ Po	²¹⁸ Po	²¹⁴ Po
šířka okna [CH]	818	30	17	42	10	30	79	55	30
šířka okna [keV]	8000	293.82	157.25	388.5	92.5	293.82	773.726	538.67	293.82
count [imp]	7016	1690	667	2139	132	349	201	114	62
sigma [%]	1.19	2.57	3.87	2.16	8.70	7.17	7.05	9.37	17.45
background [mBq]		0.0229				0.0000	0.0000		0.0344
aktivita [mBq]	27.79	6.67	2.64	8.47	0.52	1.28	0.80	0.45	0.21
count bez chvostů [imp]						322.39			
četnost [imp./mg]	1736.70	416.90				79.80	49.75	28.22	13.20
hmot. aktivita [mBq/mg]	4558.39	1789.14				576.63	155.45	95.76	95.36
chyba [%]	82.67	80.07				84.67	84.55	86.87	94.95
chyba [mBq/mg]	3768.30	1432.65				488.23	131.44	83.19	90.55
% eU		14.49				4.67	1.26		0.77
chyba eU abs.		11.60				3.95	1.06		0.73
čas měření [s]	252491								
hmotnost [mg]	0.016								
chyba vážení [mg]	0.0124								
chyba vážení [%]	77.50								
FWHM ²³⁸ U	245.2								
konstanty citlivosti at	0.38	0.23					0.32	0.29	0.14
chyby [%]	3.97								

1J4_2 - Mn-oxidy

	R0 (2-10 Mev)	ROI 1	ROI 2	ROI 3	ROI 4	ROI 5	ROI 6	ROI 7	ROI 8
izotop	celk. alfa akt.	²³⁸ U	²³⁵ U	²³⁴ U	²²³ Ra	²¹⁰ Po	²²² Rn+ ²¹⁸ Po+ ²¹⁴ Po	²¹⁸ Po	²¹⁴ Po
šířka okna [CH]	818	30	17	42	10	30	79	55	30
šířka okna [keV]	8000	293.82	157.25	388.5	92.5	293.82	773.726	538.67	293.82
count [imp]	16424	1057	488	2698	782	2424	3085	1808	970
sigma [%]	0.78	5.10	4.53	1.93	3.58	3.12	1.91	2.35	3.39
background [mBq]		0.0987				0.0529	0.1374		0.0388
aktivita [mBq]	215.57	11.18	6.41	35.41	10.26	26.68	40.36	23.73	12.69
count bez chvostů [imp]		859.24				2036.76			
četnost [imp./mg]	804.38	41.71				99.56	150.58	88.55	47.36
hmot. aktivita [mBq/mg]	2111.30	200.26				477.95	259.73	300.50	227.38
chyba [%]	6.25	6.59				4.61	3.40	3.84	4.88
chyba [mBq/mg]	131.88	13.20				22.03	8.83	11.55	11.10
% eU		1.62				3.87	2.10		1.84
chyba eU abs.		0.11				0.18	0.07		0.09
čas měření [s]	76187								
hmotnost [mg]	0.268								
chyba vážení [mg]	0.0040								
chyba vážení [%]	1.49								
FWHM ²¹⁴ Po	127.16								
FWHM ²³⁸ U	168.24								
konstanty citlivosti at	0.38						0.58	0.29	0.21
chyby [%]	3.97								

1J5_1 - pyromorfit

	R0 (2-10 Mev)	ROI 1	ROI 2	ROI 3	ROI 4	ROI 5	ROI 6	ROI 7	ROI 8
izotop	celk. alfa akt.	²³⁸ U	²³⁵ U	²³⁴ U	²²³ Ra	²¹⁰ Po	²²² Rn+ ²¹⁸ Po+ ²¹⁴ Po	²¹⁸ Po	²¹⁴ Po
šířka okna [CH]	818	30	17	42	10	30	79	55	30
šířka okna [keV]	8000	293.82	157.25	388.5	92.5	293.82	773.726	538.7	293.82
count [imp]	13549	1603	617	2798	493	1511	2840	1343	1046
sigma [%]	0.86	4.84	4.03	1.89	4.50	5.75	2.17	2.73	3.55
background [mBq]		0.0470				0.0706	0.3528		0.1176
aktivita [mBq]	70.14	5.61	3.19	14.48	2.55	4.70	14.35	6.95	5.30
count bez chvostů [imp]		1093.00				920.78			
četnost [imp./mg]	130.86	10.47				8.76	26.77	12.97	9.88
hmot. aktivita [mBq/mg]	343.48	58.90				49.29	57.42	44.02	55.60
chyba [%]	5.75	5.76				6.67	3.08	3.64	4.46
chyba [mBq/mg]	19.74	3.39				3.29	1.77	1.60	2.48
% eU		0.48				0.40	0.46		0.45
chyba eU abs.		0.03				0.03	0.01		0.02
čas měření [s]	193167								
hmotnost [mg]	0.536								
chyba vážení [mg]	0.0049								
chyba vážení [%]	0.91								
FWHM ²¹⁴ Po	178.74								
FWHM ²³⁸ U	168.24								
konstanty citlivosti at	0.38						0.47	0.29	0.18
chyby [%]	3.97								

1J5_2 - pyromorfit

	R0 (2-10 Mev)	ROI 1	ROI 2	ROI 3	ROI 4	ROI 5	ROI 6	ROI 7	ROI 8
izotop	celk. alfa akt.	²³⁸ U	²³⁵ U	²³⁴ U	²²³ Ra	²¹⁰ Po	²²² Rn+ ²¹⁸ Po+ ²¹⁴ Po	²¹⁸ Po	²¹⁴ Po
šířka okna [CH]	818	30	17	42	10	30	79	55	30
šířka okna [keV]	8000	293.82	157.25	388.5	92.5	293.82	773.726	538.67	293.82
count [imp]	21382	2343	1083	3810	735	2155	3643	1882	1207
sigma [%]	0.68	3.93	3.04	1.62	3.69	4.52	1.94	2.31	3.38
background [mBq]		0.0470				0.0706	0.3528		0.1176
aktivita [mBq]	68.60	5.16	3.47	12.22	2.36	4.41	11.34	6.04	3.76
count bez chvostů [imp]		1623.59				1397.76			
četnost [imp./mg]	106.86	8.04				6.88	17.66	9.41	5.85
hmot. aktivita [mBq/mg]	280.48	48.42				41.40	41.75	31.92	35.22
chyba [%]	6.18	5.46				6.05	3.47	3.83	4.91
chyba [mBq/mg]	17.34	2.64				2.50	1.45	1.22	1.73
% eU		0.39				0.34	0.34		0.29
chyba eU abs.		0.02				0.02	0.01		0.01
čas měření [s]	311669								
hmotnost [mg]	0.642								
chyba vážení [mg]	0.0098								
chyba vážení [%]	1.53								
FWHM ²¹⁴ Po	198.46								
FWHM ²³⁸ U	168.24								
konstanty citlivosti at	0.38						0.42	0.29	0.17
chyby [%]	3.97								

2J1_1 - cerusit

	R0 (2-10 Mev)	ROI 1	ROI 2	ROI 3	ROI 4	ROI 5	ROI 6	ROI 7	ROI 8
izotop	celk. alfa akt.	²³⁸ U	²³⁵ U	²³⁴ U	²²³ Ra	²¹⁰ Po	²²² Rn+ ²¹⁸ Po+ ²¹⁴ Po	²¹⁸ Po	²¹⁴ Po
šířka okna [CH]	818	30	17	42	10	30	79	55	30
šířka okna [keV]	8000	293.82	157.25	388.5	92.5	293.82	773.726	538.67	293.82
count [imp]	358	33	13	470	5	34	35	24	12
sigma [%]	5.29	37.09	27.74	4.61	44.72	27.44	32.88	20.41	54.40
background [mBq]		0.0229				0.0000	0.1145		0.0344
aktivita [mBq]	1.31	0.07	0.05	1.72	0.02	0.10	0.01	0.09	0.01
count bez chvostů [imp]		25.75				26.41			
četnost [imp./mg]	13.38	0.73				0.99	0.14	0.90	0.10
hmot. aktivita [mBq/mg]	35.13	4.41				5.98	0.33	3.04	0.59
chyba [%]	23.34	51.17				41.52	46.96	34.49	68.49
chyba [mBq/mg]	8.20	2.26				2.48	0.16	1.05	0.40
% eU		0.03573				0.04840	0.00270		0.00478
chyba eU abs.		0.01828				0.02010	0.00127		0.00328
čas měření [s]	272976								
hmotnost [mg]	0.098								
chyba vážení [mg]	0.0138								
chyba vážení [%]	14.08								
FWHM ²¹⁴ Po	200								
FWHM ²³⁸ U	168.24								
konstanty citlivosti at	0.38						0.42	0.29	0.17
chyby [%]	3.97								

2J1_3 - pyromorfit

	R0 (2-10 Mev)	ROI 1	ROI 2	ROI 3	ROI 4	ROI 5	ROI 6	ROI 7	ROI 8
izotop	celk. alfa akt.	²³⁸ U	²³⁵ U	²³⁴ U	²²³ Ra	²¹⁰ Po	²²² Rn+ ²¹⁸ Po+ ²¹⁴ Po	²¹⁸ Po	²¹⁴ Po
šířka okna [CH]	818	30	17	42	10	30	79	55	30
šířka okna [keV]	8000	293.82	157.25	388.5	92.5	293.82	773.726	538.67	293.82
count [imp]	32670	4169	1661	6130	1047	3311	5374	2669	1877
sigma [%]	0.55	2.40	2.45	1.28	3.09	3.18	1.51	1.94	2.54
background [mBq]		0.0693				0.0287	0.1434		0.0430
aktivita [mBq]	73.96	7.91	3.76	13.88	2.37	5.43	12.02	6.04	4.21
count bez chvostů [imp]		3525.75				2410.08			
četnost [imp./mg]	528.30	56.52				38.77	85.88	43.16	30.05
hmot. aktivita [mBq/mg]	1386.65	292.32				200.51	163.82	146.47	155.39
chyba [%]	11.53	9.40				10.18	8.51	8.94	9.54
chyba [mBq/mg]	159.84	27.47				20.42	13.94	13.09	14.83
% eU		2.37				1.62	1.33		1.26
chyba eU abs.		0.22				0.17	0.11		0.12
čas měření [s]	441716								
hmotnost [mg]	0.14								
chyba vážení [mg]	0.0098								
chyba vážení [%]	7.00								
FWHM ²¹⁴ Po	152.4								
FWHM ²³⁸ U	168.24								
konstanty citlivosti at	0.38						0.52	0.29	0.19
chyby [%]	3.97								

2J1_4 - pyromorfit

	R0 (2-10 Mev)	ROI 1	ROI 2	ROI 3	ROI 4	ROI 5	ROI 6	ROI 7	ROI 8
izotop	celk. alfa akt.	²³⁸ U	²³⁵ U	²³⁴ U	²²³ Ra	²¹⁰ Po	²²² Rn+ ²¹⁸ Po+ ²¹⁴ Po	²¹⁸ Po	²¹⁴ Po
šířka okna [CH]	818	30	17	42	10	30	79	55	30
šířka okna [keV]	8000	293.82	157.25	388.5	92.5	293.82	773.726	538.67	293.82
count [imp]	14140	1571	733	2536	504	1820	2038	1036	699
sigma [%]	0.84	4.47	3.69	1.99	4.45	4.02	2.68	3.11	4.46
background [mBq]		0.0652				0.0307	0.1880		0.0460
aktivita [mBq]	29.10	2.45	1.51	5.22	1.04	2.89	4.01	2.13	1.39
count bez chvostů [imp]		1220.73				1420.07			
četnost [imp./mg]	606.21	50.98				60.24	83.46	44.42	29.01
hmot. aktivita [mBq/mg]	1591.16	289.16				341.72	181.09	150.73	164.55
chyba [%]	25.23	24.88				24.44	23.10	23.52	24.88
chyba [mBq/mg]	401.47	71.95				83.51	41.83	35.46	40.93
% eU		2.34				2.77	1.47		1.33
chyba eU abs.		0.58				0.68	0.34		0.33
čas měření [s]	485939								
hmotnost [mg]	0.048								
chyba vážení [mg]	0.0098								
chyba vážení [%]	20.42								
FWHM ²¹⁴ Po	181.2								
FWHM ²³⁸ U	168.24								
konstanty citlivosti at	0.38						0.46	0.29	0.18
chyby [%]	3.97								

2J1_5 - Mn-oxidy

	R0 (2-10 Mev)	ROI 1	ROI 2	ROI 3	ROI 4	ROI 5	ROI 6	ROI 7	ROI 8
izotop	celk. alfa akt.	²³⁸ U	²³⁵ U	²³⁴ U	²²³ Ra	²¹⁰ Po	²²² Rn+ ²¹⁸ Po+ ²¹⁴ Po	²¹⁸ Po	²¹⁴ Po
šířka okna [CH]	818	30	17	42	10	30	79	55	30
šířka okna [keV]	8000	293.82	157.25	388.5	92.5	293.82	773.726	538.67	293.82
count [imp]	13777	1772	710	3107	423	1270	2473	1161	875
sigma [%]	0.85	3.39	3.75	1.79	4.86	5.25	2.55	2.93	4.08
background [mBq]		0.1280				0.0650	0.3740		0.0772
aktivita [mBq]	28.66	3.42	1.48	6.46	0.88	1.98	4.77	2.42	1.74
count bez chvostů [imp]		1703.33				984.53			
četnost [imp./mg]	186.12	22.18				12.88	30.98	15.68	11.32
hmot. aktivita [mBq/mg]	488.51	100.00				58.06	49.18	53.23	51.03
chyba [%]	10.60	9.17				11.02	8.33	8.71	9.86
chyba [mBq/mg]	51.81	9.17				6.40	4.10	4.64	5.03
% eU		0.81				0.47	0.40		0.41
chyba eU abs.		0.07				0.05	0.03		0.04
čas měření [s]	480673								
hmotnost [mg]	0.154								
chyba vážení [mg]	0.0089								
chyba vážení [%]	5.78								
FWHM ²¹⁴ Po	104.36								
FWHM ²³⁸ U	168.24								
konstanty citlivosti at	0.38						0.63	0.29	0.22
chyby [%]	3.97								

2J2_1 - widenmannit

	R0 (2-10 Mev)	ROI 1	ROI 2	ROI 3	ROI 4	ROI 5	ROI 6	ROI 7	ROI 8
izotop	celk. alfa akt.	²³⁸ U	²³⁵ U	²³⁴ U	²²³ Ra	²¹⁰ Po	²²² Rn+ ²¹⁸ Po+ ²¹⁴ Po	²¹⁸ Po	²¹⁴ Po
šířka okna [CH]	818	30	17	42	10	30	79	55	30
šířka okna [keV]	8000	293.82	157.25	388.5	92.5	293.82	773.726	538.67	293.82
count [imp]	34955	12049	4197	6389	65	247	138	74	44
sigma [%]	0.53	0.92	1.54	1.25	12.40	8.36	8.51	11.62	19.14
background [mBq]		0.0229				0.0000	0.0000		0.0344
aktivita [mBq]	376.48	129.75	45.20	68.81	0.70	2.48	1.49	0.80	0.44
count bez chvostů [imp]						230.31			
četnost [imp./mg]	1940.64	668.82				12.79	7.66	4.11	2.27
hmot. aktivita [mBq/mg]	5093.68	2748.39				79.35	18.94	13.94	14.06
chyba [%]	10.28	6.70				14.14	14.29	17.40	24.91
chyba [mBq/mg]	523.71	184.04				11.22	2.71	2.43	3.50
% eU		22.25				0.64	0.15		0.11
chyba eU abs.		1.49				0.09	0.02		0.03
čas měření [s]	92846								
hmotnost [mg]	0.194								
chyba vážení [mg]	0.0112								
chyba vážení [%]	5.77								
FWHM ²³⁸ U	206.8								
konstanty citlivosti at	0.38								
chyby [%]	3.97								

2J2_2 - anglesit

	R0 (2-10 Mev)	ROI 1	ROI 2	ROI 3	ROI 4	ROI 5	ROI 6	ROI 7	ROI 8
izotop	celk. alfa akt.	²³⁸ U	²³⁵ U	²³⁴ U	²²³ Ra	²¹⁰ Po	²²² Rn+ ²¹⁸ Po+ ²¹⁴ Po	²¹⁸ Po	²¹⁴ Po
šířka okna [CH]	818	30	17	42	10	30	79	55	30
šířka okna [keV]	8000	293.82	157.25	388.5	92.5	293.82	773.726	538.67	293.82
count [imp]	3250	690	262	1117	95	294	306	134	116
sigma [%]	1.75	4.60	6.18	2.99	10.26	8.46	6.77	8.64	10.81
background [mBq]		0.0229				0.0000	0.1145		0.0344
aktivita [mBq]	35.75	7.40	2.88	12.29	1.05	2.78	3.25	1.47	1.24
count bez chvostů [imp]		674.58				252.48			
četnost [imp./mg]	229.20	47.43				17.81	20.85	9.45	7.96
hmot. aktivita [mBq/mg]	601.58	219.63				82.46	34.28	32.07	36.86
chyba [%]	14.89	13.76				17.63	15.94	17.81	19.98
chyba [mBq/mg]	89.60	30.23				14.54	5.46	5.71	7.36
% eU		1.78				0.67	0.28		0.30
chyba eU abs.		0.24				0.12	0.04		0.06
čas měření [s]	90897								
hmotnost [mg]	0.156								
chyba vážení [mg]	0.0143								
chyba vážení [%]	9.17								
FWHM ²¹⁴ Po	114.26								
FWHM ²³⁸ U	168.24								
konstanty citlivosti at	0.38						0.61	0.29	0.22
chyby [%]	3.97								

2J2_3B - kasolit

	R0 (2-10 Mev)	ROI 1	ROI 2	ROI 3	ROI 4	ROI 5	ROI 6	ROI 7	ROI 8
izotop	celk. alfa akt.	²³⁸ U	²³⁵ U	²³⁴ U	²²³ Ra	²¹⁰ Po	²²² Rn+ ²¹⁸ Po+ ²¹⁴ Po	²¹⁸ Po	²¹⁴ Po
šířka okna [CH]	818	30	17	42	10	30	79	55	30
šířka okna [keV]	8000	293.82	157.25	388.5	92.5	293.82	773.726	538.67	293.82
count [imp]	201184	23638	9909	37842	7424	22691	35895	18344	12666
sigma [%]	0.22	1.21	1.00	0.51	1.16	1.30	0.54	0.74	0.90
background [mBq]		0.0229				0.0000	0.1145		0.0344
aktivita [mBq]	3033.03	239.40	149.39	570.50	111.92	220.47	541.04	276.55	190.92
count bez chvostů [imp]		15881.09				14623.92			
četnost [imp./mg]	10458.73	825.51				760.24	1865.64	953.63	658.33
hmot. aktivita [mBq/mg]	27451.53	5024.21				4626.93	4481.13	3236.22	4006.73
chyba [%]	8.64	5.66				5.74	4.98	5.19	5.35
chyba [mBq/mg]	2373.13	284.16				265.81	223.33	167.85	214.31
% eU		40.68				37.46	36.28		32.44
chyba eU abs.		2.30				2.15	1.81		1.74
čas měření [s]	66331								
hmotnost [mg]	0.29								
chyba vážení [mg]	0.0129								
chyba vážení [%]	4.45								
FWHM ²¹⁴ Po	201.44								
FWHM ²³⁸ U	168.24								
konstanty citlivosti at	0.38						0.42	0.29	0.16
chyby [%]	3.97								

2J2_10A - kasolit

	R0 (2-10 Mev)	ROI 1	ROI 2	ROI 3	ROI 4	ROI 5	ROI 6	ROI 7	ROI 8
izotop	celk. alfa akt.	²³⁸ U	²³⁵ U	²³⁴ U	²²³ Ra	²¹⁰ Po	²²² Rn+ ²¹⁸ Po+ ²¹⁴ Po	²¹⁸ Po	²¹⁴ Po
šířka okna [CH]	818	30	17	42	10	30	79	55	30
šířka okna [keV]	8000	293.82	157.25	388.5	92.5	293.82	773.726	538.67	293.82
count [imp]	137621	24539	10176	37658	3536	10567	12693	6760	4475
sigma [%]	0.27	0.91	0.99	0.52	1.68	1.81	0.89	1.22	1.49
background [mBq]		0.0000				0.0000	0.0000		0.0000
aktivita [mBq]	3177.58	478.31	234.96	869.50	81.64	163.63	293.07	156.08	103.32
count bez chvostů [imp]		20715.47				7086.76			
četnost [imp./mg]	8451.01	1272.09				435.18	779.45	415.12	274.80
hmot. aktivita [mBq/mg]	22181.77	9201.37				3147.78	2439.35	1408.74	1987.70
chyba [%]	5.55	2.21				3.11	2.19	2.52	2.80
chyba [mBq/mg]	1230.27	203.52				97.89	53.44	35.49	55.62
% eU		74.50				25.49	19.75		16.09
chyba eU abs.		1.65				0.79	0.43		0.45
čas měření [s]	43310								
hmotnost [mg]	0.376								
chyba vážení [mg]	0.0049								
chyba vážení [%]	1.30								
FWHM ²¹⁴ Po	245.44								
FWHM ²³⁸ U	168.24								
konstanty citlivosti at	0.38						0.32	0.29	0.14
chyby [%]	3.97								

2J2_11 - U-Pb oxid (amorf.)

	R0 (2-10 Mev)	ROI 1	ROI 2	ROI 3	ROI 4	ROI 5	ROI 6	ROI 7	ROI 8
izotop	celk. alfa akt.	²³⁸ U	²³⁵ U	²³⁴ U	²²³ Ra	²¹⁰ Po	²²² Rn+ ²¹⁸ Po+ ²¹⁴ Po	²¹⁸ Po	²¹⁴ Po
šířka okna [CH]	818	30	17	42	10	30	79	55	30
šířka okna [keV]	8000	293.82	157.25	388.5	92.5	293.82	773.726	538.67	293.82
count [imp]	113141	38497	16222	19181	32	84	54	32	23
sigma [%]	0.30	0.52	0.79	0.72	17.68	19.04	13.61	17.68	28.19
background [mBq]		0.0987				0.0529	0.0000		0.0388
aktivita [mBq]	1540.32	524.01	220.85	261.13	0.44	0.94	0.74	0.44	0.27
count bez chvostů [imp]						72.76			
četnost [imp./mg]	3044.11	1035.58				1.85	1.45	0.86	0.54
hmot. aktivita [mBq/mg]	7990.01	4691.87				16.65	6.62	2.92	4.87
chyba [%]	5.85	2.10				20.62	15.19	19.26	29.77
chyba [mBq/mg]	467.57	98.42				3.43	1.01	0.56	1.45
% eU		37.99				0.13	0.05		0.04
chyba eU abs.		0.80				0.03	0.01		0.01
čas měření [s]	73453								
hmotnost [mg]	0.506								
chyba vážení [mg]	0.0080								
chyba vážení [%]	1.58								
FWHM ²³⁸ U	290.9								
konstanty citlivosti at	0.38	0.22					0.22	0.29	0.11
chyby [%]	3.97								

2J2_12 - galenit

	R0 (2-10 Mev)	ROI 1	ROI 2	ROI 3	ROI 4	ROI 5	ROI 6	ROI 7	ROI 8
izotop	celk. alfa akt.	²³⁸ U	²³⁵ U	²³⁴ U	²²³ Ra	²¹⁰ Po	²²² Rn+ ²¹⁸ Po+ ²¹⁴ Po	²¹⁸ Po	²¹⁴ Po
šířka okna [CH]	818	30	17	42	10	30	79	55	30
šířka okna [keV]	8000	293.82	157.25	388.5	92.5	293.82	773.726	538.67	293.82
count [imp]	1318	169	78	583	28	112	133	79	48
sigma [%]	2.75	15.45	11.32	4.14	18.90	21.47	13.82	11.25	22.01
background [mBq]		0.0987				0.0529	0.1374		0.0388
aktivita [mBq]	3.87	0.31	0.23	1.71	0.08	0.19	0.25	0.23	0.10
count bez chvostů [imp]		139.71				81.49			
četnost [imp/mg]	1.68	0.14				0.08	0.11	0.10	0.04
hmot. aktivita [mBq/mg]	4.41	0.82				0.49	0.26	0.34	0.27
chyba [%]	7.11	15.84				21.86	14.20	11.64	22.40
chyba [mBq/mg]	0.31	0.13				0.11	0.04	0.04	0.06
% eU		0.00665				0.00398	0.00213		0.00218
chyba eU abs.		0.00105				0.00087	0.00030		0.00049
čas měření [s]	340745								
hmotnost [mg]	2.304								
chyba vážení [mg]	0.0089								
chyba vážení [%]	0.39								
FWHM ²¹⁴ Po	201.03								
FWHM ²³⁸ U	168.24								
konstanty citlivosti at	0.38						0.42	0.29	0.16
chyby [%]	3.97								

2J2_13 - cerusit

	R0 (2-10 Mev)	ROI 1	ROI 2	ROI 3	ROI 4	ROI 5	ROI 6	ROI 7	ROI 8
izotop	celk. alfa akt.	²³⁸ U	²³⁵ U	²³⁴ U	²²³ Ra	²¹⁰ Po	²²² Rn+ ²¹⁸ Po+ ²¹⁴ Po	²¹⁸ Po	²¹⁴ Po
šířka okna [CH]	818	30	17	42	10	30	79	55	30
šířka okna [keV]	8000	293.82	157.25	388.5	92.5	293.82	773.726	538.67	293.82
count [imp]	1025	166	79	566	36	97	102	55	37
sigma [%]	3.12	12.62	11.25	4.20	16.67	19.35	9.90	13.48	29.69
background [mBq]		0.1661				0.0695	0.0000		0.0695
aktivita [mBq]	2.96	0.32	0.23	1.64	0.10	0.19	0.29	0.16	0.04
count bez chvostů [imp]		168.89				88.30			
četnost [imp/mg]	64.42	7.00				4.04	6.41	3.46	0.81
hmot. aktivita [mBq/mg]	169.09	29.35				16.92	9.26	11.73	3.41
chyba [%]	26.44	31.97				38.69	29.25	32.83	49.04
chyba [mBq/mg]	44.72	9.38				6.55	2.71	3.85	1.67
% eU		0.24				0.14	0.07		0.03
chyba eU abs.		0.08				0.05	0.02		0.01
čas měření [s]	345883								
hmotnost [mg]	0.046								
chyba vážení [mg]	0.0089								
chyba vážení [%]	19.35								
FWHM ²¹⁴ Po	75.9								
FWHM ²³⁸ U	168.24								
konstanty citlivosti at	0.38						0.69	0.29	0.24
chyby [%]	3.97								

2J4_1 - kasolit

	R0 (2-10 Mev)	ROI 1	ROI 2	ROI 3	ROI 4	ROI 5	ROI 6	ROI 7	ROI 8
izotop	celk. alfa akt.	²³⁸ U	²³⁵ U	²³⁴ U	²²³ Ra	²¹⁰ Po	²²² Rn+ ²¹⁸ Po+ ²¹⁴ Po	²¹⁸ Po	²¹⁴ Po
šířka okna [CH]	818	30	17	42	10	30	79	55	30
šířka okna [keV]	8000	293.82	157.25	388.5	92.5	293.82	773.726	538.67	293.82
count [imp]	91556	11062	4832	17841	3367	9852	15418	8077	5367
sigma [%]	0.33	1.57	1.44	0.75	1.72	1.86	0.81	1.11	1.37
background [mBq]		0.0000				0.0000	0.0000		0.0000
aktivita [mBq]	1297.45	117.34	68.47	252.83	47.71	95.34	218.49	114.46	76.06
count bez chvostů [imp]		8280.20				6727.57			
četnost [imp./mg]	11184.93	1011.55				821.87	1883.54	986.73	655.66
hmot. aktivita [mBq/mg]	29357.62	5798.85				4711.50	4149.00	3348.54	3758.66
chyba [%]	16.20	13.47				13.76	12.70	13.01	13.26
chyba [mBq/mg]	4756.11	781.02				648.31	527.00	435.62	498.46
% eU		46.95				38.15	33.60		30.43
chyba eU abs.		6.32				5.25	4.27		4.04
čas měření [s]	70566								
hmotnost [mg]	0.116								
chyba vážení [mg]	0.0138								
chyba vážení [%]	11.90								
FWHM ²¹⁴ Po	184.33								
FWHM ²³⁸ U	168.24								
konstanty citlivosti at	0.38						0.45	0.29	0.17
chyby [%]	3.97								

2J5_1 - metaautunit

	R0 (2-10 Mev)	ROI 1	ROI 2	ROI 3	ROI 4	ROI 5	ROI 6	ROI 7	ROI 8
izotop	celk. alfa akt.	²³⁸ U	²³⁵ U	²³⁴ U	²²³ Ra	²¹⁰ Po	²²² Rn+ ²¹⁸ Po+ ²¹⁴ Po	²¹⁸ Po	²¹⁴ Po
šířka okna [CH]	818	30	17	42	10	30	79	55	30
šířka okna [keV]	8000	293.82	157.25	388.5	92.5	293.82	773.726	538.67	293.82
count [imp]	33179	10672	3412	6085	105	401	520	289	176
sigma [%]	0.55	0.98	1.71	1.28	9.76	7.66	4.39	5.88	8.39
background [mBq]		0.0229				0.0000	0.0000		0.0344
aktivita [mBq]	507.78	163.30	52.22	93.13	1.61	5.23	7.96	4.42	2.66
count bez chvostů [imp]						341.86			
četnost [imp./mg]	3297.29	1060.42				33.97	51.68	28.72	17.27
hmot. aktivita [mBq/mg]	8654.55	4202.83				187.85	108.16	97.47	95.48
chyba [%]	11.80	8.25				14.93	11.66	13.16	15.66
chyba [mBq/mg]	1020.83	346.83				28.05	12.61	12.82	14.95
% eU		34.03				1.52	0.88		0.77
chyba eU abs.		2.81				0.23	0.10		0.12
čas měření [s]	65341								
hmotnost [mg]	0.154								
chyba vážení [mg]	0.0112								
chyba vážení [%]	7.27								
FWHM ²³⁸ U	173.5								
konstanty citlivosti at	0.38	0.25					0.48	0.29	0.18
chyby [%]	3.97								

2J5_3 - Mn-oxidy

	R0 (2-10 Mev)	ROI 1	ROI 2	ROI 3	ROI 4	ROI 5	ROI 6	ROI 7	ROI 8
izotop	celk. alfa akt.	²³⁸ U	²³⁵ U	²³⁴ U	²²³ Ra	²¹⁰ Po	²²² Rn+ ²¹⁸ Po+ ²¹⁴ Po	²¹⁸ Po	²¹⁴ Po
šířka okna [CH]	818	30	17	42	10	30	79	55	30
šířka okna [keV]	8000	293.82	157.25	388.5	92.5	293.82	773.726	538.67	293.82
count [imp]	22675	4999	2438	3368	265	781	814	886	41
sigma [%]	0.66	1.50	2.03	1.72	6.14	4.68	3.50	3.36	22.05
background [mBq]		0.0987				0.0529	0.0000		0.0388
aktivita [mBq]	126.59	27.81	13.61	18.80	1.48	4.17	4.54	4.95	0.19
count bez chvostů [imp]						757.25			
četnost [imp/mg]	202.86	44.57				6.69	7.28	7.93	0.30
hmot. aktivita [mBq/mg]	532.47	220.66				95.50	110.04	26.90	4.35
chyba [%]	6.06	2.92				6.11	4.93	4.79	23.47
chyba [mBq/mg]	32.29	6.45				5.84	5.43	1.29	1.02
% eU		1.79				0.77	0.89		0.04
chyba eU abs.		0.05				0.05	0.04		0.01
čas měření [s]	179125								
hmotnost [mg]	0.624								
chyba vážení [mg]	0.0089								
chyba vážení [%]	1.43								
FWHM ²³⁸ U	360.6								
konstanty citlivosti at	0.38	0.20					0.07	0.29	0.07
chyby [%]	3.97								

2J5_4 - Mn-oxidy

	R0 (2-10 Mev)	ROI 1	ROI 2	ROI 3	ROI 4	ROI 5	ROI 6	ROI 7	ROI 8
izotop	celk. alfa akt.	²³⁸ U	²³⁵ U	²³⁴ U	²²³ Ra	²¹⁰ Po	²²² Rn+ ²¹⁸ Po+ ²¹⁴ Po	²¹⁸ Po	²¹⁴ Po
šířka okna [CH]	818	30	17	42	10	30	79	55	30
šířka okna [keV]	8000	293.82	157.25	388.5	92.5	293.82	773.726	538.67	293.82
count [imp]	11632	915	379	2065	560	1599	2413	1288	863
sigma [%]	0.93	11.95	5.14	2.20	4.23	5.21	2.23	2.79	3.69
background [mBq]		0.0987				0.0529	0.1374		0.0388
aktivita [mBq]	75.87	2.07	2.47	13.47	3.65	6.58	15.60	8.40	5.59
count bez chvostů [imp]		331.85				1017.56			
četnost [imp/mg]	145.90	3.97				12.66	30.00	16.16	10.75
hmot. aktivita [mBq/mg]	382.96	25.22				80.40	76.73	54.83	68.26
chyba [%]	6.79	13.84				7.10	4.11	4.67	5.57
chyba [mBq/mg]	25.99	3.49				5.71	3.15	2.56	3.80
% eU		0.20				0.65	0.62		0.55
chyba eU abs.		0.03				0.05	0.03		0.03
čas měření [s]	153314								
hmotnost [mg]	0.52								
chyba vážení [mg]	0.0098								
chyba vážení [%]	1.88								
FWHM ²¹⁴ Po	212.95								
FWHM ²³⁸ U	168.24						0.39	0.29	0.16
konstanty citlivosti at	0.38								
chyby [%]	3.97								

2J5_5 - uranové černě

	R0 (2-10 Mev)	ROI 1	ROI 2	ROI 3	ROI 4	ROI 5	ROI 6	ROI 7	ROI 8
izotop	celk. alfa akt.	²³⁸ U	²³⁵ U	²³⁴ U	²²³ Ra	²¹⁰ Po	²²² Rn+ ²¹⁸ Po+ ²¹⁴ Po	²¹⁸ Po	²¹⁴ Po
šířka okna [CH]	818	30	17	42	10	30	79	55	30
šířka okna [keV]	8000	293.82	157.25	388.5	92.5	293.82	773.726	538.67	293.82
count [imp]	64067	8226	3552	8474	1896	6063	10733	6126	3553
sigma [%]	0.40	2.37	1.68	1.09	2.30	3.18	0.97	1.28	1.68
background [mBq]		0.0000				0.0000	0.0000		0.0000
aktivita [mBq]	662.67	48.28	36.74	87.65	19.61	30.99	111.02	63.36	36.75
count bez chvostů [imp]		4667.71				2995.78			
četnost [imp./mg]	1304.47	95.04				61.00	218.53	124.73	72.34
hmot. aktivita [mBq/mg]	3423.90	776.37				498.28	838.25	423.29	590.96
chyba [%]	6.30	4.30				5.11	2.89	3.21	3.61
chyba [mBq/mg]	215.63	33.39				25.47	24.26	13.57	21.31
% eU		6.29				4.03	6.79		4.79
chyba eU abs.		0.27				0.21	0.20		0.17
čas měření [s]	96680								
hmotnost [mg]	0.508								
chyba vážení [mg]	0.0098								
chyba vážení [%]	1.93								
FWHM ²¹⁴ Po	272.18								
FWHM ²³⁸ U	168.24								
konstanty citlivosti at	0.38						0.26	0.29	0.12
chyby [%]	3.97								

2J5_6 - jarosit

	R0 (2-10 Mev)	ROI 1	ROI 2	ROI 3	ROI 4	ROI 5	ROI 6	ROI 7	ROI 8
izotop	celk. alfa akt.	²³⁸ U	²³⁵ U	²³⁴ U	²²³ Ra	²¹⁰ Po	²²² Rn+ ²¹⁸ Po+ ²¹⁴ Po	²¹⁸ Po	²¹⁴ Po
šířka okna [CH]	818	30	17	42	10	30	79	30	30
šířka okna [keV]	8000	293.82	157.25	388.5	92.5	293.82	773.726	293.82	293.82
count [imp]	15050	276	107	1157	458	1590	3180	1296	336
sigma [%]	0.82	---	9.67	2.94	4.67	3.21	1.96	2.78	6.26
background [mBq]		0.1280				0.0650	0.3740		0.0772
aktivita [mBq]	158.94	3.54	1.13	12.22	4.84	16.17	33.21	13.69	3.47
count bez chvostů [imp]		347.50				1537.32			
četnost [imp./mg]	345.52	7.70				35.15	72.19	29.75	7.55
hmot. aktivita [mBq/mg]	906.91	30.41				138.86	96.72	117.53	29.81
chyba [%]	6.92	---				5.34	4.09	4.91	8.39
chyba [mBq/mg]	62.75	---				7.42	3.96	5.77	2.50
% eU		0.25				1.12	0.78	0.95	0.24
chyba eU abs.		---				0.06	0.03	0.05	0.02
čas měření [s]	94690								
hmotnost [mg]	0.46								
chyba vážení [mg]	0.0098								
chyba vážení [%]	2.13								
FWHM ²¹⁴ Po	51.4								
FWHM ²³⁸ U	168.24								
konstanty citlivosti at	0.38						0.75	0.29	0.25
chyby [%]	3.97								

2J5_7 - jarosit

	R0 (2-10 Mev)	ROI 1	ROI 2	ROI 3	ROI 4	ROI 5	ROI 6	ROI 7	ROI 8
izotop	celk. alfa akt.	²³⁸ U	²³⁵ U	²³⁴ U	²²³ Ra	²¹⁰ Po	²²² Rn+ ²¹⁸ Po+ ²¹⁴ Po	²¹⁵ Po	²¹⁴ Po
šířka okna [CH]	818	30	17	42	10	30	79	30	30
šířka okna [keV]	8000	293.82	157.25	388.5	92.5	293.82	773.726	293.82	293.82
count [imp]	18493	525	231	1413	494	1610	3701	1509	290
sigma [%]	0.74	5.82	6.58	2.66	4.50	3.17	1.64	2.57	6.77
background [mBq]		0.0000				0.0000	0.0000		0.0695
aktivita [mBq]	188.75	4.88	2.36	14.42	5.04	15.32	37.77	15.40	2.89
count bez chvostů [imp]		478.25				1501.43			
četnost [imp./mg]	274.35	7.09				22.27	54.90	22.39	4.20
hmot. aktivita [mBq/mg]	720.09	33.33				104.63	92.00	105.15	19.73
chyba [%]	6.00	7.12				4.46	2.94	3.87	8.07
chyba [mBq/mg]	43.22	2.37				4.67	2.70	4.07	1.59
% eU		0.27				0.85	0.74	0.85	0.16
chyba eU abs.		0.02				0.04	0.02	0.03	0.01
čas měření [s]	97976								
hmotnost [mg]	0.688								
chyba vážení [mg]	0.0089								
chyba vážení [%]	1.29								
FWHM ²¹⁴ Po	119.4								
FWHM ²³⁸ U	168.24								
konstanty citlivosti at	0.38						0.60	0.29	0.21
chyby [%]	3.97								

2J5_8 - uraninit

	R0 (2-10 Mev)	ROI 1	ROI 2	ROI 3	ROI 4	ROI 5	ROI 6	ROI 7	ROI 8
izotop	celk. alfa akt.	²³⁸ U	²³⁵ U	²³⁴ U	²²³ Ra	²¹⁰ Po	²²² Rn+ ²¹⁸ Po+ ²¹⁴ Po	²¹⁸ Po	²¹⁴ Po
šířka okna [CH]	818	30	17	42	10	30	79	55	30
šířka okna [keV]	8000	293.82	157.25	388.5	92.5	293.82	773.726	538.67	293.82
count [imp]	531315	61966	25541	100542	19947	61267	105512	51645	37999
sigma [%]	0.14	0.82	0.63	0.32	0.71	0.85	0.31	0.44	0.51
background [mBq]		0.0000				0.0000	0.0000		0.0000
aktivita [mBq]	6649.33	469.74	319.64	1258.27	249.63	455.42	1320.47	646.33	475.55
count bez chvostů [imp]		37534.73				36390.27			
četnost [imp./mg]	22463.96	1586.97				1538.58	4461.04	2183.55	1606.60
hmot. aktivita [mBq/mg]	58962.24	9855.68				9555.17	11038.85	7410.05	9977.58
chyba [%]	7.42	4.13				4.17	3.62	3.75	3.82
chyba [mBq/mg]	4375.92	407.13				397.98	399.46	277.94	381.52
% eU		79.80				77.37	89.38		80.79
chyba eU abs.		3.30				3.22	3.23		3.09
čas měření [s]	79905								
hmotnost [mg]	0.296								
chyba vážení [mg]	0.0098								
chyba vážení [%]	3.31								
FWHM ²¹⁴ Po	206.99								
FWHM ²³⁸ U	168.24								
konstanty citlivosti at	0.38						0.40	0.29	0.16
chyby [%]	3.97								

2J5_9 - Mn-oxidy

	R0 (2-10 Mev)	ROI 1	ROI 2	ROI 3	ROI 4	ROI 5	ROI 6	ROI 7	ROI 8
izotop	celk. alfa akt.	²³⁸ U	²³⁵ U	²³⁴ U	²²³ Ra	²¹⁰ Po	²²² Rn+ ²¹⁸ Po+ ²¹⁴ Po	²¹⁸ Po	²¹⁴ Po
šířka okna [CH]	818	30	17	42	10	30	79	55	30
šířka okna [keV]	8000	293.82	157.25	388.5	92.5	293.82	773.726	538.67	293.82
count [imp]	22609	2509	898	4689	911	2921	4677	2306	1695
sigma [%]	0.67	4.11	3.34	1.46	3.31	3.73	1.73	2.08	2.77
background [mBq]		0.1280				0.0650	0.3740		0.0772
aktivita [mBq]	52.47	3.82	2.08	10.88	2.11	4.52	10.48	5.35	3.86
count bez chvostů [imp]		1701.03				1975.31			
četnost [imp./mg]	150.76	10.98				12.99	30.11	15.38	11.08
hmot. aktivita [mBq/mg]	395.72	61.34				72.57	63.98	52.18	61.93
chyba [%]	7.20	6.67				6.29	4.29	4.64	5.33
chyba [mBq/mg]	28.48	4.09				4.57	2.75	2.42	3.30
% eU		0.50				0.59	0.52		0.50
chyba eU abs.		0.03				0.04	0.02		0.03
čas měření [s]	430927								
hmotnost [mg]	0.348								
chyba vážení [mg]	0.0089								
chyba vážení [%]	2.56								
FWHM ²¹⁴ Po	176.76								
FWHM ²³⁸ U	168.24								
konstanty citlivosti at	0.38						0.47	0.29	0.18
chyby [%]	3.97								

2J5_10 - uraninit

	R0 (2-10 Mev)	ROI 1	ROI 2	ROI 3	ROI 4	ROI 5	ROI 6	ROI 7	ROI 8
izotop	celk. alfa akt.	²³⁸ U	²³⁵ U	²³⁴ U	²²³ Ra	²¹⁰ Po	²²² Rn+ ²¹⁸ Po+ ²¹⁴ Po	²¹⁸ Po	²¹⁴ Po
šířka okna [CH]	818	30	17	42	10	30	79	55	30
šířka okna [keV]	8000	293.82	157.25	388.5	92.5	293.82	773.726	538.67	293.82
count [imp]	385208	49981	18586	81970	12969	41029	75868	36235	27318
sigma [%]	0.16	0.74	0.73	0.35	0.88	0.99	0.36	0.53	0.61
background [mBq]		0.0000				0.0000	0.0000		0.0000
aktivita [mBq]	4441.15	429.80	214.28	945.05	149.52	299.46	874.70	417.76	314.96
count bez chvostů [imp]		37279.09				25973.61			
četnost [imp./mg]	20948.84	2027.36				1412.53	4125.94	1970.58	1485.64
hmot. aktivita [mBq/mg]	54985.43	11251.58				7839.36	8680.46	6687.32	8245.12
chyba [%]	8.76	5.37				5.61	4.99	5.15	5.23
chyba [mBq/mg]	4815.25	603.91				440.01	432.78	344.26	431.03
% eU		91.11				63.48	70.29		66.76
chyba eU abs.		4.89				3.56	3.50		3.49
čas měření [s]	86736								
hmotnost [mg]	0.212								
chyba vážení [mg]	0.0098								
chyba vážení [%]	4.62								
FWHM ²¹⁴ Po	174.63								
FWHM ²³⁸ U	168.24								
konstanty citlivosti at	0.38						0.48	0.29	0.18
chyby [%]	3.97								

8J1 - uraninit

	R0 (2-10 Mev)	ROI 1	ROI 2	ROI 4	ROI 5	ROI 6	ROI 7	ROI 8
izotop	celk. alfa akt.	²³⁸ U	²³⁵ U	²²³ Ra	²¹⁰ Po	²²² Rn+ ²¹⁸ Po+ ²¹⁴ Po	²¹⁸ Po	²¹⁴ Po
šířka okna [CH]	818	30	17	10	30	79	55	30
šířka okna [keV]	8000	293.82	157.25	92.5	293.82	773.726	538.67	293.82
count [imp]	500556	57616	24017	20138	59815	99800	49264	36093
sigma [%]	0.14	0.86	0.65	0.70	0.85	0.32	0.45	0.53
background [mBq]		0.0000			0.0000	0.0000		0.0000
aktivita [mBq]	8539.29	588.11	409.72	343.55	617.95	1702.55	840.42	615.73
count bez chvostů [imp]		34473.71			36223.03			
četnost [imp./mg]	22955.08	1580.94			1661.16	4576.74	2259.21	1655.19
hmot. aktivita [mBq/mg]	60251.29	9806.68			10304.31	11305.46	7666.81	10267.32
chyba [%]	6.51	3.25			3.24	2.71	2.84	2.92
chyba [mBq/mg]	3920.78	319.03			333.95	306.27	217.97	299.69
% eU		79.41			83.44	91.54		83.14
chyba eU abs.		2.58			2.70	2.48		2.43
čas měření [s]	58618							
hmotnost [mg]	0.372							
chyba vážení [mg]	0.0089							
chyba vážení [%]	2.39							
FWHM ²¹⁴ Po	206.67							
FWHM ²³⁸ U	168.24							
konstanty citlivosti at	0.38					0.40	0.29	0.16
chyby [%]	3.97							

J_6 - metatorbernit

	R0 (2-10 Mev)	ROI 1	ROI 2	ROI 3	ROI 4	ROI 5	ROI 6	ROI 7	ROI 8
izotop	celk. alfa akt.	²³⁸ U	²³⁵ U	²³⁴ U	²²³ Ra	²¹⁰ Po	²²² Rn+ ²¹⁸ Po+ ²¹⁴ Po	²¹⁸ Po	²¹⁴ Po
šířka okna [CH]	818	30	17	42	10	30	79	55	30
šířka okna [keV]	8000	293.82	157.25	388.5	92.5	293.82	773.726	538.67	293.82
count [imp]	27315	7953	2894	7446	107	345	570	410	153
sigma [%]	0.61	1.14	1.86	1.16	9.67	8.66	4.19	4.94	9.19
background [mBq]		0.0229				0.0000	0.0000		0.0344
aktivita [mBq]	327.99	95.48	34.75	89.41	1.28	3.42	6.84	4.92	1.80
count bez chvostů [imp]						284.53			
četnost [imp./mg]	3346.88	974.24				34.86	69.84	50.24	18.40
hmot. aktivita [mBq/mg]	8784.71	4058.19				226.52	184.91	170.48	119.53
chyba [%]	13.66	10.22				17.74	13.27	14.02	18.27
chyba [mBq/mg]	1200.01	414.76				40.19	24.54	23.90	21.84
% eU		32.86				1.83	1.50		0.97
chyba eU abs.		3.36				0.33	0.20		0.18
čas měření [s]	83279								
hmotnost [mg]	0.098								
chyba vážení [mg]	0.0089								
chyba vážení [%]	9.08								
FWHM ²³⁸ U	219								
konstanty citlivosti at	0.38	0.24					0.38	0.29	0.15
chyby [%]	3.97								

J₉ - zinkzippeit

	R0 (2-10 Mev)	ROI 1	ROI 2	ROI 3	ROI 4	ROI 5	ROI 6	ROI 7	ROI 8
izotop	celk. alfa akt.	²³⁸ U	²³⁵ U	²³⁴ U	²²³ Ra	²¹⁰ Po	²²² Rn+ ²¹⁸ Po+ ²¹⁴ Po	²¹⁸ Po	²¹⁴ Po
šířka okna [CH]	818	30	17	42	10	30	79	55	30
šířka okna [keV]	8000	293.82	157.25	388.5	92.5	293.82	773.726	538.7	293.82
count [imp]	8712	3535	734	1622	14	53	75	42	29
sigma [%]	1.07	1.85	3.69	2.48	26.73	27.88	11.55	15.43	32.17
background [mBq]		0.1661				0.0695	0.0000		0.0695
aktivita [mBq]	38.95	15.64	3.28	7.25	0.06	0.14	0.34	0.19	0.06
count bez chvostů [imp]						47.35			
četnost [imp./mg]	1497.92	601.41				5.47	12.90	7.22	2.31
hmot. aktivita [mBq/mg]	3931.66	2136.18				22.30	17.99	24.51	9.43
chyba [%]	23.89	20.70				46.73	30.39	34.28	51.01
chyba [mBq/mg]	939.32	442.20				10.42	5.47	8.40	4.81
% eU		17.30				0.18	0.15		0.08
chyba eU abs.		3.58				0.08	0.04		0.04
čas měření [s]	223695								
hmotnost [mg]	0.026								
chyba vážení [mg]	0.0049								
chyba vážení [%]	18.85								
FWHM ²³⁸ U	64.9								
konstanty citlivosti at	0.38	0.28					0.72	0.29	0.25
chyby [%]	3.97								

J₁ - uraninit

	R0 (2-10 Mev)	ROI 1	ROI 2	ROI 3	ROI 4	ROI 5	ROI 6	ROI 7	ROI 8
izotop	celk. alfa akt.	²³⁸ U	²³⁵ U	²³⁴ U	²²³ Ra	²¹⁰ Po	²²² Rn+ ²¹⁸ Po+ ²¹⁴ Po	²¹⁸ Po	²¹⁴ Po
šířka okna [CH]	818	30	17	42	10	30	79	55	30
šířka okna [keV]	8000	293.82	157.25	388.5	92.5	293.82	773.726	538.67	293.82
count [imp]	106514	12233	4087	22659	4580	14118	26597	12116	9493
sigma [%]	0.31	1.55	1.56	0.66	1.48	1.59	0.61	0.91	1.03
background [mBq]		0.0000				0.0000	0.0000		0.0000
aktivita [mBq]	5209.02	438.28	199.87	1108.13	223.98	467.10	1300.71	592.53	464.25
count bez chvostů [imp]		8962.00				9551.22			
četnost [imp./mg]	23464.05	1974.24				2104.05	5859.07	2669.04	2091.22
hmot. aktivita [mBq/mg]	61587.20	10221.44				10893.47	11192.71	9057.62	10827.07
chyba [%]	8.29	5.56				5.60	4.62	4.92	5.04
chyba [mBq/mg]	5104.95	568.29				609.96	517.35	445.41	545.18
% eU		82.76				88.21	90.63		87.67
chyba eU abs.		4.60				4.94	4.19		4.41
čas měření [s]	20448								
hmotnost [mg]	0.222								
chyba vážení [mg]	0.0089								
chyba vážení [%]	4.01								
FWHM ²¹⁴ Po	152.74								
FWHM ²³⁸ U	168.24								
konstanty citlivosti at	0.38						0.52	0.29	0.19
chyby [%]	3.97								

Radioaktivita v přírodě a její využití v geologických vědách (didaktická část)

OBSAH:

1. ÚVOD	1
2. RADIOAKTIVITA	1
2.1. Druhy záření	1
2.2. Radioaktivita jako přirozená součást našeho okolí	1
2.2.1. Přeměna alfa	2
2.2.2. Přeměna beta	4
2.2.3. Záření gama	5
2.2.4. Neutronové záření	6
2.2.5. Přeměna β^+ - pozitronový rozpad	6
2.2.6. Elektronový záchyt	6
3. ZDROJE RADIOAKTIVITY A RADIOMETRICKÝCH ANOMÁLIÍ NA ÚZEMÍ ČR	7
4. RADIOAKTIVNÍ MINERÁLY	8
5. VYUŽITÍ RADIOAKTIVNÍCH PRVKŮ PRO DATOVÁNÍ STÁŘÍ HORNIN	10
5.1. Datování pomocí nerovnováh uranové rozpadové řady	10
5.2. Datování pomocí kalium – argonové metody	11
5.3. Datování pomocí rubidium – stronciové metody	11
5.4. Datování pomocí samarium – neodymové metody	12
5.5. Datování pomocí izotopu ^{14}C	13
5.6. Použití alfaspektrometrie v geologických vědách	13
5.7. Použití gama spektrometrie v geologických vědách	13
6. ÚČINKY RADIOAKTIVITY NA LIDSKÝ ORGANISMUS	14
7. METODY DETEKCE RADIOAKTIVITY A JEDNOTKY MĚŘENÍ	16
7.1. Detekce radioaktivity	16
7.1.1. Plynové počítače	16
7.1.2. Scintilační metody	16
7.1.3. Polovodičové detektory	16
7.1.4. Termoluminiscenční dozimetrie (TLD)	16
7.1.5. Fotoluminiscenční dozimetrie (FLD)	17
7.2. Jednotky měření radioaktivity a jejich vzájemné vztahy	17
8. SLOVNÍČEK POJMŮ	20
9. LITERATURA	22

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Rozpadové řady uranu

Obrázek 2: Schéma tunelového efektu při průniku α částice potenciálovou bariérou

Obrázek 3: Schéma jaderných přeměn

Obrázek 4: Mapa radonového indexu

Obrázek 5: Časová rozmezí použití různých izotopových párů k datování

Obrázek 6: Schematické znázornění metody datování pomocí ^{14}C

Obrázek 7: Alfáspektrum standardu PU1 (uraninit) ve stavu radioaktivní rovnováhy

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č.I: Metodická příručka pro učitele k praktickým úlohám.

Příloha č.II: Praktická cvičení – pracovní listy.

1. ÚVOD

Tato práce je koncipována jako didaktický text, který má za účel přiblížit přírodní radioaktivitu jako nedílnou součást přirozeného životního prostředí a její možné praktické využití v různých geologických disciplínách. Tento text je připraven pro publikaci v metodických příručkách pro vyšší gymnázia (Matějka, Holcová, in press). Pojednává o jednotlivých typech radioaktivních přeměn, o výskytu radioaktivních hornin a radiometrických anomálií na území ČR. Dále je zde kapitola věnovaná radioaktivním minerálům (jejich chemismu, morfologii a výskytu) a kapitola využití rozpadových řad a izotopových párů při datování stáří minerálů a hornin. Jedna z kapitol se zabývá účinky radiace na lidský organismus. Na závěr jsou v krátké kapitole uvedeny nejčastěji využívané metody spektrometrické detekce radioaktivních prvků.

2. RADIOAKTIVITA

2.1. Druhy záření

Jako základní dělení lze použít rozlišení na záření **korpuskulární** a **elektromagnetické**.

Elektromagnetické záření má definovanou vlnovou délku a intenzitu vlny. Jeho složky jsou viditelné světlo, infračervené záření, UV – záření, rádiové vlny apod. Tok elektromagnetických vln až na určité výjimky ionizaci okolí díky své malé energii nezpůsobuje.

Zvláštní pozici má pak rentgenové záření a záření gama, o kterých bude pojednáno níže.

Korpuskulární záření nebo také **ionizující záření** je tvořeno proudem různých částic: elektronů [e^-], protonů [p^+], neutronů [n^0], ale i jader atomů [^4He – částice α]. Pro ionizující záření je charakteristická emise částic o vysoké energii, které při průchodu hmotou způsobují ionizaci svého okolí. Mezi ionizující záření patří záření α – tok heliových jader, záření β^- – tok elektronů, záření β^+ – tok pozitronů a neutronové záření.

Mezi ionizující záření můžeme zařadit i elektromagnetické vlnění o velice krátké vlnové délce (kratší než vlnová délka pro UV-C záření), sem patří rentgenové záření, záření γ a kosmické záření.

2.2. Radioaktivita jako přirozená součást našeho okolí

Radioaktivita je vlastnost některých prvků nebo jejich izotopů, jejichž nestabilní jádra se rozpadají na jiná atomová jádra a přitom do prostoru okolo sebe emitují neviditelné záření, které je doprovodným produktem jejich rozpadu. Aby nová jádra mohla vůbec vzniknout, musí do okolí uvolnit přebytečnou energii. Uvolnění energie tak vede k nastolení rovnováhy, i když to nemusí platit ve všech případech. Příkladem je rozpad izotopu ^{226}Ra (poločas rozpadu 1599 let) na izotop ^{222}Rn , který je ještě méně stabilnější (poločas rozpadu 3.82 dne). Opačný příklad je rozpad ^{207}Tl (poločas rozpadu cca 5 min.) na ^{207}Pb , které je stabilní.

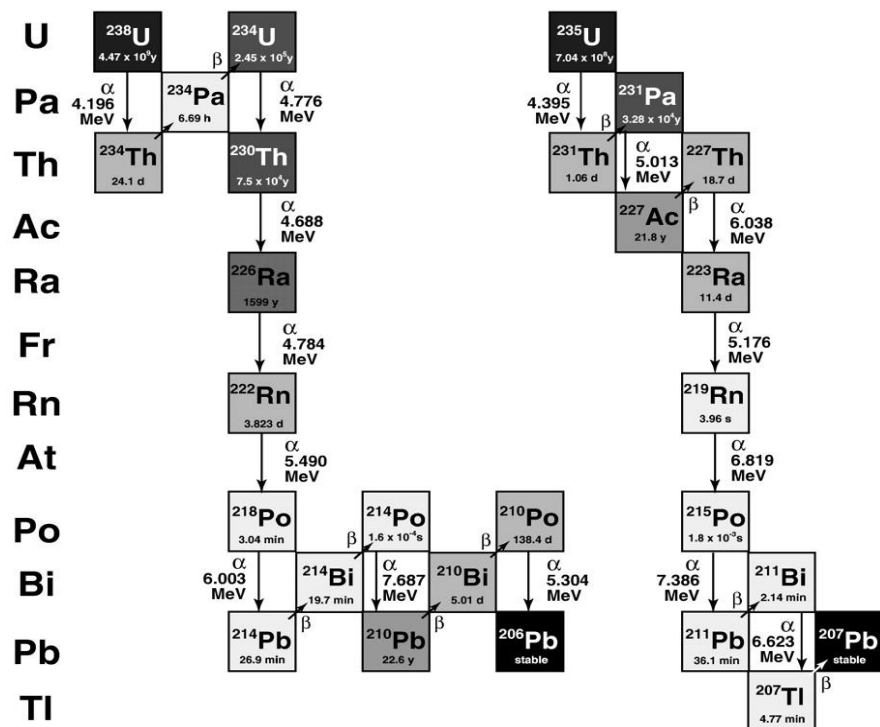
Radioaktivitu lze definovat jako lidským okem neviditelný tok ionizujících částic. Toto záření se vyskytuje všude kolem nás a je důsledkem přirozeného rozpadu radioaktivních prvků obsažených v horninách a minerálech. Tvoří tak přirozenou součást našeho životního prostředí a provází nás po celý život. Toto přirozené radioaktivní záření označujeme jako radioaktivní pozadí.

Za ionizující částici lze považovat takovou, která má dostatek energie postačující k ionizaci okolí (ozáření). Energetická hranice pro ionizující záření je 5 keV. Tato hranice platí pro záření α , záření β^- (elektronové záření) a pro záření X a γ (fotonové záření). Neutronovým zářením a β^+ přeměnou, které jsou zdrojem sekundární (zprostředkované) ionizace, se nebudeme nijak podrobně zabývat.

Hlavním zdrojem přirozeného radioaktivního záření jsou produkty rozpadových řad uranu a thoria (^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th). Tyto rozpadové řady produkují všechny tři základní druhy radiace. Záření vznikající rozpadem nestabilních prvků přítomných v horninách označujeme jako **terestrické**. Na

schématu rozpadu uranu (obrázek 1) vidíme, jak rozpadem mateřských radionuklidů vznikají nestabilní dceřiné meziprodukty, které se dále rozpadají až na stabilní izotopy olova a tvoří tak ucelenou řadu. Při těchto procesech se střídají přeměny α a β , které jsou provázeny slabšími či silnějšími emisemi záření γ .

Dalším zdrojem radiace je **kosmické záření**, jehož část dopadá na povrch planety po interakci s atmosférou v podobě záření gama. Kosmické záření může reagovat i s prvky v atmosféře a vytvářet **kosmogenní radionuklidy** (viz slovníček pojmů), např. ^{14}C , který vzniká ze stabilního ^{14}N . Tento izotop uhlíku se pak využívá pro datování stáří některých organismů nebo travertinů.



Obrázek 1: Rozpadové řady uranu – odstíny šedi jsou odstupňovány podle trvání poločasu rozpadu (čím delší, tím tmavší) (převzato z Bourdon et al. 2003)

2.2.1. Přeměna alfa

Při této přeměně emituje jádro rozpadajícího se radionuklidu kladně nabitou částici α obsahující dva protony a dva neutrony, která odpovídá jádru helia.

Přeměnu α lze vyjádřit například touto rovnicí:

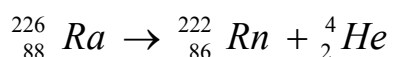
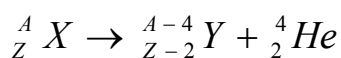
kde:

A = hmotnostní číslo

Z = protonové číslo

X = mateřský izotop

Y = dceřiný izotop

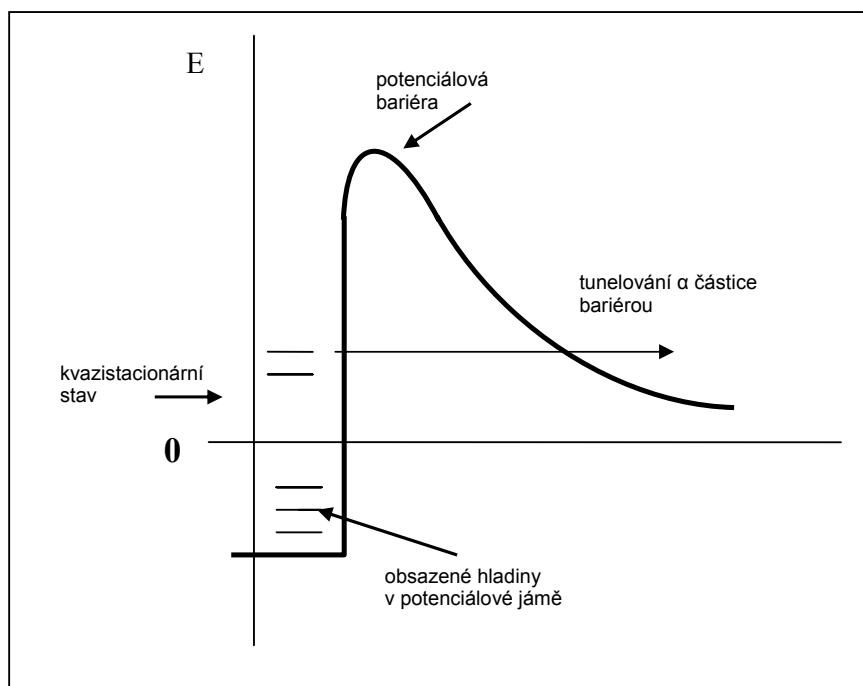


K přeměně α dochází převážně u přirozených i umělých radionuklidů těžších prvků, v jejichž jádrech se projevuje silné odpuzování protonů. Probíhá u všech přirozených rozpadových řad.

Základní stav neumožní jádru emitovat volné nukleony, protože se nacházejí na hladinách se zápornou energií (tzv. potenciálová jáma). Pokud v jádře dojde ke spojení dvou protonů a dvou neutronů v částici α , dochází ke vzniku tzv. kvazistacionárního stavu, ve kterém má částice α v důsledku uvolněné vazebné energie větší kladnou energii. I tato energie je však nedostatečná pro překonání potenciálové bariéry, neboť např. u ^{226}Ra by byla potřeba energie větší než 23 MeV, avšak energie částice α emitované při rozpadu ^{226}Ra je výrazně nižší, cca 4,8 MeV. Pokud by α částice musela překonat potenciálovou bariéru, pak by také její energie musela být o hodně vyšší než ve skutečnosti je. Přesto k emisi dochází. Kvantová mechanika existenci alfa přeměny vysvětluje vlnovým charakterem α částice, který umožňuje její průnik potenciálovou bariérou z kvazistacionárního stavu i tehdy, když: $E_\alpha < B$ (**energie částice α je nižší než energie potenciálové bariéry**).

Dochází tak k tzv. tunelovému efektu, kdy se částice „protuneluje“ potenciálovou bariérou a opustí jádro s mnohem menší energií, než by jinak k překonání bariéry potřebovala.

Tyto podmínky platí u jader s hmotnostním číslem větším než 140. Při rozpadu α také dochází díky ochuzení jádra o dva protony [$2p^+$] a dva neutrony [$2n^0$] ke změně poměru protonů a neutronů, čímž dochází k posunu směrem ke stabilitě.



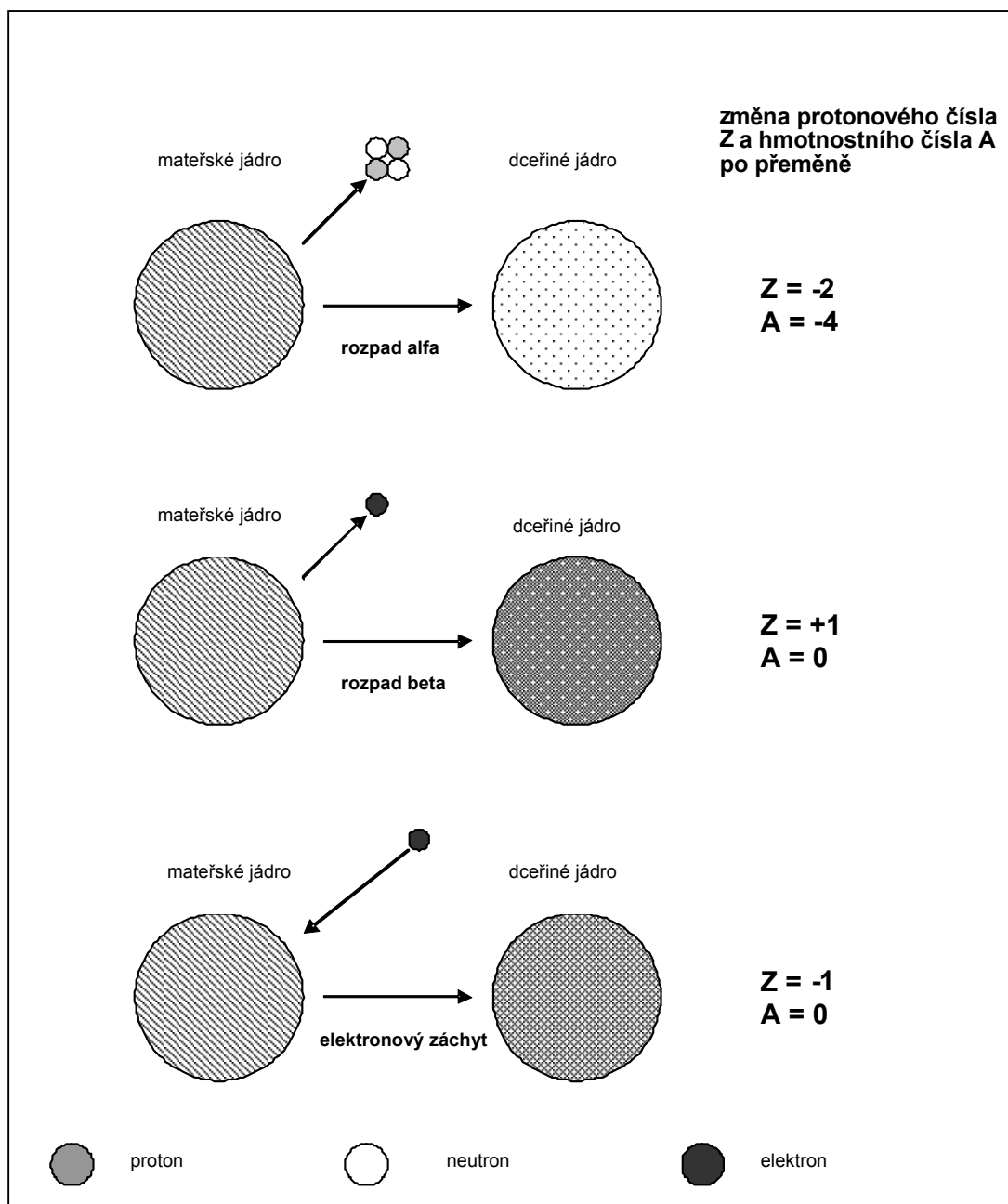
Obrázek 2: Schéma tunelového efektu při průniku α částice potenciálovou bariérou. (převzato z Hála, 1998, upraveno)

U lehčích jader má částice α i v kvazistacionárním stavu velmi nízkou energii, leží hluboko v potenciálové jámě a pravděpodobnost jejího průniku bariérou je mizivá.

Rychlost záření alfa dosahuje maximálně jen 10% rychlosti světla. Vzhledem k relativně velkým rozměrům heliových jader je průchodnost záření alfa hmotou silně omezena. Doběh částic alfa ve vzduchu je řádově v cm, v minerálech a horninách jde jen o setiny mm. Částice alfa mají velmi silnou ionizační schopnost. Uvádí se, že jediná částice alfa, která ve vzduchu urazí dráhu 1 cm, vytvoří asi 10 000 iontových párů. (<http://www.geoinformatics.upol.cz>)

2.2.2. Přeměna beta

U přeměny beta je situace trochu složitější. Existují dva typy přeměny a to β^+ a β^- . O Pozitronovém rozpadu β^+ se zmíníme v kapitole 2.2.5., ale nijak podrobně se jím zabývat nebudeme.



Obrázek 3: Schéma jaderných přeměn: a) přeměna α - z mateřského jádra se oddělí jádro hélia (α -částice) obsahující 2 protony a 2 neutrony, atomová hmotnost dceřiného jádra se sníží o 4, protonové číslo se sníží o 2, vzniká tak lehčí prvek, který je zpravidla stabilnější nebo se dále rozpadá až na stabilní izotop. b) přeměna beta – neutron mateřského jádra se rozpadá na elektron a proton, elektron (β -částice) je poté z jádra vystřelen, atomová hmotnost se nemění, ale protonové číslo se zvýší o 1, prvek se v periodické tabulce posune vpravo. c) elektronový záchyt – z vnějšího prostoru (elektronového obalu) je jádrem zachycen elektron, který reaguje s protonem za vzniku neutronu, atomové hmotnostní číslo se nemění, ale protonové číslo se o 1 sníží a prvek se posune v periodické tabulce vlevo.

Přeměna β^- vzniká rozpadem neutronu na proton a elektron. Tento elektron je potom emitován jádrem do okolí. Vznikem protonu dochází k posunu prvku v periodické tabulce směrem doprava. Nově vzniklý prvek má protonové číslo o 1 vyšší.

Tuto přeměnu lze vyjádřit například rovnicí:

kde:

A = hmotnostní číslo

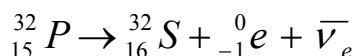
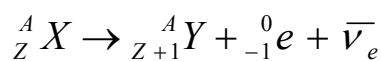
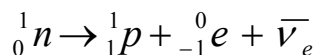
Z = protonové číslo

X = mateřský izotop

Y = dceřiný izotop

e = elektron

$\bar{\nu}_e$ = elektronové antineutrino



Přeměna beta je energeticky méně náročná než přeměna alfa a narozdíl od heliového jádra nese částice β pouze 1 náboj (záporný β^- nebo kladný β^+). Stejně jako u přeměny alfa musí β částice překonat určitou energetickou bariéru (potenciálová bariéra – viz. slovníček pojmů).

Při přeměně β^- dochází k emisi elektronového antineutrína, čímž dochází k úbytku hmoty a musí být tedy splněna tzv. **hmotnostně-energetická** podmínka:

$$m(Z+1, N) + m_e < m(Z, N)$$

kde $m(Z, N)$ je hmotnost jádra s protonovým číslem Z a nukleonovým číslem N , m_e je klidová hmotnost elektronu.

Tato podmínka pak musí být splněna i v případě přeměny β^+ , kde dochází k emisi částice β^+ , tzv. **pozitronu**, což je antičástice elektronu - kladně nabitý elektron e^+ . Při této přeměně se prvek posouvá v periodické tabulce o jedno místo vlevo a tato hmotnostně-energetická podmínka má tedy tvar:

$$m(Z-1, N) + m_e < m(Z, N)$$

kde $m(Z, N)$ je hmotnost jádra s protonovým číslem Z a nukleonovým číslem N , m_e je klidová hmotnost elektronu.

2.2.3. Záření gama (γ)

Tento typ záření je znám také pod názvem pronikavá radiace. Jde o elektromagnetický tok vysoko energetických fotonů, který při vysokých dávkách může působit negativně na lidský organismus. Emise γ částic je též doprovodným jevem při jaderných explozích, kdy intenzita tohoto záření dosahuje velmi vysokých hodnot a vyvolává akutní nemoc z ozáření. Takovým hodnotám bylo vystaveno na sklonku druhé světové války obyvatelstvo japonských měst Hirošima a Nagasaki, kde byla poprvé v dějinách nasazena jaderná zbraň. Následky byly strašlivé. Více než 100 000 lidí zemřelo ihned nebo krátce poté, dalších více než 70 000 později na nemoc z ozáření či na různé druhy nádorů. S genetickými poškozeními potomků těch, kteří jaderný útok přežili, se setkáváme dodnes.

Podle toho, zda emise fotonů pochází z jádra či z elektronového obalu atomu, lze rozlišovat rentgenové záření (paprsky X) a samotné záření γ . Obecně lze konstatovat, že záření γ je energeticky vydatnější než rentgenové záření, avšak v některých případech je energie velice tvrdého rentgenového záření stejná nebo podobná energii záření γ . Při většině radioaktivních přeměn vzniká emise γ jako doprovodné záření, které vzniká deexcitací jader po jiné přeměně (například rozpad α),

kdy vlivem rozpadu má jádro přebytek energie a nachází se v nestabilním (excitovaném) stavu. Důležitým faktorem je, že emise záření γ má pro každý izotop svoji charakteristickou intenzitu. Toho lze pak využít v gamaspektrometrii k detekci různých izotopů.

2.2.4. Neutronové záření

Dle základního dělení se toto záření řadí mezi částicové, neboli korpuskulární. Neutrony jsou částice s neutrálním elektrickým nábojem, které vznikají jako produkt jaderných reakcí a jeho přírodní zdroje kromě kosmického záření, které je však van Allenovými pásy zachyceno a na zemský povrch téměř nedopadá, prakticky neexistují. Jedinými zdroji neutronů v přírodě jsou samovolné rozpady ^{238}U a ^{235}U , jejich intenzity jsou však minimální. Volný neutron je nestabilní a nedojde-li k jeho pohlcení v jádře, rozpadá se spontánně na proton a elektron s poločasem rozpadu okolo 13 minut. Tím, že je neutron elektricky neutrální, nelze jej nijak urychlit v elektrickém poli a jeho energie je taková, jaká mu přísluší z energetické bilance mateřské jaderné reakce.

Největším zdrojem neutronů jsou jaderné reaktory, ve kterých probíhají štěpné procesy. Také při jaderných explozích vzniká silný tok vysoce energetických neutronů, který je spolu se zářením γ velmi nebezpečný. Z hlediska biologického účinku se neutronové záření podobá silně ionizujícímu záření a podle toho je klasifikována i jeho relativní biologická účinnost (pro rychlé neutrony je RBE = 10, viz kap. 7.2.).

2.2.5. Přeměna β^+ - pozitronový rozpad

Při tomto rozpadu se mění proton v neutron. Dochází k tomu tak, že spontánní přeměnou protonu na neutron vznikne kladně nabitý elektron, tzv. **pozitron e^+ (částice β^+)**. Tato reakce je doprovázena emisí tohoto pozitronu β^+ , zatímco vzniklý neutron n^0 zůstává součástí jádra. Prvek se v periodické tabulce posouvá o jednu pozici vlevo, avšak hmotnostní číslo se nemění. Výskyt tohoto typu přeměny v přírodě je zanedbatelný a vyskytuje se u prvků, které mají vyšší počet protonů a nedostatek neutronů (neutron-deficitní jádro).

Obecně lze tuto přeměnu vyjádřit:

kde:

A = hmotnostní číslo

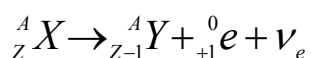
Z = protonové číslo

X = mateřský izotop

Y = dceřiný izotop

e^+ = pozitron

ν_e = elektronové neutрино



kdy rozpadem mateřského radionuklidu **X** vznikne dceřiný radionuklid **Y** za současné emise pozitronu e^+ a elektronového neutrina ν_e .

2.2.6. Elektronový záchyt

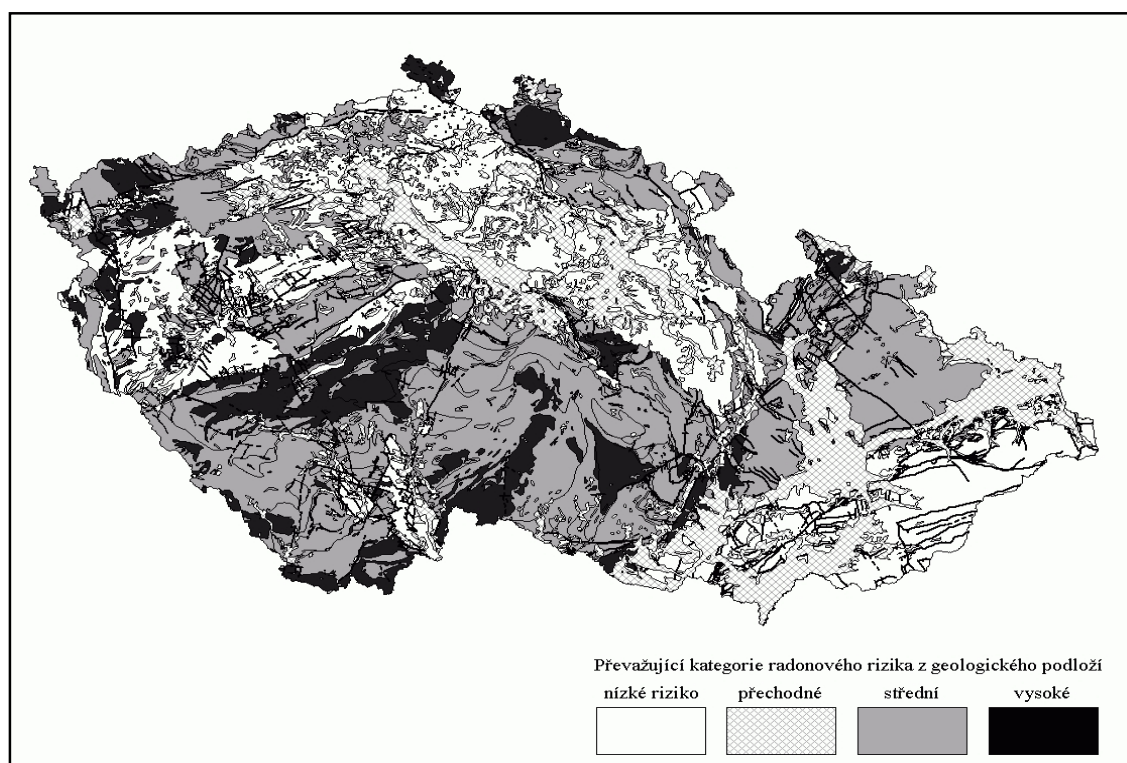
Při tomto typu přeměny dochází k přeměně protonu na neutron, avšak mechanismus přeměny je v tomto případě odlišný. Při této přeměně, rozdílně od β^+ , nedochází ke spontánnímu rozpadu protonu, ale k zachycení elektronu jádrem. Reakcí tohoto elektronu s protonem dojde ke vzniku neutronu za současné emise rentgenového záření. Toto rentgenové záření nepochází z jádra atomu, ale z elektronového obalu, kdy na místo jádrem zachyceného elektronu seskočí z vyšší energetické hladiny jiný elektron, který zaujme jeho pozici a současně vyzáří svoji přebytečnou energii do prostoru ve formě rentgenového záření.

Obecně lze konstatovat, že radionuklidy, které se rozpadají elektronovým záchytem jsou zdroji rentgenového záření, které je navíc doprovázeno emisí záření γ , které vzniká v důsledku deexcitace přeměněných jader.

3. ZDROJE RADIOAKTIVITY A RADIOMETRICKÝCH ANOMÁLIÍ NA ÚZEMÍ ČR

Radiometrické anomálie jsou vázány na uranové zrudnění nebo na granitoidy (žulové vyvřeliny) s vyšším obsahem radioaktivních prvků (především uranu a thoria). Příkladem oblasti zvýšeného radioaktivního pozadí je okolí Třebíče, kde jsou hodnoty pozadí asi třikrát vyšší, než je průměrná hodnota pozadí v ostatních místech ČR. Není to ovšem důvod ke znepokojení, neboť i takto zvýšené hodnoty jsou pro člověka naprosto neškodné a nijak negativně neovlivňují jeho zdraví. Takových míst je u nás celá řada a třeba v okolí Písku se dají naměřit hodnoty až $200 \text{ nGy}\cdot\text{h}^{-1}$ (průměr je $60 - 70 \text{ nGy}\cdot\text{h}^{-1}$).

Další výskyt radiometrických anomálií je možné vysledovat v místech bývalé těžby uranu (Jáchymov, Příbram apod.). Na haldy se vyvážela hlušina, leckdy obsahující nějaký uranový minerál, který pak v okolí těchto hald zvyšoval svojí radiací přirozené pozadí. Opět, stejně jako v předchozím případě, hodnoty záření tohoto pozadí nijak neohrožují zdraví lidí. Jako škodlivý faktor může působit rozptýl prachových částic s obsahem uranu, kde se může negativně uplatnit chemická toxicita tohoto prvku, ale vzhledem k obsahu uranu na haldách starých důlních děl a jeho deponování není tento faktor nijak ohrožující. Diskutabilní je prašnost v okolí dosud těženého uranového ložiska na Vysočině, ale prokazatelná data nejsou k dispozici.



Obrázek 4: Mapa tzv. radonového indexu zachycuje intenzity radonu unikajícího z geologického podloží různých částí republiky. Je patrné, že větší množství radonu obsahuje podloží v oblastech výskytu vulkanických a metamorfovaných hornin (na mapě se jeví jako šedě a černě zbarvené oblasti) a naopak nízké intenzity jsou typické pro oblasti české křídové tabule a prvohorní pánve, které jsou tvořeny převážně sedimenty (na mapě se jeví jako světle zbarvené oblasti). Negativní působení radonu na lidský organismus v dávkách, které se vyskytují na území ČR však není plně vědecky ověřeno. (zdroj: Česká geologická služba, 2003)

Další zdroj přirozeného radioaktivního záření je **radon**. Je to radioaktivní plyn s poločasem rozpadu 3.82 dne, který vzniká jako jeden z produktů uranových rozpadových řad (α rozpadem rádia ^{226}Ra). V přírodě se prakticky vyskytuje pouze izotop ^{222}Rn . Puklinami v horninách uniká na povrch a může se koncentrovat ve stavbách. Byla vypracována mapa rizikovosti výskytu radonu na území ČR (obrázek 4), zdravotní rizika však nebyla vědecky uspokojivě doložena.

Vysoký obsah radonu mají některé radioaktivní vody v oblasti Jáchymova (pramen Běhounek z vrtu HG 1 na 12. patře dolu Svornost s průměrnou aktivitou 10 - 12 kBq.l^{-1} a pramen Agricola s aktivitou až 16 kBq.l^{-1}), které se jímají a využívají k léčebným procedurám v jáchymovských lázních, kde se léčí především poruchy pohybového ústrojí. Léčebné účinky jsou naprosto prokazatelné a Lázně Jáchymov navštíví každoročně mnoho domácích i zahraničních pacientů.

4. RADIOAKTIVNÍ MINERÁLY

uraninit (smolnec) – směs oxidů UO_2 a UO_3 v různém poměru, zpravidla černý nebo černohnědý, smolně lesklý, silně radioaktivní; tvoří celistvé nebo zrnité žilky, ledvinité agregáty, vzácně krychlové krystaly; vyskytuje se též jako zemitá forma (tzv. uranová čerň); vytěžená ruda se dále upravuje a je využívána především jako palivo do jaderných reaktorů (obohacený uran); tvrdost dle Mohse 5 – 6; hustota 10,6 g/cm^3 ; uraninit se těžil v minulosti v Jáchymově a Příbrami, v současnosti se u nás těží pouze jediné ložisko v Dolní Rožince u Nového Města na Moravě

amorfní U-Pb oxidy – kusové agregáty žluté až oranžové barvy s lasturnatým lomem a skelným leskem, velké až několik cm, vyskytují se ve formě tzv. gummitů ve společnosti uraninitu

autunit - $\text{Ca}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 10\text{-}12 \text{H}_2\text{O}$ - žlutý až zelenožlutý, tvoří tabulkovité, často dobře omezené krystaly nebo lupenité agregáty a povlaky; krystaluje v tetragonální soustavě, má žlutý vryp a dokonalou štěpnost, tvrdost dle Mohse je 2-2,5; hustota 3,1-3,2 g/cm^3 ; pod UV-lampou je pro tento minerál charakteristická nápadná intenzivní žlutozelená luminescence; vzniká supergenními procesy (blíže ve slovníčku pojmu) při zvětrávání minerálů uranu, postupně se dehydratací mění na metaautunit; vyskytuje se na uranových ložiscích jako jsou Jáchymov, Kladská, Rýžoviště u Harrachova, Cínovec, Horní Slavkov, Horní Rotava apod.

kasolit - $\text{Pb}(\text{UO}_2)\text{SiO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ – krystaluje v monoklinické soustavě, tvoří sloupečkovité či tabulkovité krystaly, často celistvé až práškovité povlaky; barva je světle žlutá, někdy zelená nebo hnědá, často bývá průsvitný; má dokonalou štěpnost; tvrdost dle Mohse je 4,5; hustota 5,8-6,5 g/cm^3 ; je produktem supergenních procesů při zvětrávání uranových rud, vyskytuje se na Jánské žile v Příbrami jako jehličky a krystalické agregáty, v Jáchymově ve formě povlaků a dále na lokalitách Rýžoviště u Harrachova a Horní Halže

masuyit – $\text{Pb}(\text{UO}_2)_3\text{O}_3(\text{OH})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ - má červenooranžovou barvu, světle oranžový vryp, je křehký a měkký, vyskytuje se jen velice vzácně na některých uranových ložiscích např. na Jánské žile v Příbrami

coffinit – $\text{U}(\text{SiO}_4)_{1-x}(\text{OH})_4$ – krystaluje v tetragonální soustavě, je však často vlivem radioaktivity v metamiktiním stavu (viz slovníček pojmu); tvoří jen velmi drobné, zpravidla mikroskopické krystaly či zrna nebo jemnozrné, kulovité agregáty či povlaky; je černé barvy, tvrdost dle Mohse je 5-6, hustota 5,1 g/cm^3 ; vzniká hydrotermálně jako součást coffinit-uraninit-branneritové parageneze, v ČR se vyskytuje jako hojná součást uranového zrudnění v Jáchymově a v okolí Příbrami (bývalý uranový revír), v coffinit-uraninit-branneritové asociaci v Nahošíně, Dyleni, Mečichově a jako běžná součást uranového ložiska v Dolní Rožince

brannerit – $(\text{UCaYCe})(\text{TiFe})_2\text{O}_6$ – krystaluje v monoklinické soustavě, tvoří žlutohnědé až černé sloupcovité krystaly, tvrdost dle Mohse 4,5 – 5,5; hustota 6,3 g/cm³, je radioaktivní

thorianit – ThO_2 - je izotypní (strukturně podobný) s uranitem a také často obsahuje jeho příměsi; je šedý až černý, smolně až polokovově lesklý s tvrdostí dle Mohse 5,5 – 6; vytváří krychlové krystaly a zrnité až celistvé agregáty; ekonomicky využitelný je jako méně významná ruda Th a U

thorit – ThSiO_4 – je izotypní se zirkonem, patří mezi nesosilikáty; díky omezené míšivosti s coffinitem obsahuje často uran; je silně radioaktivní a často se nachází v metamiktním stavu a to buď částečném nebo úplném; krystaluje v tetragonální soustavě, tvoří sloupcovité krystaly nebo zrnité či celistvé agregáty, má žlutou, oranžovou, červenou, hnědou, někdy černou barvu, je dobře štěpný, má lasturnatý lom a šedý vryp; tvrdost dle Mohse je 4,5; hustota 6,7 g/cm³; vyskytuje se zejména v pyroxenických syenitech a skarnech; zvětráváním přechází do náplavů, kde se těží jako ruda thoria a uranu

torbernit a metatorbernit – $\text{Cu}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ – patří mezi hydratované fosfáty uranylu, tvoří izomorfní řadu s zeuneritem (izomorfie – viz slovníček pojmů), může tedy obshovat příměsi As; hojně tvoří lupenité agregáty a krystalické povlaky, někdy tabulkovité, dipyramidální až soudečkovité krystaly smaragdově nebo tmavě zelené barvy, má zelený vryp a dokonalou štěpnost dle báze; tvrdost dle Mohse je 2-2,5; hustota 3,2 g/cm³; vzniká supergenními procesy při zvětrávání uranových rud; velmi často dehydratuje na metatorbernit; vyskytuje se hojně na uranových ložiscích v Jáchymově, Horním Slavkově, Dolní Rožince, Rýžovišti u Harrachova, Dolních Borech, Cínovci

uranofan – $\text{Ca}[(\text{UO}_2)(\text{SiO}_3\text{OH})]_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ – patří mezi nesosilikáty; vzniká jako sekundární minerál zvětrávacích procesů na ložiscích uraninitu; tvoří sloupečkovité až jehlicovité krystaly, často povlaky, kůry, vytváří pseudomorfózy po uraninitu; barva je žlutá až hnědožlutá, matný až skelný lesk, žlutý vryp; tvrdost dle Mohse se pohybuje mezi 2,5-3; hustota je 3,8-3,9 g/cm³; vzniká supergenními procesy na ložiscích uranu, patří mezi nejhojnější sekundární minerály uranu; vyskytuje se v Zálesí, Rýžovišti u Harrachova, Jáchymově, Horním Slavkově a Dolní Rožince

widenmannit – $\text{Pb}_2(\text{UO}_2)(\text{CO}_3)_3$ – je to vzácný trikarbonát uranylu a olova krystalující v romboické soustavě; tvoří drobné tabulkovité nebo jehličkovité krystaly světle až jasně žluté barvy, má perleťový až hedvábný lesk, je štěpný; tvrdost dle Mohse je 2, hustota 6,9 g/cm³; vzniká supergenními procesy na ložiscích uranu; vyskytuje se především v Jáchymově a na Jánské žíle v Příbrami

zeunerit – $\text{Cu}(\text{UO}_2)_2(\text{AsO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ – tvoří izomorfní řadu s torbernitom; tvoří tenké tabulkovité krystaly zelené smaragdové barvy, průhledné či průsvitné, má zelený vryp a dokonalou štěpnost; je poměrně málo tvrdý, tvrdost dle Mohse dosahuje 2-2,5, hustota je 3,5-3,6 g/cm³; vzniká supergenními procesy při zvětrávání minerálů uranu v prostředí bohatém na arsen; v ČR se vyskytuje především v okolí Cínovce, Horního Slavkova a Horní Rotavy, ekonomické využití je bezvýznamné

zippeit – $\text{K}_4(\text{UO}_2)_6[(\text{OH})_{10}(\text{SO}_4)_3] \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ – tento sulfát uranylu krystaluje v monoklinické soustavě, tvoří nejčastěji povlaky a zemité agregáty tvořené mikroskopickými tabulkovými krystalky žluté až oranžovožluté barvy; tvrdost dle Mohse je 2; hustota 4,7-4,8 g/cm³; sekundární minerál uranu vznikající supergenními procesy na uranových ložiscích, často na stěnách důlních chodeb, vyskytuje se v Jáchymově, Příbrami, Horním Slavkově a Rožně

monazit - (Ce) - CePO_4 není typický radioaktivní minerál, ale často obsahuje příměsi lehkých i těžkých REE (viz slovníček pojmů); důležitý je obsah uranu a thoria, kterého může být až 12%; krystaluje v monoklinické soustavě, je žlutý, hnědý, červenohnědý i nazelenalý se skelným až

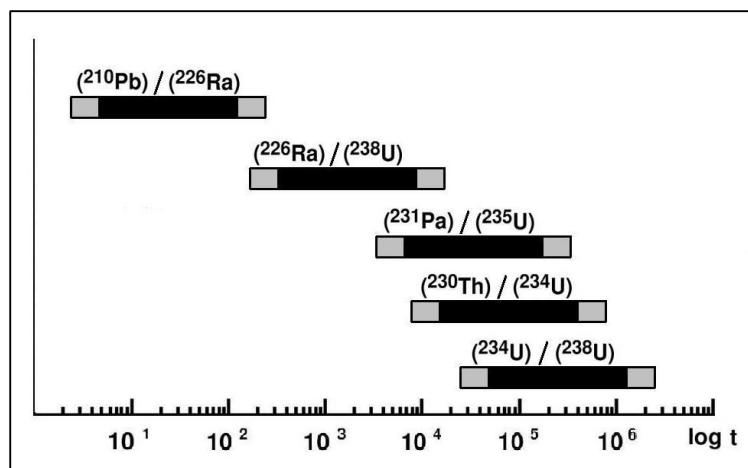
voskovým leskem, může být průsvitný až neprůhledný, dokonale štěpný dle báze, slabě magnetický, při obsahu uranu a thoria vykazuje radioaktivitu, má lasturnatý lom a šedobílý vryp; vytváří tabulkovité nebo sloupcovité krystaly, tvoří i zrnité nebo celistvé agregáty; tvrdost dle Mohse je 5-5,5; hustota je 4,6-5,4 g/cm³; hojný akcesorický minerál v pegmatitech, vzácně se vyskytuje v greisenech nebo v žilách alpského typu; těží se z náplavů, ve kterých se koncentruje; je to hlavní ruda REE a thoria

5. VYUŽITÍ RADIOAKTIVNÍCH PRVKŮ PRO DATOVÁNÍ STÁŘÍ HORNIN

Tato kapitola popisuje vybrané metody datování stáří hornin či organických fosilií (metoda ¹⁴C). Principy jednotlivých metod budou pouze stručně a obecně popsány a pro ilustraci doplněny o základní rovnice pro stanovení stáří. Tato metodika je velice složitá a rozsáhlá, takže není možné se jí nijak podrobně zabývat, neboť její obsah přesahuje rámec této publikace.

5.1. Datování pomocí nerovnováh uranové rozpadové řady

Metody datování pomocí nerovnováh dceřiných radionuklidů uranové řady jsou v geologických vědách široce rozšířeny. Jsou aplikovány například v oblasti výzkumů mořských a organogenních sedimentů, mladých vulkanitů a zejména speleothém (sekundární výplň jeskyní, krasový sediment).



Obrázek 5: Časová rozmezí vymezující použití různých izotopových párů k datování. Vhodnost použití dané metody je omezena časovým intervalem, jež má být datován. Na ose X je v logaritmické stupnici vyjádřen čas v rocích. Sestaveno podle Richards, Dorale (2003). Převzato ze: Zahradník (2005)

Další využití radionuklidů této rozpadové řady v datování je radiometrické určování původního stáří hornin, což nám pomáhá ke zjištění geologického stáří různých částí naší planety.

V rozpadové řadě uranu lze vymezit několik izotopových párů, které pokrývají velmi široký časový interval (obrázek 5) od datování ²¹⁰Pb/²²⁶Ra v řádech desítek a prvních dvou stovek let až po pár ²³⁴U/²³⁸U dosahující intervalu až 2x10⁶ let.

Jedním z nejpoužívanějších izotopových párů je ²³⁰Th/²³⁴U. Těmito izotopy byly datovány nejrůznější, obvykle karbonátové materiály: jeskynní sintry (speleotémy), mladé kalcitové hydrotermální žíly a další čtvrtohorní vysráženiny. Tato metoda je však velmi dobře použitelná i pro uranové sekundární minerály.

Datováním uranových sekundárních minerálů z několika švédských lokalit metodou $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ se zabývali např. Lövendahl a Holm. Zjistili různá stáří fází, od nižších než 10 000 let až po rovnovážné vzorky (více než 300 000 let). Zabývali se rovněž časovou korelací zalednění a fází rozvoje sekundární mineralizace, signifikantní souvislosti však nenalezli.

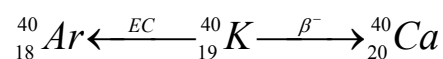
5.2. Datování pomocí kalium – argonové metody

Tato metoda využívá izotopu ^{40}K , který se rozpadá na dva různé prvky:

β^- rozpadem na ^{40}Ca

elektronovým záchytem (EC) na ^{40}Ar

Schematicky to lze vyjádřit takto:



Změříme-li obsah ^{40}Ar a ^{40}K ve zkoumaném vzorku a známe-li rozpadové konstanty pro oba rozpady ^{40}K , můžeme dle této rovnice stanovit stáří zkoumaného vzorku.

$$t_{\text{mil.let}} = \frac{1}{\lambda_{\text{K}} + \lambda_{\beta}} \cdot \ln \left[1 + \left(\frac{\lambda_{\text{K}}}{\lambda_{\text{K}} + \lambda_{\beta}} \right) \cdot \frac{{}^{40}\text{Ar}}{{}^{40}\text{K}} \right]$$

5.3. Datování pomocí rubidium-stronciové metody

Tato metoda využívá rozpadu izotopu ^{87}Rb na ^{87}Sr (přeměna β^-). Se stoupajícím stářím se mění rozdíl poměrů. Klesá podíl $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ a stoupá podíl $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$.

Metodou izochron (viz slovníček pojmů) lze pak dopočítat původní (iniciální poměr) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$.

Základní rovnice pro datování je:

$$\left(\frac{{}^{87}\text{Sr}}{{}^{86}\text{Sr}} \right)_m = \left(\frac{{}^{87}\text{Sr}}{{}^{86}\text{Sr}} \right)_{\text{inic}} + \left(\frac{{}^{87}\text{Rb}}{{}^{86}\text{Sr}} \right) \cdot (e^{\lambda t} - 1)$$

m. - měřený poměr

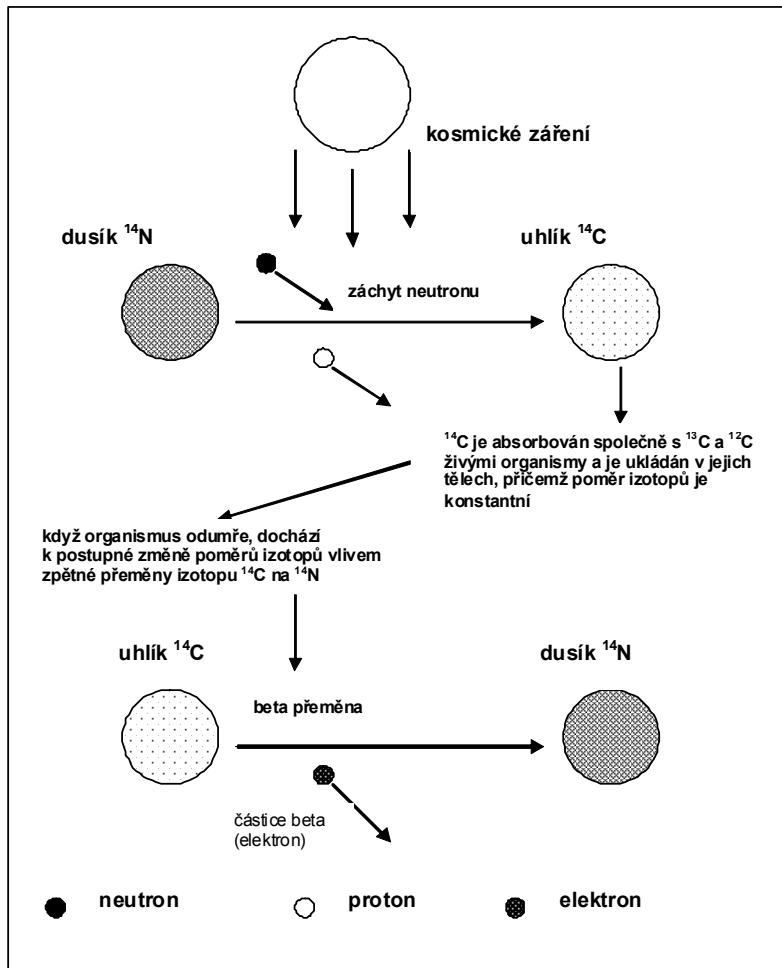
inic. - iniciální poměr v čase t_0

Abychom mohli zjistit stáří zkoumaného vzorku, musíme znát rozpadovou konstantu pro ^{87}Rb ($\lambda^{87\text{Rb}}$), dále současný poměr $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ a obsah ^{87}Rb , který se změří na hmotovém spektrometru a iniciální poměr $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, který zjistíme na koexistujících minerálech neobsahujících Rb.

Pro datování pomocí této metody platí dva zákony:

- 1) Všechny minerály nebo horniny pocházející z jednoho zdroje mají identický iniciální poměr $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$.

- 2) Magma vznikající ze zdrojů s nízkým obsahem Rb (plášťové horniny) mají nízký poměr $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. Magmata pocházející ze zdroje s vysokým obsahem Rb (horniny zemské kůry, např. granitoidy), mají vysoký iniciační poměr $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$.



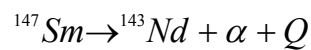
Obrázek 6: Schematické znázornění metody datování pomocí izotopu uhlíku ^{14}C . Kosmické záření působí na atom dusíku ^{14}N , ze kterého se jadernou přeměnou stane uhlík ^{14}C , ten je živými organismy absorbován společně s izotopy ^{12}C a ^{13}C do jejich těl v konstantním poměru. Když organismus odumře, izotop ^{14}C se pomocí rozpadu beta přemění zpět na dusík ^{14}N . Tím se mění poměr izotopů obsažených v těle odumřelého organismus a z této změny poměrů izotopů se dá vypočítat stáří.

5.4. datování pomocí samarium-neodymové metody

Tato metoda se využívá pro stanovení stáří vzájemně oddělených minerálů (granáty, pyroxeny, titanit). Je to nová metoda využívající přeměnu nestabilního izotopu ^{147}Sm na stabilní ^{143}Nd .

Princip metody lze velmi zjednodušeně vyjádřit rovnicí:

kde: α = emise ^4He (částice α)
 Q = rozpadová energie



V horninách se vyskytuje stabilní izotop ^{144}Nd . Rozpadem samaria vzniká izotop ^{143}Nd a tím se mění vzájemný poměr $^{144}\text{Nd}/^{143}\text{Nd}$ (^{143}Nd stoupá) a zároveň se mění poměr $^{147}\text{Sm}/^{143}\text{Nd}$ (^{147}Sm klesá v důsledku rozpadu).

Známe-li poločas rozpadu a rozpadovou konstantu λ pro ^{147}Sm , můžeme vypočítat stáří zkoumaného vzorku dle rovnice:

$$\left(\frac{{}^{143}\text{Nd}}{{}^{144}\text{Nd}}\right)_m = \left(\frac{{}^{143}\text{Nd}}{{}^{144}\text{Nd}}\right)_{inic} + \left(\frac{{}^{147}\text{Sm}}{{}^{144}\text{Nd}}\right) \cdot (e^{\lambda \cdot t} - 1)$$

m. - měřený poměr

inic. - iniciální poměr v čase t_0

kde měřený poměr izotopů $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ je roven iniciálnímu poměru těchto izotopů, který však nelze změřit, ale pouze dopočíst pomocí metody izochron (viz slovníček pojmů), plus poměr mateřského samaria ke stabilnímu neodymu $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$.

5.5. Datování pomocí izotopu uhlíku ^{14}C

Datovací metoda pomocí izotopu ^{14}C se používá k datování materiálů v rozsahu 0 - 50 000 let. Touto metodou lze datovat jak organický materiál (dřevo, kosti, části rostlin, vápnité schránky živočichů), tak i anorganický materiál s obsahem uhlíku (travertiny, jeskynní karbonáty). Principem této metody datování je měření zbytkové aktivity ^{14}C (izotopový pár $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$). Pokud organismus žije, přijímá kosmogenní ^{14}C do organismu, kde je jeho obsah stejný jako v okolí. Po jeho odumření se zastaví látková výměna a množství ^{14}C se začne vlivem rozpadu postupně snižovat. Čím starší je datovaný materiál, tím je obsah ^{14}C nižší. V důsledku toho se zároveň zvyšuje neurčitost stanovení a u starších vzorků je tak vlivem vyšší chyby měření přesnost snížena. Poločas rozpadu ^{14}C je 5730 let. Schematické zobrazení této metody je uvedeno na obrázku 6.

5.6. Použití alfaspektrometrie v geologických vědách

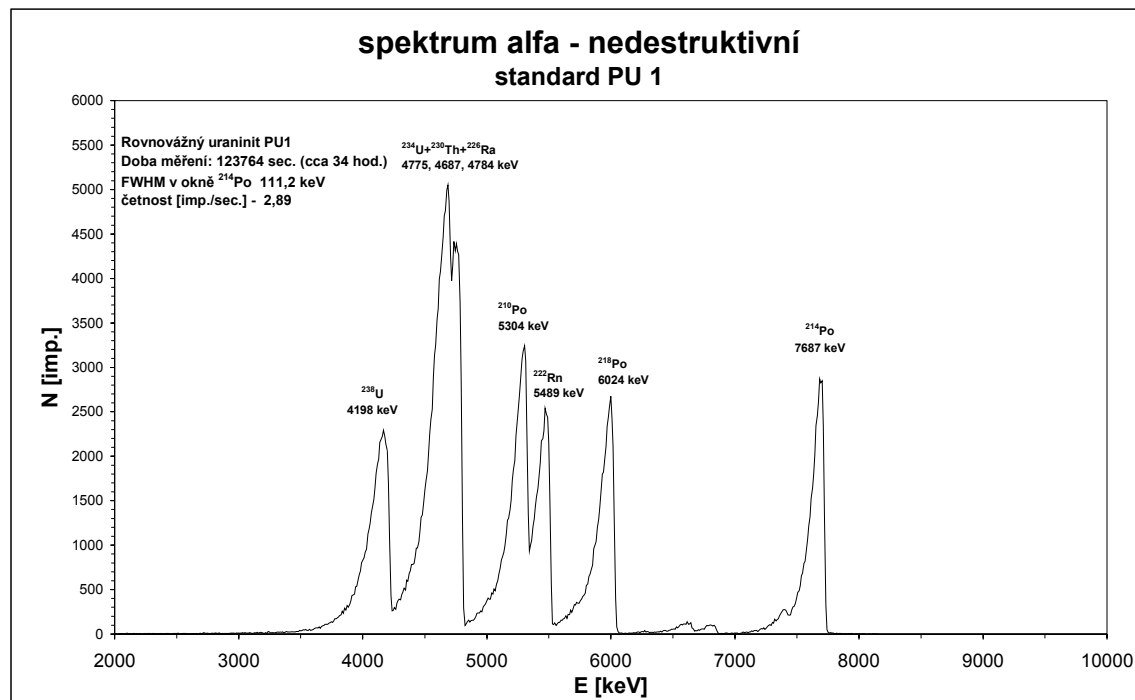
Alfaspektrometrické metody mají v geologických vědách široké pole využití. Používají se jak na stanovení obsahů radionuklidů v nejrůznějších druzích geologických materiálů, tak pro datování různými typy izotopů a izotopových párů v případech radioaktivního disequilibria (nerovnováhy – viz slovníček pojmů).

Jako příklad lze uvést alfaspektrometrický výzkum radioaktivních nerovnováh (destruktivní alfaspektrometrie) spodně proterozoických křemenných konglomerátů zrudněných Au-U mineralizací těžných na Witwatersrandu v JAR, který prováděli Carl a Meyer v 80. letech nebo ustanovení radioaktivních nerovnováh radionuklidů Jánské žíly na Příbramsku pomocí alfaspektrometrie a jejich následné datování pomocí izotopových párů rozpadové řady ^{238}U .

5.7. Použití gamaspektrometrie v geologických vědách

Gamaspektrometrie je principiálně podobná metoda jako alfaspektrometrie. V terénních podmínkách se tato metoda používá ke stanovení obsahů K, U, Th pomocí spektrometrů s detektory NaI(Tl). Touto metodou se nejčastěji určuje radioaktivita hornin. Vzhledem k nenáročnosti této metody lze provádět měření i letecky. Gamaspektrometrický průzkum se prováděl hlavně v 50. letech, kdy byl využíván k vyhledávání uranových ložisek. Avšak v tomto případě nelze hovořit o gamaspektrometrii jako takové. Prováděný průzkum byl zaměřen na vyhledávání radiometrických anomálií a naměřené hodnoty byly vlastně součtem celého spektra, kdy nebyly rozlišeny jednotlivé energie přítomných radionuklidů. Stejně tak se spektrometrická aparatura instalovaná na automobil používá ke geochemickému mapování a ověřování anomálií zjištěných leteckým průzkumem gama. Aparatury pro automobilovou

gamaspektrometrii jsou podobné jako pro leteckou. Další metodou je hloubková gamaspektrometrie, která umožňuje zjišťování radioaktivity podloží. Měří se ve vrtech hlubokých 10 – 15 m sondou o malém průměru. Pro měření spekter záření gama jsou nejvíce vhodné scintilační detektory (viz slovníček pojmů). V současné době se používají nejčastěji polovodičové detektory, např. „HPGe“, který je vyroben z vysoce čistého germania.



Obrázek 7: Alfasppektrum standardu PU1 (uraninit) ve stavu radioaktivní rovnováhy. Zleva vidíme energetické maximum pro ^{238}U (4198 keV), složený vrchol $^{230}\text{Th}+^{234}\text{U}+^{226}\text{Ra}$ (4687, 4775 a 4784 keV), vrchol ^{210}Po (5304 keV), dále ^{222}Rn (5489 keV), ^{218}Po (6024 keV) a zcela vpravo je vrchol pro ^{214}Po (7687 keV). Mezi energetickými maximy ^{218}Po a ^{214}Po jsou viditelné nízké zaoblené vrcholy ^{211}Bi a ^{219}Rn rozpadové řady ^{235}U .

6. ÚČINKY RADIOAKTIVITY NA LIDSKÝ ORGANISMUS

Důležitou charakteristickou vlastností radiace je její pronikavost. Tím je myšlena schopnost částic pronikat hmotou. Tato schopnost je pro každý typ záření jiná. Nejméně pronikavé je záření α , které má ve vzduchu dosah prvních centimetrů a k jeho zastavení stačí papír. Taktéž neproniká lidskou kůží. Pokud se záříč alfa nedostane přímo do těla, kde může působit přímo na tkáň, je pro člověka neškodný. Dolet částic β je větší a do organismu mohou proniknout v řádech centimetrů. Krátkovlnné RTG a záření γ , což jsou ionizující elektromagnetická záření, prochází lidským organismem bez větší ztráty vlastní energie, zatímco dlouhovlnné RTG záření je zachyceno lidským organismem z podstatné části již po několika centimetrech. Pro neutrony platí, že jejich dolet je závislý na energii, která je jim udělena během jaderné reakce, ale lze obecně konstatovat, že ve vzduchu uletí několik kilometrů. Lidské tělo je pro neutrony významnou překážkou, neboť obsahuje velké množství vody, se kterou letící neutron interaguje a kdy je část této energie pohlcena organismem. Tímto mechanismem může dojít k poškození organismu zejména v situaci, kdy je zasažen větším kvantem neutronů o vysoké energii. Díky tomu má neutron vysoký jakostní činitel, který je důležitý pro stanovení efektivního dávkového ekvivalentu, tedy stanovení konečného účinku radiace na lidský organismus.

Při vyšších dávkách radiace dochází k poškození organismu různého stupně. Určit dávku, která je již pro organismus škodlivá je velmi složité, protože to záleží na mnoha faktorech. Na intenzitě, času působení, typu radiace a na toleranci organismu. Velmi vysoké dávky pak způsobují nemoc z ozáření a následnou smrt. Přirozená radiace se svojí intenzitou žádné zdravotní komplikace nezpůsobuje, neboť dávkový příkon pro lidský organismus je podprahový.

Údaje o zdravotních účincích nízkých až středních dávek záření nevykazují při dávkách pod 200 mGy žádné škodlivé účinky. Při těchto nízkých dávkách vykazují statistické údaje abnormálně nízké negativní účinky v porovnání s neexponovanými skupinami organismů.

Při dávkách pod 200 mGy, kterým bylo vystaveno obyvatelstvo při atomovém bombardování Japonska v roce 1945 byl dokonce zaznamenán pokles úmrtnosti na rakovinu, oproti kontrolní skupině, která nebyla ozářena. Při dávkách nad 200 mGy se však výskyt leukémie se stoupající dávkou ozáření rychle zvyšuje.

Vědecký výzkum rostlinných a živočišných biologických populací soustavně prokazuje příznivé účinky nízkých až středních dávek záření. Tyto nízké dávky prokázaly blahodárné účinky na tyto biologické systémy bez podstatných škodlivých účinků, jaké lze pozorovat při vysokých dávkách. Naopak, Luckey ve své stati *Ionizing Radiation Promotes Protozoan Reproduction* (1986) uvádí, že u organismů pěstovaných v podmínkách potlačeného přirozeného záření byly při nižších dávkách pozorovány škodlivé účinky. Uvedl, že organismy, které se vyvíjely v prostředí draslíku za přítomnosti pouze izotopu ^{39}K , vykazovaly vážné růstové defekty v porovnání s organismy, pěstovanými v prostředí přírodního draslíku (obsahuje radioaktivní izotop ^{40}K). Potvrdil dále, že negativní účinek, který byl vyvolán potlačením radiační expozice byl přidáním radioaktivního ^{40}K do prostředí ^{39}K vyrušen.

Studie v oblasti buněčné a molekulární biologie, které prováděla řada vědců z celého světa potvrdily příznivé účinky nízkých a středních dávek záření na biologické organismy včetně lidských.

Výzkum škodlivosti radiace se prováděl i v místech, kde je oproti jiným oblastem vysoké radioaktivní pozadí. Je to zejména tam, kde je v horninách zvýšený obsah uranu, rádia a dalších produktů rozpadu uranových řad. Během asi 20 let trvajících výzkumu se projevila snížená úmrtnost na všechny druhy rakoviny včetně leukémie v oblastech s vysokým radiačním pozadím.

V dnešní době se často hovoří o tzv. „radonovém riziku“ (obrázek 4) ve smyslu škodlivého působení radonu na lidský organismus. Toto riziko spočívá v pronikání radonu puklinovým systémem v horninách na zemský povrch a následně do staveb a obydlí, kde se může koncentrovat a svojí radioaktivitou negativně působit na lidský organismus. Ani zvýšený obsah radonu však prokazatelně nevede ke zvýšenému výskytu nádorových onemocnění či genetických vad. Negativní účinek radonu na biologické systémy v koncentracích, jaké se reálně vyskytují ve stavbách se zatím spolehlivě vědecky neprokázal.

Výzkum provedený v USA prokázal, že s radonem v budovách není spojen zvýšený výskyt rakoviny plic. U nekouřících horníků pracujících v prostředí s vysokými koncentracemi radonu (těžba uranu) je rakovina plic takřka neznámou chorobou. Radon je tedy vědecky zpochybněn jako možná příčina vzniku rakoviny plic. Další studie, které byly prováděny v různých okresech na území USA se zaměřily na výskyt radonu v domech a na výskyt rakoviny plic v populaci, která v těchto domech žije. Výsledkem je, že údaje o výskytu rakoviny plic v jednotlivých okresech v USA jsou v záporné korelační závislosti na úrovni radonu v obydlích. Jinými slovy, radon nemá na vznik rakoviny plic u obyvatelstva žádný vliv.

7. METODY DETEKCE RADIOAKTIVITY A JEDNOTKY MĚŘENÍ

7.1. Detekce radioaktivity

Metod detekce radioaktivity je velké množství. Vzhledem k rozsáhlosti této problematiky postačí, pokud zde budou stručně uvedeny pouze nejdůležitější a nejpoužívanější metody.

7.1.1. Plynové počítače

Princip měření je založen na ionizaci plynu v detektoru. Při průletu dostatečně urychlených elektronů dojde k nárazové ionizaci neutrálních atomů či molekul plynové náplně detektoru. Dochází k uvolňování přídatných elektronů v několika vlnách. Lavinovité uvolňování elektronů vede k mnohonásobnému zmnožení elektronů, které je způsobeno primárním ionizujícím zářením. Tím je dosaženo mnohonásobného zvětšení elektrického impulsu pro jednu ionizující částici. Tento impuls je pak zaznamenán. Z tohoto principu vyplývá i poměrně vysoká přesnost měření. Spektrální vyjádření u tohoto způsobu měření radioaktivity však není prakticky možné.

Mezi plynové počítače řadíme:

1) Geiger-Müllerův počítač

2) proporcionální počítače

3) ionizační komory

7.1.2. Scintilační metody

Tyto metody jsou založeny na schopnosti určitých látek emitovat při dopadu vysoko energetické ionizující částice záblesk viditelného světla. Tyto látky se nazývají scintilátory. Svoji povahou můžou být buď anorganické (např. krystal jodidu sodného NaI, který bývá obohacen o thalium) nebo organické a to buď v krystalické formě nebo kapaliny. Záblesk vzniklý interakcí ionizující částice se scintilátorem je poté soustavou fotonásobičů zesílen a pak zaznamenán počítačem impulsů. Tyto detektory se používají hlavně k měření záření gama.

7.1.3. Polovodičové detektory

Používají se k detekci alfa částic, jejich princip vychází z dříve používaných vodivostních počítačů. Dnes se k detekci alfa záření používají zejména křemikové či germaniové diody, ve kterých alfa částice interaguje s elektrony, způsobí krátkodobé zvýšení vodivosti a tím i proudový impuls, který je zesílen nízkošumovým zesilovačem a multikanálovým analyzátozem je tento impuls přiřazen do příslušného energetického okna, vzniká tak charakteristické spektrum, ze kterého můžeme zjistit, jaký radionuklid je obsažen v měřeném vzorku.

7.1.4. Termoluminiscenční dozimetrie (TLD)

Tato metoda je založena na vlastnosti některých látek (nazývají se **luminofory**) zachytávat elektrony, které pak zůstanou v látce uvězněny. Počet zachycených elektronů odpovídá množství zářivé energie, tedy dávce. Tohoto jevu lze využít v dozimetrii. Je však potřeba množství elektronů spočítat a zjistit tak dávku, které byl dozimetr vystaven. To se provede prudkým zahřátím detektoru (luminoforu), zachycené elektrony se uvolní a rozdíl energií se projeví ve formě viditelných fotonů, které se pak spočítají v aparatuře přizpůsobené k počítání fotonových kvant.

Tato metoda se používá i v osobní dozimetrii.

Objev TLD se významnou měrou uplatnil i v archeologii, neboť tato metoda umožňuje stanovit původní stáří u některých předmětů (např. z pálené hlíny) a to porovnáním radioaktivity okolí s radioaktivitou předmětu, kdy při jeho vzniku se termoluminiscenční hodiny vynulují (čas 0 = čas vzniku předmětu = stáří).

7.1.5. Fotoluminiscenční dozimetrie (FLD)

Byla objevena v roce 1951, je to starší a méně rozšířená metoda. Principiálně je podobná TLD, avšak k vyvolání viditelných fotonů se používá UV-záření pomocí rtuťové výbojky, detektorem je opět fotonásobič. Nevýhodou je křehkost, značná energetická závislost a vysoká cena. Výhodou metody FLD je možnost opětovného použití dozimetru po vyžihání. Další výhodou je, že v širokém rozsahu dávek je lineární a že s ním lze při vhodné diagnostické aparatuře registrovat dávky již od 10 μGy výše.

Dozimetry jsou velice důležité pro sledování dávky, kterou organismus absorbuje z okolí. Nejpoužívanější jsou filmové dozimetry, které používají např. pracovníci radiologických pracovišť. Filmový dozimetr je krabička obsahující film, který je dále zakryt různými druhy kovů. Po určitém definovaném čase je dozimetr vyhodnocen a ze zčernání filmu ukrytého pod kovovými plochami je možno zjistit charakter záření, kterému byl pracovník vystaven a pak vyčíslit dávkový ekvivalent pro organismus.

Nevýhodou dozimetrů je skutečnost, že při vysokém ozáření (může jít i o smrtelnou dávku) nijak nevarují svého nositele. Pokud je tedy nebezpečí práce v prostředí s vysokou intenzitou radiace, je potřeba mít u sebe nějaký detektor, který ukazuje okamžitou úroveň záření.

7.2. Jednotky měření radioaktivity a jejich vzájemné vztahy

aktivita (A) – jednotka **becquerel [Bq]** - vyjadřuje počet jaderných rozpadů za jednotku času (1 sec) pro daný radionuklid

měrná aktivita a_m nebo také **hmotnostní aktivita** – jednotka **becquerel na kilogram [Bq.kg⁻¹]** - vyjadřuje počet rozpadů radionuklidu za časovou jednotku při definované hmotnosti, používá se pro vyjádření radioaktivity hornin

objemová aktivita a_v – **becquerel na metr krychlový [Bq.m⁻³]** – touto veličinou se vyjadřuje koncentrace např. radonu ve vzduchu dříve používanou jednotkou aktivity byl:

1 curie [Ci]: 1 Ci = 3,7 . 10¹⁰ Bq

1 [Ci] = aktivita 1 gramu rádia ²²⁶Ra

tato jednotka byla původně definována jako aktivita 1 g čistého rádia ²²⁶Ra, ale vzhledem k tomu, že 1 Ci představuje poměrně vysokou aktivitu, používalo se častěji zlomků této jednotky (pCi, μCi), až byla později ustanovena jako jednotka aktivity 1 Bq.

plošná aktivita a_s – **becquerel na metr čtvereční [Bq.m⁻²]** – používá se pro vyjádření kontaminace zemského povrchu radionuklidy radioaktivního spadu, které se koncentrují v přípovrchové vrstvě hornin a půdy

dávkový ekvivalent (H) – jednotka **sievert [Sv]** - tato veličina vyjadřuje účinky ionizujícího záření na živou tkáň; pro výpočet dávkového ekvivalentu je potřeba znát **jakostní činitel**

jakostní činitel (Q) – vyjadřuje závažnost absorbovaného ionizujícího záření podle biologické účinnosti na živý organismus, je to bezrozměrné číslo, pro jednotlivé druhy záření platí tyto koeficienty:

Q = 1 – záření γ (fotony), záření β (elektrony), miony

- Q = 5** – neutrony (méně než 5 keV a více než 20 MeV), protony (více než 2 MeV)
- Q = 10** – neutrony (10 – 100 keV), neutrony (2 – 20 MeV)
- Q = 20** – částice α , neutrony (100 keV – 2 MeV)

efektivní dávkový ekvivalent (H_E) – jednotka **sievert [Sv]** – vyjadřuje účinky ionizující radiace na lidský organismus; pomocí této veličiny lze vyjádřit konečné účinky radiace okolního (životního) prostředí na jedince; udává se v **mSv·rok⁻¹**

dávkový příkon (D) – jednotka **gray za sekundu [Gy.s⁻¹]** – tuto veličinu lze využít k popisu radioaktivity hornin (dávkový příkon gama záření ve vzduchu); pro tuto veličinu se někdy používá jednotka **rad.s⁻¹** (rad za sekundu)
1 rad.s⁻¹ = 10⁻²Gy.s⁻¹ = 0,01Gy.s⁻¹

dávka, absorbovaná dávka (D) – jednotka **gray [Gy]** – vyjadřuje podíl energie předané ionizujícím zářením látky a hmotnosti této látky
1 Gy = 1 J.kg⁻¹
1 rad = 10⁻² Gy = 0,01 Gy

absorbovaná dávka záření gama ve vzduchu (D_a) – jednotka **rentgen [R]**
1 R = 8,69.10⁻³ Gy

dávkový příkon záření gama ve vzduchu (D_a) – jednotka **mikrorentgen za hodinu [μR.h⁻¹]**
1 μR.h⁻¹ = 8,69 nGy.h⁻¹

Pro ilustraci jsou zde uvedeny hodnoty ozáření zdroji ionizujícího záření pro člověka a to od hygienických limitů až po letální dávku.

- dle vyhlášky Státního úřadu pro jadernou bezpečnost č. 307/2002 (o radiační ochraně) je stanoven obecný limit pro obyvatelstvo **1 mSv·rok⁻¹**, výjimečně lze dosáhnout hodnoty **5 mSv·rok⁻¹** max. po dobu 5 po sobě jdoucích let, přičemž tato hodnota platí pro celé tělo a to ze všech zdrojů ionizujícího záření
- vyšší limit mají osoby pracující se zdroji ionizujícího záření (radiační pracovníci), u nichž je hygienický limit stanoven na **50 - 100 mSv·rok⁻¹**, což je ve srovnání s hygienickým limitem pro obyvatelstvo mnohonásobně víc, ale na druhou stranu ve srovnání s dávkami, které vykazují negativní fyziologické účinky mnohonásobně méně
- dávka v rozmezí **0,5 – 1 Sv** obdržena v krátké době může způsobit lehkou nemoc z ozáření, která se může projevit bolestmi hlavy, sníženou imunitou či možnou dočasnou sterilitou především u mužů
- dávka okolo **2 Sv** obdržena v krátké době může způsobit již po několika hodinách od expozice nevolnost, zvracení, po několika dnech dočasnou sterilitu u mužů, u žen může vyvolat potrat nebo hrozí narození mrtvého plodu, dočasně je též poškozena imunita, může dojít až k 10% úmrtí
- dávka v rozmezí **3 – 6 Sv** obdržena v krátké době způsobuje vážnou radiační otravu, která je smrtelná až pro 50% ozářených, přičemž první příznaky se dostavují již půl hodiny od expozice od nevolnosti až po pozdější krvácení z různých tkání, dále dochází k vysokému poškození organismu, vypadávají vlasy a je silně potlačena imunita vlivem snížení počtu leukocytů, stoupá náchylnost k infekci, rekonvalescence je v řádech měsíců

- dávka okolo **10 Sv** obdržená v krátké době představuje již tak vysokou dávku, že dochází k úmrtí téměř 100% ozářených, přičemž první příznaky se projeví již do půl hodiny po expozici, poškození organismu je velmi těžké, kostní dřeň je silně poškozená a jen nejlepší lékařská péče může zajistit přežití, rekonvalescence trvá i několik let, avšak úplné zotavení bez trvalých následků je nepravděpodobné
- dávka v rozmezí **10 – 50 Sv** obdržená v krátké době je pro 100% ozářených smrtelná, symptomy ozáření se projeví v řádu několika minut a smrt nastává dle dávky v rozmezí několika dní, při horní hranici expozice do několika hodin, přičemž exponovaná osoba umírá na celkové selhání organismu či na kolaps nervového systému
- dávka nad **50 Sv** obdržená v krátké době způsobí okamžitou dezorientovanost, exponovaná osoba téměř okamžitě ztratí vědomí, organismus celkově kolabuje, smrt je nevyhnutelná a dochází k ní během několika minut či hodin

8. SLOVNÍČEK POJMŮ

disequilibrium – nerovnováha, tento pojem se obecně používá v radiochemii k vyjádření radioaktivní nerovnováhy; na základě nerovnováh v poměrech izotopových párů lze provádět různá datování

izochrona – linie spojující místa stejného stáří na grafu, v datování se používá tzv. metoda izochron, pomocí níž se zjišťuje iniciální poměr izotopů (např. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ nebo $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$) v čase t_0 (počáteční čas) např. z asociace vzorků s různým obsahem daného izotopu

izomorfie – vzájemné zastupování prvků (především kationtů) ve struktuře krystalové mřížky v různých poměrech, tento jev je častý především u minerálů, kdy vzájemným zastupováním kationtů nebo i celých skupin ve vzorci dochází k izomorfnímu mísení mezi strukturálně podobnými minerály (např. olivín tvoří ucelenou izomorfní řadu s krajními členy **fayalit** – $\text{Fe}_2[\text{SiO}_4]$ a **forsterit** – $\text{Mg}_2[\text{SiO}_4]$, které se společně v libovolném poměru od 0 – 100% mísí)

izotopový pár – dvojice izotopů (radioaktivních prvků) o různém poločasu rozpadu, u nichž lze změnu jejich vzájemného poměru (radioaktivní nerovnováhu) použít k datování stáří

izotypní – strukturálně podobný, mající stejnou krystalickou mřížku; např. halit (NaCl) má stejnou strukturu jako sylvín (KCl)

kosmogenní radionuklid – např. izotop uhlíku ^{14}C , který vzniká vlivem kosmického záření jadernou přeměnou z atomu dusíku ^{14}N v atmosféře

kvazistacionární stav – metastabilní stav jádra izotopu, kdy se při vzniku α částice uvolní přebytečná vazebná energie, která je touto částicí absorbována a umožní jí později opustit jádro mateřského nuklidu; stav, kdy se neutrony a protony po vzniku α částice dostanou na vyšší energetickou hladinu

metamiktní stav – stav, kdy je vlivem radioaktivity porušena krystalická mřížka minerálu do té míry, že se mění jeho optické vlastnosti; energie částic radioaktivního záření je tak velká, že dochází k porušení vazeb v krystalové mřížce; zahřátím minerálu na určitou teplotu pak zpravidla dochází k rekrytalizaci, tedy k opravě porušené základní struktury minerálu; tento jev je velice častý u silně radioaktivních minerálů uranu a thoria

nesosilikáty – skupina křemičitanů s izolovanými tetraedry $[\text{SiO}_4]^{4-}$, uloženými ve struktuře minerálu nezávisle na sobě; mají důsledkem těsného uspořádání stavebních částic poměrně vysokou hustotu a tvrdost; nesosilikáty patří k významným horninotvorným minerálům (olivín, granát, zirkon, andalusit, kyanit, silimanit)

pegmatit – hrubozrnná magmatická hornina krystalující jako produkt magmatické diferenciaci ze zbytkového magmatu při teplotách 400 – 600 °C; typické pro pegmatity jsou veliké, často vlastními tvary omezené krystaly, tvořící drúzy uvnitř dutin; hlavními minerály pegmatitů jsou: křemen (často jeho barevné odrůdy – morion, záhněda, ametyst), živec, slída, ale často se v nich vyskytují i turmalín, beryl, topaz, lepidolit apod.; pegmatity jsou velmi vyhledávanou a těženou surovinou, hlavně pro obsah živce, slíd a také různých drahých kamenů

podprahová dávka – dávka ionizujícího záření nevykazující jakýkoliv účinek na živý organismus, často se dá zjistit jen citlivými přístroji pro detekci radiace nízkých hodnot

potenciálová bariéra – je jev, kdy energetický potenciál v určité oblasti převyšuje energetický potenciál okolí a kdy průchod částice přes takovou bariéru není vlivem její menší energie možný; pokud má částice nižší energii než je hodnota potenciálu bariéry, dojde k odrazu částice; pokud je energie částice vyšší než potenciál bariéry, částice touto potenciálovou bariérou projde

pseudomorfóza – vlastnost minerálu vyplnit prostor po jiném minerálu; vzniká krystalový tvar, který není pro daný minerál typický, často patří i do jiné krystalové soustavy; příkladem mohou být pseudomorfózy kalcitu po aragonitu, který je méně stálý nebo náhrada minerálu jiným, např. pyritu limonitem, živce kaolinitem apod.

radionuklid – izotop nestabilního prvku, který svým rozpadem, či jinou jadernou přeměnou emituje do svého okolí radioaktivní záření; radionuklid může být buď umělý nebo přirozený; umělých radionuklidů se často využívá v medicíně při radioterapii (např. ^{60}Co) nebo ve vědeckém výzkumu; umělé radionuklidy vznikají v jaderných reaktorech (například ^{137}Cs) nebo v urychlovačích částic

REE – prvky vzácných zemin (angl. *rare earth elements*), dělí se na lehké (LREE – *light rare earth elements*), kam patří: La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu a na těžké (HREE – *heavy rare earth elements*), ke kterým řadíme: Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb a Lu; jsou si podobné co se týká vazebných vlastností i velikostí iontů a proto se vyskytují společně (společné geochemické vystupování)

scintilační detektor – detektor pracující na principu excitace elektronu do vyššího energetického stavu, kdy tuto excitaci způsobí ionizující částice, zpětná deexcitace elektronu (návrat do základní energetické hladiny) se projeví vyzářením kvanta viditelného světla (světelný záblesk), které je detekováno fotonásobičem a vzniklý impuls je pak načten spektrometrem

speleotéma – sekundární výplň jeskyní, krasový sediment

supergenní procesy (supergenní zóna) – procesy probíhající v přípovrchové zóně rudního ložiska, které je ovlivněno působením různých vlivů, zejména: atmosféry, prosakujících povrchových vod, klimatem, činností organismů, gravitací

travertin – sladkovodní vápenec ukládaný z teplých i studených pramenů, bývá značně pórovitý, často se těží jako dekorační kámen

vulkanit – vulkanická hornina – magmatická hornina, která utuhla na povrchu nebo mělce pod povrchem, tvoří tělesa různých morfologických tvarů (žíly, kupy, lávové proudy, lávové příkrovy)

9. LITERATURA

Bourdon B., Henderson G.M., Lundstrom C.C., Turner S.P., 2003, Uranium-series Geochemistry. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*. Vol. 52, 656 str.

Bouška V., Jakeš P., Pačes T., Pokorný J., 1980. *Geochemie*. Academia, Praha, 556 str.

Carl C., Meyer M., 1983. α -spectrometric investigations of radioactive disequilibrium in early precambrian quartz pebble conglomerates. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. Art., 81/2: 235-246

Feigl M., 2003. *Aplikace nové metody pro alfaspektrometrické stanovení obsahu a izotopického složení uranu v hutních struskách, uranem barvených sklech a produktem jejich alterace*. MS diplomová práce, Ústav geochemie, mineralogie a nerostných zdrojů PřF UK, Praha, 44 str., 7 příl.

Hála J., 1998. *Radioaktivita, ionizující záření, jaderná energie*. Konvoj, Brno, 309 str., 4 příl.

<http://www.geoinformatics.upol.cz> 12.7.2007

Cyhelský L., 1981. *Úvod do teorie statistiky*. SNTL, Praha, 352 str.

Chlupáč I. a kol., 2002. *Geologická minulost České republiky*. Academia, Praha, 436 str.

Chvátal M., 2005. *Úvod do systematické mineralogie*. Silikátový svaz, Praha, 171 str.

Jarka P., 2007. *Uran-polymetalická mineralizace Jánské žíly, Příbram-Březové Hory, ČR: Alfa-spektrometrické stanovení radionuklidů*. MS diplomová práce, Ústav geochemie, mineralogie a nerostných zdrojů PřF UK, Praha, 45 str., 4 příl.

Killeen P.G., Carmichael C.M., 1976. Determination of radioactive disequilibrium in uranium ores by alpha-spectrometry. *Paper-Geol. Survez of Canada*. 1-17, 38-75

Klumpar J., 1976. *Metrologie ionizujícího záření a radionuklidů*. Academia, Praha, 244 str.

Kovář Z., Spurný F., Spurný Z., Novotný J., Cejnar F., 1984. *Pokroky dozimetrie ionizujícího záření*. Academia, Praha, 328 str.

Löfvendhal R., Holm E., 1981: Radioactive disequilibria and apparent ages of secondary uranium minerals from Sweden. *Lithos*, Vol. 14, pp. 189-201. Oslo.

Luckey T.D., 1986: Ionizing Radiation Promotes Protozoan Reproduction. *Radiat. Res*

Majer V. et al., 1981. *Základy jaderné chemie*. SNTL, Praha, 612 str.

Mareš S. a kol., 1990. *Úvod do užití geofyziky*. SNTL, Praha, 680 str.

Matějka D., Holcová K., (editors) *Člověk a anorganická příroda*. projekt OPPA, UK, Praha

Matějka D., Holcová K., (editors) *Složení, struktura a vývoj Země*. projekt OPPA, UK, Praha

Moučka V., Gernt J., Matolín M et al. 1968. *Radiometrie, vybrané statě pro postgraduální studium užití geofyziky*. PřF UK, vlastním nákladem. Str. 38-48

Muckerheide J., 1996: Zdravotní účinky nízkých dávek záření. *Jaderná bezpečnost*, Vol.4 (25), pp. 6 - 16

Petránek J., 1993: *Malá encyklopedie geologie JIH*, České Budějovice, 246 str.

Richards D.A., Dorale J.A., 2003. Uranium-series Chronology and Environmental Applications of Speleothems. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*. Vol. 52, 407-450

Sejkora, J., Čejka, J., Škácha, P., Gabašová, A., and Novotná, I., 2003: Minerály zippeitové skupiny z Jánské žíly, Březové Hory, Příbram. *Bull. Mineral.- Petrolog. Odd. Nár. Muz.*, Praha, 11, 183-189.

Sejkora, J., Kouřimský, J., 2005. *Atlas minerálů České a Slovenské republiky*. Academia, Praha, 375 str.

Sill C.W., 1977. Determination of Thorium and Uranium Isotopes in Ores and Mill Tailings by Alpha Spectrometry. *Analytical Chemistry*. Vol. 49, No. 4, 618-621

Škácha P., 2007. *Charakteristika uran-polymetalické mineralizace Jánské žíly a přerozdělení izotopů olova do sekundárních fází, Příbram – Březové Hory*. MS diplomová práce, ÚGMNZ PřF UK, Praha, 41 str., 4 příl.

Ullmann V., *Jaderná a radiační fyzika*, <http://astronuklfyzika.cz> 28.7.2011

Vyhláška Státního úřadu pro jadernou bezpečnost č. 307/2002 Sb. (o radiační ochraně)

Wahl W., 2003. *Radionuclide-Handbook for Laboratory Workers in Spectrometry, Radiation Protection and Medicine*. ISuS, Schliersee, 130 str.

Whyte G.N., 1973. *Základy dozimetrie ionizujícího záření*. Academia, Praha 116 str.

Zahradník O., 2005. *Radioaktivní nerovnováha uranových rozpadových řad a její aplikace pro datování přírodních procesů*. MS bakalářská práce, ÚGMNZ PřF UK, Praha, 17 str.

PŘÍLOHY:

Příloha č. I:

METODICKÁ PŘÍRUČKA PRO UČITELE K PRAKTICKÝM ÚLOHÁM

Tato metodická příručka je určena k realizaci praktických cvičení k publikaci Radioaktivita v přírodě a její využití v geologických vědách, jejíž cílem je seznámení studentů s radiochemickými ději v přírodě a jejich aplikací v různých vědních oborech formou praktických příkladů. Pro co největší přehlednost a srozumitelnost je tato příručka rozdělena na jednotlivé metodické pokyny dle zadávaných úloh. Je v ní řešen postup zadání a očekávaný výstup v podání řešitele – žáka.

Tyto praktické úlohy jsou určeny pro žáky 4-letých nebo vyšších ročníků víceletých gymnázií se zaměřením na přírodní vědy.

Úloha č. 1

Radioaktivní přeměny

V přírodě dochází ke čtyřem základním radioaktivním přeměnám (alfa - α , beta - β^- , beta - β^+ a elektronový záchyt – EC), při kterých dochází k zániku nestabilního prvku a ke vzniku prvku nového, zpravidla stabilního. Cílem tohoto cvičení je pochopení principů jednotlivých druhů radioaktivních přeměn a jejich vyjádření pomocí jednoduchých rozpadových rovnic. Pro každý typ radioaktivní přeměny žák řeší rovnice přeměn tří radionuklidů dle vzorce obecné rovnice daného typu přeměny za použití periodické tabulky prvků.

Pomůcky:

psací potřeby, periodická tabulka prvků, pracovní list „Úloha č. 1 – Radioaktivní přeměny“

Čas pro vypracování:

15 minut

Zadání:

1) Přeměna alfa

K přeměně α dochází převážně u přirozených i umělých radionuklidů těžších prvků, v jejichž jádrech se projevuje silné odpuzování protonů. Probíhá u všech přirozených rozpadových řad.

Při této přeměně emituje jádro rozpadajícího se radionuklidu kladně nabitou částici α , obsahující dva protony a dva neutrony, která odpovídá kladně nabitému jádru helia.

Dle této obecné rovnice pro přeměnu alfa

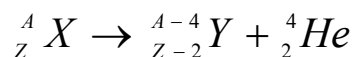
kde:

A = hmotnostní číslo

Z = protonové číslo

X = mateřský izotop

Y = dceřiný izotop



zapište rovnice pro přeměny těchto mateřských radionuklidů: a) ${}^{226}_{88} Ra$, b) ${}^{219}_{86} Rn$, c) ${}^{214}_{84} Po$

2) Přeměna β^-

Přeměna β^- vzniká rozpadem neutronu na proton a elektron. Tento elektron je potom emitován jádrem do okolí. Vznikem protonu dochází k posunu prvku v periodické tabulce směrem doprava. Nově vzniklý prvek má protonové číslo o 1 vyšší.

Dle této obecné rovnice pro přeměnu β^-
kde:

A = hmotnostní číslo

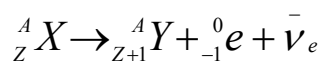
Z = protonové číslo

X = mateřský izotop

Y = dceřiný izotop

e = elektron

ν_e^- = elektronové antineutrino



zapište rovnice pro přeměny těchto mateřských radionuklidů: a) ${}^{32}\text{P}$, b) ${}^{35}\text{Cl}$, c) ${}^{76}\text{As}$

3) Přeměna β^+

Při tomto rozpadu se mění proton na neutron. Dochází k tomu tak, že spontánní přeměnou protonu na neutron vznikne kladně nabitý elektron, tzv. **pozitron e^+ (částice β^+)**. Tato reakce je doprovázena emisí tohoto pozitronu β^+ , zatímco vzniklý neutron n^0 zůstává součástí jádra. Prvek se v periodické tabulce posouvá o jednu pozici vlevo, avšak hmotnostní číslo se nemění. Výskyt tohoto typu přeměny v přírodě je zanedbatelný a vyskytuje se u prvků, které mají vyšší počet protonů a nedostatek neutronů (neutron-deficitní jádro).

Dle této obecné rovnice pro přeměnu β^+
kde:

A = hmotnostní číslo

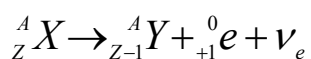
Z = protonové číslo

X = mateřský izotop

Y = dceřiný izotop

e^+ = pozitron

ν_e = elektronové neutrino



zapište rovnice pro přeměny těchto mateřských radionuklidů: a) ${}^{103}\text{Sn}$, b) ${}^{49}\text{Cr}$, c) ${}^{30}\text{P}$

4) Elektronový záchyt (EC)

Při tomto typu přeměny dochází k přeměně protonu na neutron, avšak mechanismus přeměny je v tomto případě odlišný. Při této přeměně, rozdílně od β^+ , nedochází ke spontánnímu rozpadu protonu, ale k zachycení elektronu jádrem. Reakcí tohoto elektronu s protonem dojde ke vzniku neutronu za současné emise rentgenového záření.

Dle této obecné rovnice pro elektronový záchyt
kde:

A = hmotnostní číslo

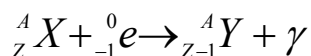
Z = protonové číslo

X = mateřský izotop

Y = dceřiný izotop

e = elektron

γ = emise záření gama



zapište rovnice pro přeměny těchto mateřských radionuklidů: a) ${}^{125}\text{I}$, b) ${}^{110}\text{In}$, c) ${}^{180}\text{W}$

Řešení:

1) Přeměna alfa pro: a) ^{226}Ra , b) ^{219}Rn , c) ^{214}Po

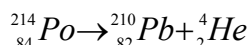
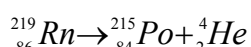
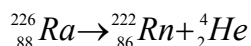
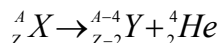
kde:

A = hmotnostní číslo

Z = protonové číslo

X = mateřský izotop

Y = dceřiný izotop



2) Přeměna β^- pro: a) ^{32}P , b) ^{35}Cl , c) ^{76}As

kde:

A = hmotnostní číslo

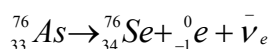
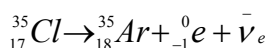
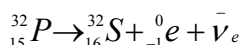
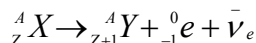
Z = protonové číslo

X = mateřský izotop

Y = dceřiný izotop

e = elektron

$\bar{\nu}_e$ = elektronové antineutrino



3) Přeměna β^+ pro: a) ^{103}Sn , b) ^{49}Cr , c) ^{30}P

kde:

A = hmotnostní číslo

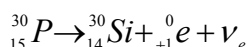
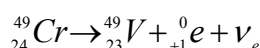
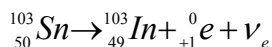
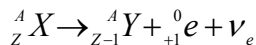
Z = protonové číslo

X = mateřský izotop

Y = dceřiný izotop

e^+ = pozitron

ν_e = elektronové neutrino



4) Elektronový záchyt pro: a) ^{125}I , b) ^{110}In , c) ^{180}W

kde:

A = hmotnostní číslo

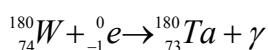
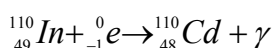
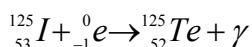
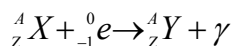
Z = protonové číslo

X = mateřský izotop

Y = dceřiný izotop

e = elektron

γ = emise záření gama



Úloha č. 2

Datování pomocí radiometrických metod

Cílem cvičení je seznámit žáka s praktickým využitím metod datování pomocí radioizotopů v aplikované vědě. Žák řeší možnou aplikaci nejvhodnějších metod datování na praktických příkladech formou logické úvahy na základě indicií vyplývajících ze zadání úlohy. Výsledky cvičení jsou pak diskutovány. V diskusi žák odůvodní právě svůj způsob řešení.

Pomůcky:

Psací potřeby, kalkulačka, stratigrafická tabulka, pracovní list „Úloha č. 2 – Datování pomocí radiometrických metod“

Čas pro vypracování:

15 – 20 minut

Zadání:

Pro datování stáří různých materiálů na principu radioaktivních nerovnováh se v obecné rovině využívá principu rozdílných poměrů aktivit mateřských a dceřiných radionuklidů nebo úbytek mateřských radionuklidů a hromadění dceřiných produktů. Vhodnost dané metody datování je určována mnoha faktory, které jsou pro výběr klíčové. Je-li správně vybrána metoda pro datování zkoumaného materiálu, je i chyba datování nižší a výsledek pak přesnější. Naopak, zcela nevhodný výběr metody vede k nepřesnému výsledku nebo nelze získat žádná relevantní data. Naprosto základní podmínkou však je obsah některého radionuklidu v datovaném materiálu. Cílem této úlohy je vybrat z nabízených možností vhodnou metodu datování pro různé materiály, jež máte za úkol zkoumat.

V tabulce č. 1 jsou uvedeny metody datování na principu nerovnovážených aktivit izotopových párů s jejich časovým rozsahem použitelnosti. Tento časový rozsah je vyjádřen jako maximální interval použití dané metody pro konkrétní materiál, jež má být zkoumán.

- 1) Pokuste se logickou úvahou přiřadit vhodné metody datování k materiálům s odhadnutým stářím uvedených v tabulce č. 2.
- 2) Vybrané metody přiřazené k danému materiálu zapište do tabulky č. 3.
- 3) Pokud vyhovuje datovanému materiálu více metod, uveďte je.
- 4) Pro určení přibližného stáří datovaných materiálů použijte stratigrafickou tabulku, jež na časové škále vyjadřuje jednotlivé časové úseky vývoje naší planety a takto určené přibližné stáří zapište do tabulky č.3.

Nápověda:

Nejlepších výsledků datování se docílí, je-li zvolena metoda, jejíž střední interval rozsahu použitelnosti se blíží předpokládanému stáří zkoumaného materiálu. Horní hranice použitelnosti metody je obecně vymezena dosažením rovnováhy aktivit měřených izotopových párů.

Tabulka č.1

METODA	POLOČAS ROZPADU MATEŘSKÉHO IZOTOPU	ČASOVÝ ROZSAH METODY
^{14}C	5 730 let	1 000 – 50 000 let
$^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$	4,510 mld. let	pro materiály starší než 20 mil. let
$^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$	47 mld. let	pro materiály starší než 10 mil. let
$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	1,300 mld. let	pro materiály starší než 100 tis. let
$^{235}\text{U}/^{207}\text{Pb}$	713 mil. let	pro materiály starší než 20 mil. let
$^{232}\text{Th}/^{208}\text{Pb}$	13,960 mld. let	pro materiály starší než 50 tis. let

Tabulka č. 2

MATERIÁL KE ZKOUMÁNÍ
dřevěné topůrko – archeologický nález (holocén)
prvohorní (paleozoická) vyvřelina s obsahem ^{238}U, ^{235}U, ^{234}U, ^{232}Th, ^{230}Th, ^{226}Ra, ^{210}Po, ^{206}Pb, ^{207}Pb, ^{208}Pb (ordovik x silur)
vápencový krasový sediment (pleistocén x holocén)
tercierní vulkanit s obsahem ^{40}K, ^{238}U, ^{235}U, ^{232}Th, ^{207}Pb, ^{208}Pb, ^{206}Pb (miocén)
vyvřelá hornina archaického stáří s obsahem ^{40}K, ^{238}U, ^{235}U, ^{232}Th, ^{87}Rb, ^{87}Sr, ^{226}Ra, ^{207}Pb, ^{208}Pb, ^{206}Pb (archaikum x proterozoikum)

Tabulka č. 3

DATOVANÝ MATERIÁL	ODHAD STÁŘÍ DLE STRATIGRAFICKÉ TABULKY	VYBRANÉ METODY DATOVÁNÍ

Řešení:

Tabulka č.1

METODA	POLOČAS ROZPADU MATEŘSKÉHO IZOTOPU	POUŽITELNOST METODY
^{14}C	5 730 let	1 000 – 50 000 let
$^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$	4,510 mld. let	pro materiály starší než 20 mil. let
$^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$	47 mld. let	pro materiály starší než 10 mil. let
$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	1,300 mld. let	pro materiály starší než 100 tis. let
$^{235}\text{U}/^{207}\text{Pb}$	713 mil. let	pro materiály starší než 20 mil. let
$^{232}\text{Th}/^{208}\text{Pb}$	13,960 mld. let	pro materiály starší než 50 tis. let

Tabulka č. 2

MATERIÁL KE ZKOUMÁNÍ
dřevěné topůrko – archeologický nález (holocén)
prvohorní (paleozoická) vyvřelina s obsahem ^{238}U, ^{235}U, ^{234}U, ^{232}Th, ^{230}Th, ^{226}Ra, ^{210}Po, ^{206}Pb, ^{207}Pb, ^{208}Pb (ordovik x silur)
vápencový krasový sediment (pleistocén x holocén)
tercierní vulkanit s obsahem ^{40}K, ^{238}U, ^{235}U, ^{232}Th, ^{207}Pb, ^{208}Pb, ^{206}Pb (miocén)
vyvřelá hornina archaického stáří s obsahem ^{40}K, ^{238}U, ^{235}U, ^{232}Th, ^{87}Rb, ^{87}Sr, ^{226}Ra, ^{207}Pb, ^{208}Pb, ^{206}Pb (archaikum x proterozoikum)

Tabulka č. 3

DATOVANÝ MATERIÁL	ODHAD STÁŘÍ DLE STRATIGRAFICKÉ TABULKY	VYBRANÉ METODY DATOVÁNÍ
dřevěné topůrko	0 – 10 000 let	^{14}C
prvohorní (paleozoická) vyvřelina	430 mil. let	$^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$, $^{235}\text{U}/^{207}\text{Pb}$, $^{232}\text{Th}/^{208}\text{Pb}$
vápencový krasový sediment	10 000 let	^{14}C
tercierní vulkanit	5,2 – 23 mil. let	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$, $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$, $^{235}\text{U}/^{207}\text{Pb}$
vyvřelá hornina archaického stáří	2,7 mld. let	$^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$, $^{235}\text{U}/^{207}\text{Pb}$, $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$, $^{232}\text{Th}/^{208}\text{Pb}$

Úloha č. 3

Výpočet aktivity radioizotopu

Cílem tohoto cvičení je osvojení praktické dovednosti výpočtu aktivity radioizotopu. Žák řeší pomocí návodu výpočet určitého množství radioaktivní látky v nalezeném předmětu a učí se tak prakticky aplikovat teoretické znalosti osvojené při výuce matematiky a chemie. Dále získává poznatek o tom, že radioaktivita není jen pojem, se kterým se setkává v médiích povětšinou v negativní souvislosti s havárií na jaderném zařízení, ale že je běžnou součástí života kolem nás a není to tedy jev, kterého se musí obávat, ale naprosto přirozená součást života.

Pomůcky:

Psací potřeby, programovatelná kalkulačka, čistý papír, pracovní list „Úloha č. 3 – Výpočet aktivity radioizotopu“

Čas pro vypracování:

25 minut

Zadání:

Aktivita je veličina, která vyjadřuje počet jaderných rozpadů za jednotku času (1 sec) pro daný radionuklid. Je to indikátor rychlosti radioaktivní přeměny. Obecně platí, že čím je aktivita vyšší, tím je poločas rozpadu měřeného izotopu nižší. Aktivita nijak neurčuje charakter radioaktivní přeměny, pouze ji kvantifikuje.

Na dětském hřišti byl nalezen váleček, který obsahuje radioaktivní jód ^{131}I o hmotnosti 234 mg. vypočtete aktivitu nalezeného předmětu.

1) spočtete rozpadovou konstantu pro ^{131}I dle vzorce

kde:

λ = rozpadová konstanta [s^{-1}]

$\ln 2 = 0,693$

$T_{1/2}$ = poločas rozpadu, který pro jód ^{131}I činí 8 dní, pro výpočet rozpadové konstanty je potřeba převést poločas rozpadu na sekundy

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$$

2) spočtete počet atomů jódu dle vzorce

kde:

n = počet atomů jódu ^{131}I

m = hmotnost jódu

M_m = molární hmotnost $^{131}\text{I} = 131 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$

N_A = Avogadrova konstanta = $6,022 \times 10^{23}$

$$n = \frac{m}{M_m} \times N_A$$

3) získané výsledky dosadíte do vzorce pro výpočet aktivity

kde:

A = aktivita [Bq]

λ = rozpadová konstanta [s^{-1}]

n = počet atomů ^{131}I

$$A = \lambda \times n$$

4) výslednou aktivitu uveďte v jednotkách becquerel [Bq] a gigabecquerel [GBq], konečný výsledek zaokrouhlete na 2 desetinná místa

Řešení:

Na dětském hřišti byl nalezen váleček, který obsahuje radioaktivní jód ^{131}I o hmotnosti 234 mg. vypočítejte aktivitu nalezeného předmětu.

Výpočet:

1) spočtete rozpadovou konstantu pro ^{131}I dle vzorce

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$$

kde:

λ = rozpadová konstanta [s^{-1}]

$\ln 2 = 0,693$

$T_{1/2}$ = poločas rozpadu, který pro jód ^{131}I činí 8 dní, pro výpočet rozpadové konstanty je potřeba převést poločas rozpadu na sekundy

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = \frac{0,693}{8 \times 24 \times 3600} = \frac{0,693}{691200} = 1,0026 \times 10^{-6} = 0,0000010026$$

$$\lambda = 0,0000010026$$

2) spočtete počet atomů jódu ^{131}I dle vzorce

$$n = \frac{m}{M_m} \times N_A$$

kde:

n = počet atomů jódu ^{131}I

m = hmotnost jódu

M_m = molární hmotnost $^{131}\text{I} = 131 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$

N_A = Avogadrova konstanta = $6,022 \times 10^{23}$

$$n = \frac{0,234}{131} \times 6,022 \times 10^{23} = 0,00178625954 \times 6,022 \times 10^{23} = 1,07568549488 \times 10^{21}$$

3) získané výsledky dosadíte do vzorce pro výpočet aktivity

kde:

A = aktivita [Bq]

λ = rozpadová konstanta [s^{-1}]

n = počet atomů ^{131}I

$$A = \lambda \times n$$

$$A_{^{131}\text{I}} = 0,0000010026 \times 1,07568549488 \times 10^{21} = 1,07848227727497 \times 10^{15}$$

- 4) výslednou aktivitu uveďte v jednotkách becquerel [Bq] a gigabecquerel [GBq], konečný výsledek zaokrouhlete na 2 desetinná místa

$$A_{131I} = 1,07848227727497 \times 10^{15} = 1078482277274970,00 \text{ Bq} = 1078482,28 \text{ GBq}$$

VÝSLEDNÁ AKTIVITA [Bq]	1078482277274970,00
VÝSLEDNÁ AKTIVITA [GBq]	1078482,28

Úloha č. 4

Stanovení dávkového příkonu záření

Cílem tohoto cvičení je seznámit žáka s praktickým dozimetrickým měřením radiace v terénu. Žák má za úkol zkoumaný objekt proměřit a naměřená data interpretovat dle zadání. Dle konkrétního typu dozimetru je nutno vysvětlit studentům správné zacházení s přístrojem. Vypracování této úlohy je časově náročnější, je tedy vhodné toto cvičení realizovat ve dvou spojených vyučovacích hodinách. Oproti předchozím úlohám je toto praktikum koncipováno pro tři až čtyř člennou skupinu žáků s tím, že organizaci práce při řešení úlohy si členové skupiny provádí sami dle svého uvážení.

Pomůcky:

Psací potřeby, mikrotužka, pravítko, čistý list papíru, kalkulačka, dozimetr, 1ks balení běžného draselného hnojiva nebo cca 1 kg K₂SO₄, pracovní list „Úloha č. 4 – Stanovení dávkového příkonu záření“

Čas pro vypracování:

70 - 80 minut

Zadání:

Radioaktivitu lze definovat jako lidským okem neviditelný tok ionizujících částic. Toto záření se vyskytuje všude kolem nás a je důsledkem přirozeného rozpadu radioaktivních prvků obsažených v horninách a minerálech. Tvoří tak přirozenou součást našeho životního prostředí a provází nás po celý život. Toto přirozené radioaktivní záření označujeme jako radioaktivní pozadí. Jsou však běžně používané zdroje, které nad toto přirozené pozadí vystupují. Vaším úkolem v této úloze bude změřit takový zdroj radiace a určit jeho velikost oproti přirozenému pozadí. Dále bude vaším úkolem zjistit, jaký izotop je původcem této radiace.

- 1) Pomocí dozimetru (přístroj na měření dávky radiace) změřte úroveň přirozeného pozadí (libovolné místo na otevřeném prostranství) a to 10x opakovaně na stejném místě. Ze souboru naměřených hodnot vypočítejte průměrnou hodnotu úrovně radiace v $\mu\text{Sv/hod.}$ a zanepte do tabulky č. 1

Tabulka č.1

MĚŘENÍ	NAMĚŘENÉ HODNOTY POZADÍ [$\mu\text{Sv/hod.}$]	NAMĚŘENÉ HODNOTY ZKOUMANÉHO OBJEKTU[$\mu\text{Sv/hod.}$]
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
PRŮMĚRNÁ HODNOTA		

- 2) Pomocí dozimetru změřte zkoumaný objekt a to 10x opakovaně na stejném místě. Ze souboru naměřených hodnot vypočtete průměrnou hodnotu radiace předmětu a zaneste do tabulky č.1.
- 3) Naměřené hodnoty přirozeného pozadí a zkoumaného objektu zaneste do grafu tak, že na ose X bude uvedeno pořadové číslo měření, na ose Y pak naměřené hodnoty v $\mu\text{Sv/hod.}$
- 4) Od naměřeného průměru hodnot odečtete zjištěnou průměrnou hodnotu přirozeného pozadí a spočtete příspěvek dávkového příkonu v $\mu\text{Sv/hod.}$ na povrchu zkoumaného objektu a doplňte do tabulky č.2.
- 5) Jaký přírodní izotop způsobuje zvýšenou radioaktivitu zkoumaného objektu? Doplňte do tabulky č.2.
- 6) Je naměřená hodnota radiace nadlimitní (hygienický limit je dle Vyhlášky SÚJB č. 307/2002 Sb. je pro člověka 1 mSv/rok)?
- 7) Jak dlouho by člověk musel být vystaven vámi změřenému zdroji radiace, aby dosáhl ročního hygienického limitu?
- 8) Výsledky praktického cvičení diskutujte s ostatními skupinami a výsledky porovnejte.

Tabulka č.2

DÁVKOVÝ PŘÍKON ZKOUMANÉHO OBJEKTU [$\mu\text{Sv/hod}$]	
IDENTIFIKOVANÝ IZOTOP	

Řešení:

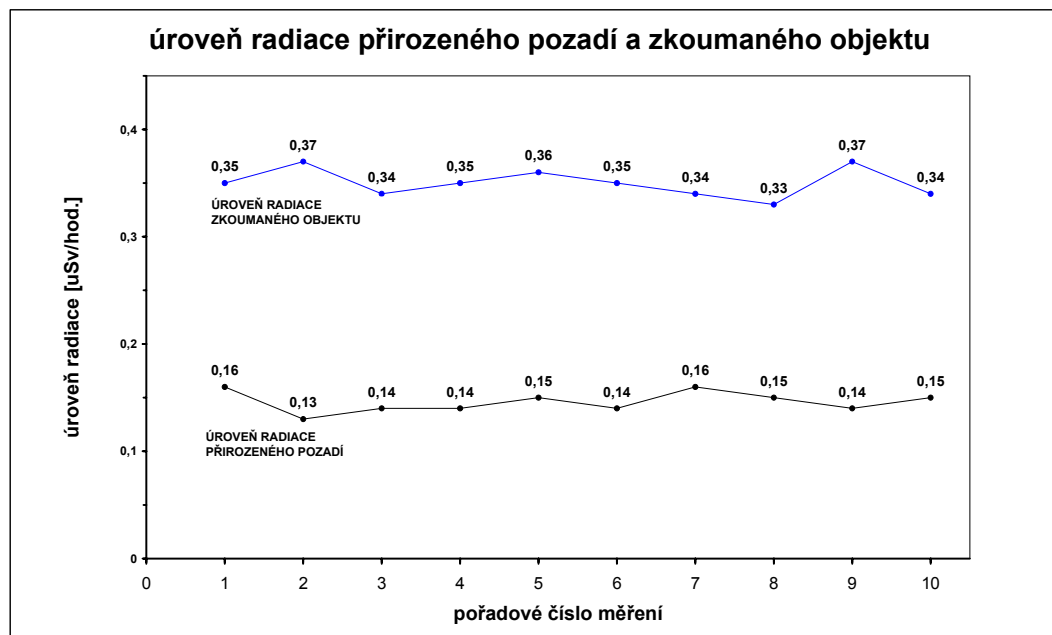
- 1) Pomocí dozimetru (přístroj na měření dávky radiace) změřte úroveň přirozeného pozadí (libovolné místo na otevřeném prostranství) a to 10x opakovaně na stejném místě. Ze souboru naměřených hodnot vypočtete průměrnou hodnotu úrovně radiace v $\mu\text{Sv/hod.}$ a zaneste do tabulky č. 1

Tabulka č.1

MĚŘENÍ	NAMĚŘENÉ HODNOTY POZADÍ [$\mu\text{Sv/hod.}$]	NAMĚŘENÉ HODNOTY ZKOUMANÉHO OBJEKTU[$\mu\text{Sv/hod.}$]
1	0,16	0,35
2	0,13	0,37
3	0,14	0,34
4	0,14	0,35
5	0,15	0,36
6	0,14	0,35
7	0,16	0,34
8	0,15	0,33
9	0,14	0,37
10	0,15	0,34
PRŮMĚRNÁ HODNOTA	0,146	0,35

- 2) Pomocí dozimetru změřte zkoumaný objekt a to 10x opakovaně na stejném místě. Ze souboru naměřených hodnot vypočtete průměrnou hodnotu radiace předmětu a zaneste do tabulky č.1.
- 3) Naměřené hodnoty přirozeného pozadí a zkoumaného objektu vyneste do grafu tak, že na ose X bude uvedeno pořadové číslo měření, na ose Y pak naměřené hodnoty v $\mu\text{Sv/hod.}$

Graf č.1



- 4) Od naměřeného průměru hodnot odečtete zjištěnou průměrnou hodnotu přirozeného pozadí a spočtete příspěvek dávkového příkonu v $\mu\text{Sv/hod.}$ na povrchu zkoumaného objektu a doplňte do tabulky č.2.
- 5) Jaký přírodní izotop způsobuje zvýšenou radioaktivitu zkoumaného objektu? Doplňte do tabulky č.2.

- 6) Je naměřená hodnota radiace nadlimitní (hygienický limit je dle Vyhlášky SÚJB č. 307/2002 Sb. je pro člověka 1 mSv/rok)?
- 7) Jak dlouho by člověk musel být vystaven vámi změřenému zdroji radiace, aby dosáhl ročního hygienického limitu?
- 8) Výsledky praktického cvičení diskutujte s ostatními skupinami a výsledky porovnejte.

Tabulka č.2

DÁVKOVÝ PŘÍKON ZKOUMANÉHO OBJEKTU [μSv/hod]	0,204
IDENTIFIKOVANÝ IZOTOP	^{40}K

Příloha č. II:

PRAKTICKÁ CVIČENÍ – PRACOVNÍ LISTY

Úloha č. 1

Radioaktivní přeměny

V přírodě dochází ke čtyřem základním radioaktivním přeměnám (alfa - α , beta - β^- , beta - β^+ a elektronový záchyt – EC), při kterých dochází k zániku nestabilního prvku a ke vzniku prvku nového, zpravidla stabilního. Cílem tohoto cvičení je seznámení se s těmito přeměnami a pochopení principu těchto přeměn. Pomocí periodické tabulky prvků zjistěte protonové číslo Z prvků v zadání a vypočtete příslušné jaderné přeměny.

Zadání:

1) Přeměna alfa

K přeměně α dochází převážně u přirozených i umělých radionuklidů těžších prvků, v jejichž jádrech se projevuje silné odpuzování protonů. Probíhá u všech přirozených rozpadových řad.

Při této přeměně emituje jádro rozpadajícího se radionuklidu kladně nabitou částici α , obsahující dva protony a dva neutrony, která odpovídá kladně nabitému jádru helia.

Dle této obecné rovnice pro přeměnu alfa

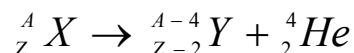
kde:

A = hmotnostní číslo

Z = protonové číslo

X = mateřský izotop

Y = dceřiný izotop



zapište rovnice pro přeměny těchto mateřských radionuklidů: a) ${}^{226}_{88} Ra$, b) ${}^{219}_{86} Rn$, c) ${}^{214}_{84} Po$

2) Přeměna β^-

Přeměna β^- vzniká rozpadem neutronu na proton a elektron. Tento elektron je potom emitován jádrem do okolí. Vznikem protonu dochází k posunu prvku v periodické tabulce směrem doprava. Nově vzniklý prvek má protonové číslo o 1 vyšší.

Dle této obecné rovnice pro přeměnu β^-

kde:

A = hmotnostní číslo

Z = protonové číslo

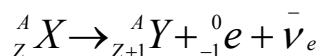
X = mateřský izotop

Y = dceřiný izotop

e = elektron

ν_e = elektronové antineutrino

zapište rovnice pro přeměny těchto mateřských radionuklidů: a) ^{32}P , b) ^{35}Cl , c) ^{76}As



3) Přeměna β^+

Při tomto rozpadu se mění proton v neutron. Dochází k tomu tak, že spontánní přeměnou protonu na neutron vznikne kladně nabitý elektron, tzv. **pozitron e^+ (částice β^+)**. Tato reakce je doprovázena emisí tohoto pozitronu β^+ , zatímco vzniklý neutron n^0 zůstává součástí jádra. Prvek se v periodické tabulce posouvá o jednu pozici vlevo, avšak hmotnostní číslo se nemění. Výskyt tohoto typu přeměny v přírodě je zanedbatelný a vyskytuje se u prvků, které mají vyšší počet protonů a nedostatek neutronů (neutron-deficitní jádra).

Dle této obecné rovnice pro přeměnu β^+

kde:

A = hmotnostní číslo

Z = protonové číslo

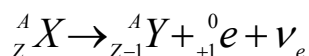
X = mateřský izotop

Y = dceřiný izotop

e^+ = pozitron

ν_e = elektronové neutrino

zapište rovnice pro přeměny těchto mateřských radionuklidů: a) ^{103}Sn , b) ^{49}Cr , c) ^{30}P



4) Elektronový záchyt (EC)

Při tomto typu přeměny dochází k přeměně protonu na neutron, avšak mechanismus přeměny je v tomto případě odlišný. Při této přeměně, rozdílně od β^+ , nedochází ke spontánnímu rozpadu protonu, ale k zachycení elektronu jádrem. Reakcí tohoto elektronu s protonem dojde ke vzniku neutronu za současné emise rentgenového záření.

Dle této obecné rovnice pro elektronový záchyt

kde:

A = hmotnostní číslo

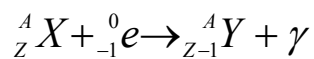
Z = protonové číslo

X = mateřský izotop

Y = dceřiný izotop

e = elektron

γ = emise záření gama



zapište rovnice pro přeměny těchto mateřských radionuklidů: a) ${}^{125}\text{I}$, b) ${}^{110}\text{In}$, c) ${}^{180}\text{W}$

Úloha č. 2

Datování pomocí radiometrických metod

Pro datování stáří různých materiálů na principu radioaktivních nerovnováh se v obecné rovině využívá principu rozdílných poměrů aktivit mateřských a dceřiných radionuklidů nebo úbytek mateřských radionuklidů a hromadění dceřiných produktů. Vhodnost dané metody datování je určována mnoha faktory, které jsou pro výběr klíčové. Je-li správně vybrána metoda pro datování zkoumaného materiálu, je i chyba datování nižší a výsledek pak přesnější. Naopak, zcela nevhodný výběr metody vede k nepřesnému výsledku nebo nelze získat žádná relevantní data. Naprosto základní podmínkou však je obsah některého radionuklidu v datovaném materiálu. Cílem této úlohy je vybrat z nabízených možností vhodnou metodu datování pro různé materiály, jež máte za úkol zkoumat.

Zadání:

V tabulce č. 1 jsou uvedeny metody datování na principu nerovnovážených aktivit izotopových párů s jejich časovým rozsahem použitelnosti. Tento časový rozsah je vyjádřen jako maximální interval použití dané metody pro konkrétní materiál, jež má být zkoumán.

- 1) Pokuste se logickou úvahou přiřadit vhodné metody datování k materiálům s odhadnutým stářím uvedených v tabulce č. 2.
- 2) Vybrané metody přiřazené k danému materiálu zapište do tabulky č. 3.
- 3) Pokud vyhovuje datovanému materiálu více metod, uveďte je.
- 4) Pro určení přibližného stáří datovaných materiálů použijte stratigrafickou tabulku, jež na časové škále vyjadřuje jednotlivé časové úseky vývoje naší planety a takto určené přibližné stáří zapište do tabulky č.3.

Nápověda:

Nejlépeších výsledků datování se docílí, je-li zvolena metoda, jejíž střední interval rozsahu použitelnosti se blíží předpokládanému stáří zkoumaného materiálu. Horní hranice použitelnosti metody je obecně vymezena dosažením rovnováhy aktivit měřených izotopových párů.

Tabulka č.1

METODA	POLOČAS ROZPADU MATEŘSKÉHO IZOTOPU	ČASOVÝ ROZSAH METODY
^{14}C	5 730 let	1 000 – 50 000 let
$^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$	4,510 mld. let	pro materiály starší než 20 mil. let
$^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$	47 mld. let	pro materiály starší než 10 mil. let
$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	1,300 mld. let	pro materiály starší než 100 tis. let
$^{235}\text{U}/^{207}\text{Pb}$	713 mil. let	pro materiály starší než 20 mil. let
$^{232}\text{Th}/^{208}\text{Pb}$	13,960 mld. let	pro materiály starší než 50 tis. let

Tabulka č. 2

MATERIÁL KE ZKOUMÁNÍ
dřevěné topůrko – archeologický nález (holocén)
prvohorní (paleozoická) vyvřelina s obsahem ^{238}U , ^{235}U , ^{234}U , ^{232}Th , ^{230}Th , ^{226}Ra , ^{210}Po , ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb (ordovik x silur)
vápencový krasový sediment (pleistocén x holocén)
tercierní vulkanit s obsahem ^{40}K , ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th , ^{207}Pb , ^{208}Pb , ^{206}Pb (miocén)
vyvřelá hornina archaického stáří s obsahem ^{40}K , ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th , ^{87}Rb , ^{87}Sr , ^{226}Ra , ^{207}Pb , ^{208}Pb , ^{206}Pb (archaikum x proterozoikum)

Tabulka č. 3

DATOVANÝ MATERIÁL	ODHAD STÁŘÍ DLE STRATIGRAFICKÉ TABULKY	VYBRANÉ METODY DATOVÁNÍ

Úloha č. 3

Výpočet aktivity radioizotopu

Aktivita je veličina, která vyjadřuje počet jaderných rozpadů za jednotku času (1 sec) pro daný radionuklid. Je to indikátor rychlosti radioaktivní přeměny. Obecně platí, že čím je aktivita vyšší, tím je poločas rozpadu měřeného izotopu nižší. Aktivita nijak neurčuje charakter radioaktivní přeměny, pouze udává její intenzitu.

Zadání:

Na dětském hřišti byl nalezen váleček, který obsahuje radioaktivní jód ^{131}I o hmotnosti 234 mg. vypočítejte aktivitu nalezeného předmětu.

Postup výpočtu:

- 1) spočítejte rozpadovou konstantu pro ^{131}I dle vzorce

kde:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$$

λ = rozpadová konstanta [s^{-1}]

$\ln 2 = 0,693$

$T_{1/2}$ = poločas rozpadu, který pro jód ^{131}I činí 8 dní, pro výpočet rozpadové konstanty je potřeba převést poločas rozpadu na sekundy

- 2) spočítejte počet atomů jódu dle vzorce

$$n = \frac{m}{M_m} \times N_A$$

kde:

n = počet atomů jódu ^{131}I

m = hmotnost jódu

M_m = molární hmotnost $^{131}\text{I} = 131 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$

N_A = Avogadrova konstanta = $6,022 \times 10^{23}$

- 3) získané výsledky dosadíte do vzorce pro výpočet aktivity $A = \lambda \times n$

kde:

A = aktivita [Bq]

λ = rozpadová konstanta [s^{-1}]

n = počet atomů ^{131}I

- 4) výslednou aktivitu uveďte v jednotkách becquerel [Bq] a gigabecquerel [GBq], konečný výsledek zaokrouhlete na 2 desetinná místa

VÝSLEDNÁ AKTIVITA [Bq]	
VÝSLEDNÁ AKTIVITA [GBq]	

Úloha č. 4

Stanovení dávkového příkonu záření

Radioaktivitu lze definovat jako lidským okem neviditelný tok ionizujících částic. Toto záření se vyskytuje všude kolem nás a je důsledkem přirozeného rozpadu radioaktivních prvků obsažených v horninách a minerálech. Tvoří tak přirozenou součást našeho životního prostředí a provází nás po celý život. Toto přirozené radioaktivní záření označujeme jako radioaktivní pozadí. Jsou však běžně používané zdroje, které nad toto přirozené pozadí vystupují. Vaším úkolem v této úloze bude změřit takový zdroj radiace a určit jeho velikost oproti přirozenému pozadí. Dále bude vaším úkolem zjistit, jaký izotop je původcem této radiace.

Zadání:

- 1) Pomocí dozimetru (přístroj na měření dávky radiace) změřte úroveň přirozeného pozadí (libovolné místo na otevřeném prostranství) a to 10x opakovaně na stejném místě. Ze souboru naměřených hodnot vypočtete průměrnou hodnotu úrovně radiace v $\mu\text{Sv/hod.}$ a zanešte do tabulky č. 1

Tabulka č.1

MĚŘENÍ	NAMĚŘENÉ HODNOTY POZADÍ [$\mu\text{Sv/hod.}$]	NAMĚŘENÉ HODNOTY ZKOUMANÉHO OBJEKTU[$\mu\text{Sv/hod.}$]
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
PRŮMĚRNÁ HODNOTA		

- 2) Pomocí dozimetru změřte zkoumaný objekt a to 10x opakovaně na stejném místě. Ze souboru naměřených hodnot vypočtete průměrnou hodnotu radiace předmětu a zanešte do tabulky č.1.
- 3) Naměřené hodnoty přirozeného pozadí a zkoumaného objektu zanešte do grafu tak, že na ose X bude uvedeno pořadové číslo měření, na ose Y pak naměřené hodnoty v $\mu\text{Sv/hod.}$

Graf č.1



- 4) Od naměřeného průměru hodnot odečtete zjištěnou průměrnou hodnotu přirozeného pozadí a spočtete příspěvek dávkového příkonu v $\mu\text{Sv/hod.}$ na povrchu zkoumaného objektu a doplňte do tabulky č.2.
- 5) Jaký přírodní izotop způsobuje zvýšenou radioaktivitu zkoumaného objektu? Doplňte do tabulky č.2.
- 6) Je naměřená hodnota radiace nadlimitní (hygienický limit je dle Vyhlášky SÚJB č. 307/2002 Sb. je pro člověka 1 mSv/rok)?
- 7) Jak dlouho by člověk musel být vystaven vámi změřenému zdroji radiace, aby dosáhl ročního hygienického limitu?
- 8) Výsledky praktického cvičení diskutujte s ostatními skupinami a výsledky porovnejte.

Tabulka č.2

DÁVKOVÝ PŘÍKON ZKOUMANÉHO OBJEKTU [$\mu\text{Sv/hod}$]	
IDENTIFIKOVANÝ IZOTOP	