

Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta
Ústav geochemie, mineralogie a nerostných zdrojů



Radioaktivita v přírodních systémech

Habilitační práce

Viktor Goliáš

Praha, červen 2022

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval *in memoriam* mým velkým učitelům a to zejména nedávno zesnulému doc. RNDr. Pavlu Kašparovi, CSc., (1943 – 2021), který mě naučil vnímat krásu mineralogie i odlesků rudních minerálů v zorném poli mikroskopu, a také ing. Oskaru Pluskalovi, CSc., (1932 – 2009), který mne zasvětil do tajů geologie ložisek uranu a podporoval mne v mém nadšení pro uran a radioaktivitu a byl mi velmi příjemným společníkem při nejen odborných diskusích. Rád bych také velmi poděkoval nestorovi radiometrické geofyziky, prof. Milanu Matolínovi, který mne naučil mnoho užitečných věcí v oboru radiometrických metod a možností jejich aplikace v geologii. Můj velký dík patří také všem milým kolegům nejen z geologických oborů Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy, s nimiž mi bylo a je čest a potěšení setrvat v odborné spolupráci i sdílet příjemnou a inspirativní atmosféru našeho vědeckého pracoviště. Děkuji i všem studentům a příznivcům za nezištnou spolupráci v terénu i v laboratořích. Děkuji s láskou i svojí ženě Lucii, že mne trpělivě doprovází na mé životní cestě.

Seznam zkratek

AMS – urychlovačová hmotnostní spektrometrie

AV ČR – Akademie Věd České republiky

BSE – back scattered electrons, obraz odražených elektronů

ČMI – Český metrologický institut

GS – gama spektrometrie (terénní či laboratorní)

EM – elektronová mikroskopie

F-AAS – plamenová atomová sbsorbční spektrometrie

HRTEM – SAED – high resolution transmission electron microscopy (vysoce rozlišující transmisní elektronová mikroskopie) – small area electron diffraction (elektronová difrakce z malé plochy)

IAEA – Mezinárodní atomová agentura ve Vídni

ICP-MS – hmotnostní spektrometrie (nejč. kvadrupólová konfigurace spektrometru) s indukčně vázaným plazmatem

PřF MU – Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity, Brno

PřF UK – Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy, Praha

PXRD – prášková rentgenová difrakce

SIMS – secondary ion mass spectrometry (hmotnostní spektrometrie sekundárně vybuzených iontů)

UJV – Ústav jaderného výzkumu v Řeži

VDV – geofyzikální metoda velmi dlouhých vln

WDS – vlnově disperzní analýza

Seznam příloh (u publikací uváděn IF v roce 2020)

Příloha 1

Škácha P., **Goliáš V.**, Sejkora J., Plášil J., Strnad L., Škoda R., Ježek J. (2009): Hydrothermal uranium-base metal mineralization of the Jánská vein, Březové Hory, Příbram, Czech Republic: lead isotopes and chemical dating of uraninite. *Journal of Geosciences* 54, 1-13. <http://doi.org/10.3190/jgeosci.030> (IF = 1,525)

Příloha 2

Plášil J., Čejka J., Sejkora J., Škácha P., **Goliáš V.**, Jarka P., Laufek F., Jehlička J., Němec I., Strnad L. (2010): Widenmannite, a rare uranyl lead carbonate: occurrence, formation and characterization. *Mineralogical Magazine* 74, 1. 97-110. <https://doi.org/10.1180/minmag.2010.074.1.97> (IF = 2,062)

Příloha 3

Čurda M., **Goliáš V.**, Klementová M., Strnad L., Matěj Z., Škoda R. (2017): Radiation damage in sulfides: Radioactive galena from burning heaps, after coal mining in the Lower Silesian basin (Czech Republic). *American Mineralogist* 102, 1788-1795. <https://doi.org/10.2138/am-2017-6036> (IF = 3,003)

Příloha 4

Procházka R., **Goliáš V.**, Hlásenský I., Strnad L., Lněničková J. (2002): Natural corrosion of old potash glass coloured with uranium compounds. *Ceramics-Silikáty* 46(3). 86-96. https://www.ceramics-silikaty.cz/2002/2002_03_086.htm (IF = 0,940)

Příloha 5

Procházka R., Ettler V., **Goliáš V.**, Klementová M., Mihaljevič M., Šebek O., Strnad L. (2009): A comparison of natural and experimental long-term corrosion of uranium-colored glass. *Journal of Non-Crystalline Solids* 355(43-44). 2134-2142. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2009.06.032> (IF = 3,531)

Příloha 6

Hamrová E., **Goliáš V.**, Petrusek A. (2010): Identifying century-old long-spined Daphnia: species replacement in a mountain lake characterised by paleogenetic methods. *Hydrobiologia* 643. 97-106. <https://doi.org/10.1007/s10750-010-0127-9> (IF = 2,694)

Příloha 7

Šamonil P., Schaerzl R.J., Valtera M., **Goliáš V.**, Baldrian P., Vašíčková I., Adam D., Janík D., Hort L. (2013): Crossdating of disturbances by tree uprooting: Can treethrow microtopography persist for 6000 years? *Forest Ecology and Management* 307, 123-135. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.06.045> (IF = 3,558)

Příloha 8

Goliáš V., Jašková V., Melichar R., Štorch P., Prokop R., Budil P., Kraft P., Marek J., Holub F.V., Mikuláš R. (2011): Výchoz silurských hornin v Repešském žlebu na Stínavě, Dražanská vrchovina, Morava. *Přírodovědné Studia Muzea (Prostějov)* 12-13, 7-21. <https://www.researchgate.net/publication/361217751> (tuzemský recenzovaný)

Příloha 9

Goliáš V., Tumurkhuu G., Kohn P., Šálek O., Plášil J., Škoda R., Soumar J. (2016): Construction of new houses on a uranium vein outcrop: a case study from the Czech Republic. *Nukleonika* 61(3). 343-349. <http://dx.doi.org/10.1515/nuka-2016-0057> (IF = 0,941)

Příloha 10

Goliáš V., Pittauerová D., Procházka R., Třískala Z. (2005): Field alpha-spectroscopy of radon (^{222}Rn) and actinon (^{219}Rn) progeny in soil gas: Locating a radon source. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 266. 461-470. <https://doi.org/10.1007/s10967-005-0932-1> (IF = 1,371)

Příloha 11

Goliáš V., Hrušková L., Lipanský T., Černík T., Kohn P., Ježek J., Procházka R., Przylibski T.A., Dohnal J., Strnad L., Kowalska A., Fialkowska-Lichwa L., Miśta W., Nowakowski R. (2022): Exploration and investigation of high-level radon medicinal springs in the crystalline units: Lugicum. *Water* 14(2), 200. <https://doi.org/10.3390/w14020200> (IF = 3,103)

Obsah

1 Úvod	1
2 Radioaktivita minerálů.....	2
2.1 Izotopické datování $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ uraninitu z Jánské žíly (Příbram, Březové Hory)	2
2.2 Widenmannit – sekundární minerál uranu a olova	3
2.3 Radioaktivní galenit z hořících hald	5
3 Uranem barvená skla a glazury	7
4 Datování sedimentárních profilů metodou ^{210}Pb	9
5 Radon v půdním vzduchu	11
5.1 Stínavský silur	11
5.2 Kokonínská uranová žíla	14
5.3 Izotopické stáří radonu	15
6 Radioaktivita minerálních vod	16
7 Diskuse a další perspektivy	18
8 Literatura	21

1 Úvod

Radioaktivita je jev, který doprovází samovolnou přeměnu atomového jádra a projevuje se emisí různých typů hmotných částic a fotonů. O chemických prvcích, které obsahují radioaktivní atomy říkáme, že jsou to prvky radioaktivní. V přírodě se setkáváme nejčastěji s radioaktivními prvky primordiálními (vzniklymi při nukleogenezi v supernovách 2. či 3. generace nebo v neutronových hvězdách) s dlouhými poločasy, kterými jsou uran, thorium a členy jejich rozpadových řad, izotop draslíku 40, vzácněji izotop rubidia 87, izotop rhenia 187 a další vzácnější radioaktivní izotopy. Druhou skupinou jsou kosmogenní radionuklidy, z nich neznámější jsou tritium (^3H) a izotop uhlíku ^{14}C , vznikající neustále jadernými reakcemi v atmosféře při interakci s tvrdým kosmickým zářením. Třetí skupinou jsou pak radioaktivní prvky antropogenního původu, které byly uvolněny při použití jaderných zbraní, nebo při jaderných haváriích, označované jako radionuklidy jaderného spadu. V této skupině najdeme jak štěpné produkty, z nichž nejznámější jsou izotop stroncia 90, jód 131 a cesium 137, tak těžké prvky ležící „za uranem“, zvané transurany, z nichž jsou v přírodních materiálech (mladších sedimentech) detekovatelné izotopy plutonia a americium 241. Můžeme říci, že do určité míry je radioaktivní úplně vše. Vzduch, voda, rostliny, živočichové i lidské tělo (v tomto případě jsou dominantními zářící izotopy ^{40}K a ^{14}C). Nejvyšší radioaktivitu z přírodních složek pak mají materiály zemské kůry, tedy horniny a minerály.

Na půdě Přírodovědecké fakulty UK jsou v rámci geologických oborů radioaktivita a radioaktivní geomateriály studovány tradičně. Již historicky byli přírodovědci uchvázeni krásou a barevností minerálů uranů. Jejich mikrochemickému výzkumu se intenzívně věnoval mineralog doc. Radim Nováček (1905 – 1942), popravený za svoji odbojovou činnost nacisty v Mauthausenu. Procesy metamiktizace (destrukce krystalové struktury ionizujícím zářením) se zabýval mineralog a jeden ze zakladatelů oboru geochemie prof. Vladimír Bouška (1933 – 2000). Obor ložisek radioaktivních surovin zde rozvíjel ing. Oskar Pluskal (1932 – 2009), který stál i u zrodu naší výzkumné skupiny. Téma radioaktivity bylo využito také v oborech aplikovaných. Datováním podzemních vod se začal zabývat hydrogeolog prof. Jan Šilar (1921 – 2007), který založil laboratoř pro měření ^{14}C . V jeho odkazu dnes pokračuje hydrogeolog doc. Jiří Bruthans (*1976), který laboratoř modernizoval pro měření ^3H i ^{14}C . Velkou osobností a žijícím nestorem je pak geofyzik prof. Milan Matolín (*1932), významný vědec a pedagog i expert IAEA, který zde založil a úspěšně rozvinul obor radiometrických metod a vychoval celou řadu specialistů v tomto oboru.

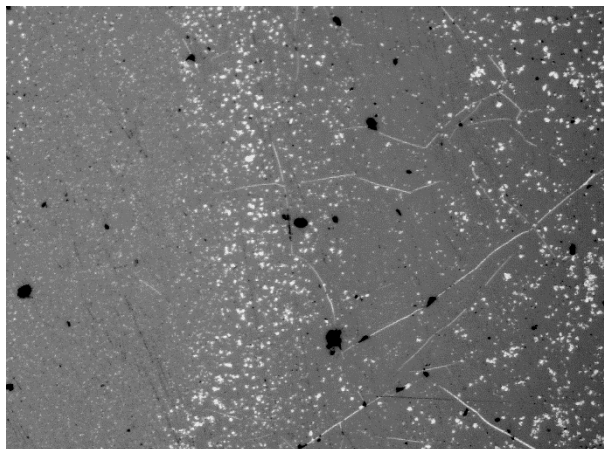
Hlavním přínosem radioaktivity a radioaktivních prvků pro geologické obory je možnost studia přírodních geologických procesů, které ovlivňují dynamiku pohybu radionuklidů. V konkrétních minerálních fázích koncentrují radioaktivní prvky, umožňují rozvoj radioaktivní rovnováhy či radioaktivní nerovnováhu způsobují a tímto způsobem umožňují nasazení různých datovacích metod. Z jiného pohledu pak radioaktivní prvky umožňují lokalizaci a vizualizaci geologických fenoménů (akumulaci radioaktivních prvků, zdrojů radioaktivních vod, výchozů hornin či jejich rozhraní). Z hlediska metodických přístupů pak vedou k úvahám o možnostech aplikace a nasazení či konstrukci terénních i laboratorních aparatur, často velmi flexibilních a přizpůsobených konkrétní úloze i aplikaci krásného matematického či statistického vyhodnocení.

V rámci naší výzkumné skupiny, působící na Ústavu geochemie, mineralogie a nerostných zdrojů PŘF UK byla řešena řada témat souvisejících s radioaktivitou přírodních systémů. Tato habilitační práce je členěna do několika okruhů s přiloženými publikacemi: Jsou to radioaktivita minerálů (Přílohy 1 – 3), uranem barvená skla (Přílohy 4, 5), datování sedimentů metodou ^{210}Pb (Přílohy 6, 7), radon v půdním vzduchu (Přílohy 8 – 10) a radioaktivita minerálních vod (Příloha 11). Jednotlivá témata jsou ve zkrácené podobě představena ve formě hlavních zjištění a myšlenek a je zdůrazněn jejich příspěvek k posunu oboru i širšímu vědeckému poznání.

2 Radioaktivita minerálů

2.1 Izotopické datování $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ uraninitu z Jánské žíly (Příbram, Březové Hory)

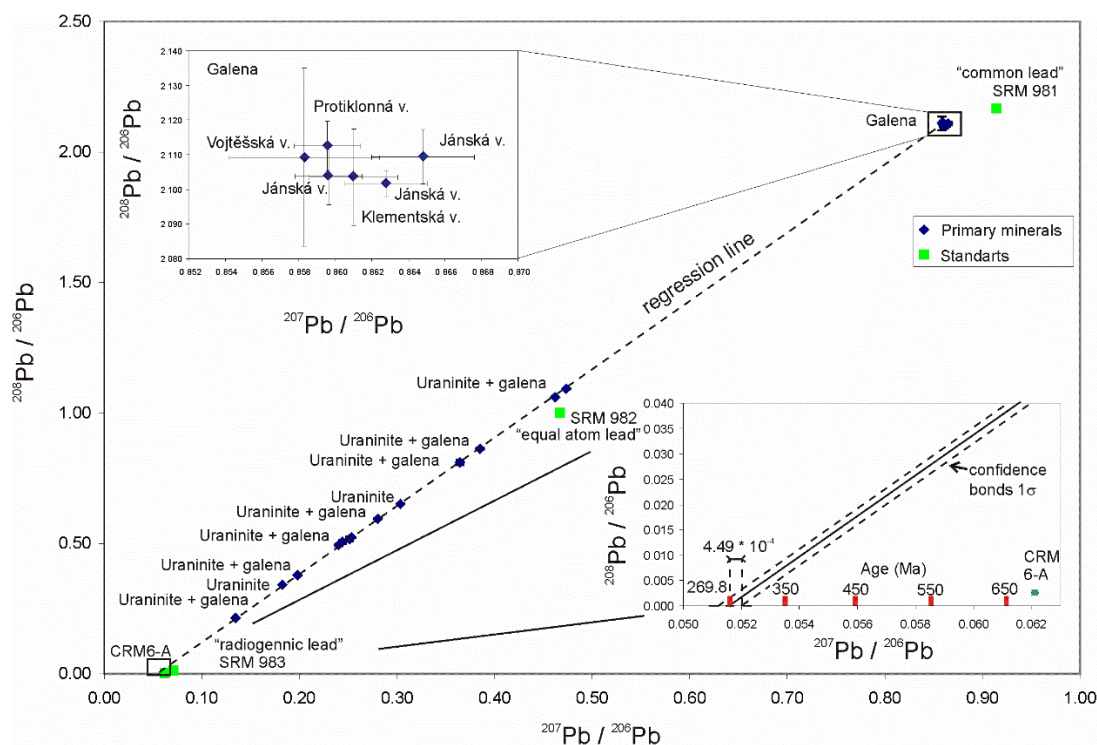
Primární mineralizace Jánské žíly, jedné z významných žil březohorského rudního revíru, nesoucí uran-polymetalickou mineralizaci byla studována ve spolupráci se studentem Pavlem Škáchou (dnes mineralog v Národní muzeu a Hornickém muzeu v Příbrami) ve formě jeho diplomové práce (Škácha 2007), která byla po doplnění publikována (Škácha et al. 2009, Příloha 1).



Obr. 1. Uraninit s inkluzemi a žilkami galenitu (světlý) z Jánské žíly, Příbram – Březové Hory. Obraz BSE, FOV 1,2 mm, Foto J. Sejkora a P. Škácha. Převzato ze Škáchy et al. (2009). Příloha 1.

Datování U/Pb je velmi oblíbené u mnoha skupin minerálů, který uran či thorium alespoň stopově obsahují. Nejčastěji se používají metoda izochrony nebo Tera-Wasserburgova projekce, (např. Roberts et al. 2020), izotopy uranu však v našem případě nebyly měřeny.

Pro datování pouze izotopy olova je nutné stanovení neradiogenního ^{204}Pb , který slouží pro normalizaci izotopických poměrů (např. Ehrling et al. 2021). V rámci výzkumu bylo získáno množství izotopických dat olova v uraninitu i galenitu měřených kvadrupólovým ICP-MS, který neumožňuje měřit ^{204}Pb s odpovídající přesností (analytik Ladislav Strnad, PŘF UK). Z výsledků vyplývalo, že galenit obsahuje poměrně velký podíl ^{208}Pb , koncového členu rozpadové řady ^{232}Th , které hydrotermální uraninity (var. smolinec) neobsahují. Bylo jasné, že tento izotop je příměsí olova, nepocházejícího z radioaktivního rozpadu studovaného uraninitu.



Obr. 2. Izotopické poměry olova v galenitech a uraninitech z Jánské žíly, Příbram – Březové Hory. V detailu zobrazen vypočtený průsečík teoretického krajního radiogenního členu (uraninitu) pro $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} = 0$. Převzato ze Škáchy et al. (2009), Příloha 1.

Iniciační pro ideu úspěšného řešení byl vzhled uraninitů v odrazovém i elektronovém mikroskopu. Tyto obsahovaly větší množství inkluzí galenitu s různou koncentrací v kolomorfních zónách, stržených pravděpodobně při jeho precipitaci, a také (geneticky mladší) tenké žilky galenitu (Obr. 1). Nabízelo se tedy galenit (resp. jeho olovo) matematicky odečíst. V grafu $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ vs. $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ se uraninity seřadily do přímky končící galenitem z Jánské i dalších žil, v rámci nepřesnosti stanovení jednotného izotopického složení. Matematicky byl vypočítán průsečík s osou x (pro $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} = 0$), i jeho nepřesnost (Josef Ježek, PŘF UK). Z něj pak izotopické stáří $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ takto izotopicky „očištěného“ uraninitu 270 ± 20 milionů let (2σ) (Obr. 2). Velmi výjimečně se pak na elektronovém mikroskopu podařilo nalézt lokální partii inkluzí prostou a z WDS analýzy vypočítat chemické U/Pb stáří uraninitu 263 ± 9 milionů let (2σ).

Poprvé tak bylo zjištěno, že stáří uranové mineralizace příbramského březohorského ložiska je izochronní s příbramským uranovým ložiskem i hlavním „uranovým pulzem“ hydrotermálních žilných ložisek celé variské Evropy s mladovariským stářím okolo 270 milionů let (Cuney, Kyser 2015).

2.2 Widenmannit – sekundární minerál uranu a olova

Problematika relativně vzácného kosočtverečného olovnatého karbonátu uranylu widenmannitu s krystalochemickým vzorcem $\text{Pb}_2(\text{OH})_2[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2]$ byla řešena ve spolupráci se studentem Jakubem Plášilem (dnes významným mineralogem a krystalografem Fyzikálního ústavu AV ČR) v souvislosti se zkoumáním společného zvětrávání uranové a polymetalické (Pb-Zn-Cu±Ag) mineralizace na Jánské žíle v Příbrami, Březových Horách (Plášil et al. 2010, Příloha 2). Na tomto místě se střetávají dvě různé prvkové asociace ovlivněné dosahem hypergenní zóny zvětrávání i prostředím důlního díla za vzniku bohaté asociace sekundárních minerálů, včetně společných minerálů uranu a olova, jejichž představitelem je právě minerál widenmannit (Obr. 3).



Obr. 3. Hvězdčovitě prorostlice widenmannitu 2. generace z Jánské žíly, Příbram – Březové Hory. FOV 2 mm, Foto P. Škácha.

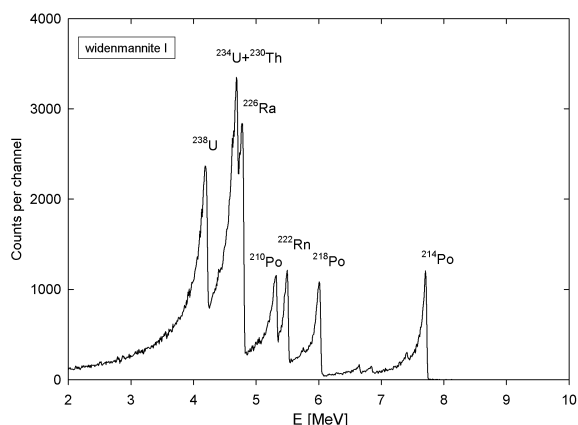
Nejprve byla nasazena metoda nedestruktivní alfa spektrometrie (Rámeček 1), která na zkoumané lokalitě rozlišila dvě generace widenmannitu: widenmannit první generace, který je součástí silně zvětralé výplně žíly a nachází se blízko stavu radioaktivní rovnováhy (v rámci U-rozpadové řady), (Obr. 4a) a widenmannit druhé generace, který se vyskytuje ve volných kavitách a na stěnách důlního díla a je naopak velmi mladý (Obr. 4b).

Rámeček 1 - Nedestruktivní alfa spektrometrie

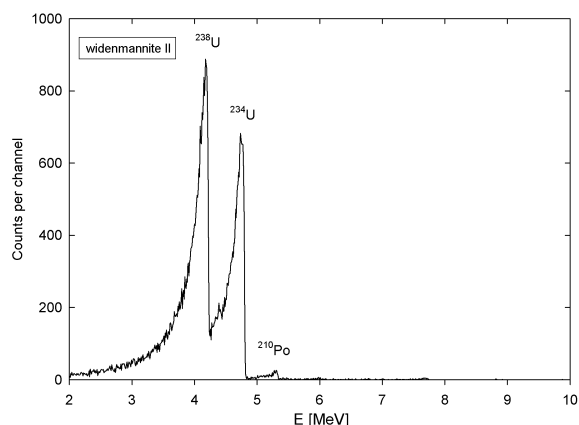
Tato metoda není nová, nicméně je v současnosti takřka zapomenuta či neprávem opomíjena. Byla exhumována z prací Moučky (1968) a Killeena a Carmichaela (1976): Velmi jemně rozetřený vzorek separovaného minerálu je nanesen ve vodní suspenzi na povrch leštěného nerezového disku, vysušen a zvážen. Optimální navážka je okolo 200 μg , pro zachování dostatečného energetického rozlišení (FWHM) při dobře měřitelné aktivitě. Poté je vzorek měřen polovodičovým alfa detektorem PIPS (Canberra) o ploše 450 mm^2 ve vakuové komoře. Načítací čas je obvykle okolo 24 hod, nicméně v případě slabě aktivních fází je možno snížit mez stanovitelnosti až k 80 ppm eU prodloužením doby měření na jeden týden. Optimalizací tohoto postupu a přípravou vhodného standardu se zabýval ve své diplomové práci Michal Fejgl (2003), dnes pracovník Státního ústavu radiační

ochrany, verifikací na referenčních materiálech a aplikací na Jánské žíle pak Petr Jarka (2007), dnes pracovník forenzní laboratoře PČR krajského ředitelství v Praze.

Hlavními výhodami této metody jsou relativní jednoduchost a hlavně možnost stanovení aktivity všech přítomných alfa zářičů bez ovlivnění chemickým procesem (v přírodním stavu), což umožňuje rychlé posouzení stavu radioaktivní rovnováhy ve vzorku. Nedestruktivní alfa spektrometrie je v naší laboratoři používána rutinně jako metoda „první volby“, zejména pro výběr vhodných kandidátů (minerálních fází) pro datování párem $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$, ale i pro identifikaci méně obvyklých radionuklidových situací, jako v případě galenitu z hořících hald (viz níže).



Obr. 4a. Spektrum alfa widemannitu 1. generace, nacházející se ve stavu blízkém radioaktivní rovnováze ($\text{U}=\text{Ra}$). Převzato z Plášila et al. (2010) Příloha 2.



Obr. 4b. Spektrum alfa widemannitu 2. generace. Tento mladý minerál obsahuje zejména mateřské izotopy uranu a ^{210}Po . Převzato z Plášila et al. (2010), Příloha 2.

Přestože se podle výsledků nedestruktivní alfa spektrometrie nacházel widemannit 1. generace ve stavu blízkém radioaktivní rovnováze, byl učiněn pokus o jeho datování metodou $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ (Rámeček 2).

Rámeček 2 - Datování metodou $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$

Tento datovací systém se hojně používá pro datování přírodních kvartérních dějů, jako jsou speleothémy, zřidelní sedimenty a uranové sekundární minerály (Boudon et al. (Eds.) 2003). Je ve skutečnosti založen na dvou datovacích párech, a to $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ a $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$, které je nutno oba měřit, neboť v tomto případě je ustavována rovnováha označovaná jako přechodná (Majer et al. 1981), kdy mateřský radionuklid (^{234}U) má sice delší, ale srovnatelný než radionuklid dceřiný (^{230}Th) a poměr $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ se také ustavuje do rovnováhy. Metodicky se dají tyto radionuklidy měřit hmotnostní spektrometrií s termální ionizací (TIMS), hmotnostní spektrometrií urychlovačovou (AMS), nebo alfa spektrometricky. V alfa spektrometrické verzi je použitelný v rozmezí od prvních tisíců let, kdy jsou již stanovitelné aktivity dceřiného ^{230}Th , až do cca 200 tisíc let, kdy je systém v rámci nepřesností stanovení v radioaktivní rovnováze.

Postup je dobře znám a v mírných modifikacích stále užíván (Maxwell (1998), Carter et al. (1999), Avivar et al. (2011), Skinner a Knight (2016)): Separovaný minerál v množství o aktivitě okolo 1 Bq (známé z nedestruktivní alfa spektrometrie) je podroben kyselinovému rozkladu. Do roztoku je přidán vnitřní standard $^{232}\text{U}/^{228}\text{Th}$ o podobné aktivitě. Poté je roztok na chromatografickém extrakčním činidle UTEVA[®] (fy. Eichrom, dnes Triskem) rozdělen na uranovou a thoriovou frakci, převeden do formy síranových roztoků (pufrů). Z nich jsou elektrodepozicí obě frakce vyloučeny na leštěné nerezové disky a měřeny ve vakuu na polovodičovém alfa spektrometru. Z naměřených aktivit radionuklidů obou frakcí a času uběhlého od radiochemické separace ^{232}U vnitřního standardu je vypočteno stáří minerálu. Optimalizací postupu a aplikací na uranové sekundární minerály se zabývali ve svých DP Michal Fejgl, Petr Jarka a Michal Roll, který aktuálně používá tuto metodu při své práci na doktorátu.

V případě widenmannitu 1. generace však bylo zjištěno, že se nachází v rámci analytických nepřesností ve stavu radioaktivní rovnováhy s ohledem na datovací pár $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$. Po započtení všech nepřesností bylo možno spočítat, že tato generace má stáří jistě vyšší než 222 tisíc let (Plášil et al. 2010, Příloha 2).

Zajímavá byla situace u widenmannitu 2. generace, kde nedestruktivní alfa spektrometrie indikovala absenci ^{230}Th , a pouze stopovou aktivitu ^{226}Ra resp. jeho krátkodobých dceřiných produktů (^{222}Rn , ^{218}Po , ^{214}Po). Kromě mateřských izotopů uranu však obsahoval zvýšenou aktivitu ^{210}Pb (respektive jeho krátkodobého dceřiného produktu ^{210}Po s poločasem 138 dní), konkrétně 67 Bq/g. Izotop ^{210}Pb ($T_{1/2} = 22,3$ let) byl s nejvyšší pravděpodobností stržen při krystalizaci tohoto minerálu uranu a olova a reprezentuje tedy vhodný datovací systém. Problémem bylo, že nebyla známa iniciální aktivita ^{210}Pb . Lze jí však vypočítat (Rámeček 3).

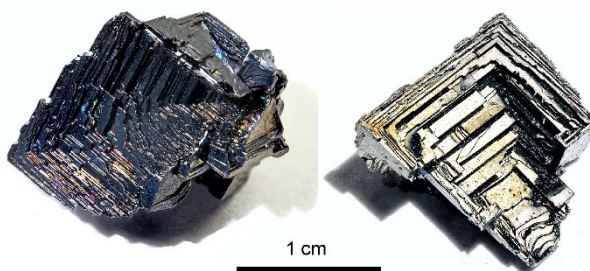
Rámeček 3 - Modelové stáří ^{210}Pb

V tomto případě můžeme využít ideu míšení izotopů olova pocházejících z primárních minerálů uraninitu a galenitu. Pro výpočet „modelového“ stáří ^{210}Pb lze vypočítat iniciální aktivitu tohoto izotopu z obsahu radiogenního olova ve zdrojovém primárním uraninitu a rezultující aktivity ^{210}Pb v tomto radiogenním olovu a podílu radiogenního olova v minerálu (v tomto případě widenmannitu).

Primární uraninit z Jánské žíly obsahuje 3,32 hmot. % radiogenního olova (průměr tří analýz metodou F-AAS) a 74,9 hmot. % U (průměr tří analýz metodou ICP-MS). Ve stavu radioaktivní rovnováhy je aktivita ^{210}Pb v uraninitu totožná jako aktivita mateřského uranu, tedy 9250 Bq/g (1 mg U má aktivitu 12,35 Bq). Aktivita ^{210}Pb v čistém radiogenním olovu tedy bude 278,3 kBq/g. Widenmannit 2. generace má podíl radiogenního olova pouze 1,94 % (průměr z obou izotopických párů $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ a $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, stanovení ICP-MS) a celkový obsah 39,6 % Pb (F-AAS). Jeho vypočítaná iniciální aktivita $A_0(^{210}\text{Pb})$ byla tedy 2140 Bq/g. Aktuální „nepodporovaná“ aktivita vypočítaná jako rozdíl $A(^{210}\text{Pb}) - A(^{226}\text{Ra})$ je 58 ± 21 Bq/g (2σ). Vypočítané modelové stáří ^{210}Pb tohoto minerálu je 118 ± 12 let (2σ) (Plášil et al. 2010, Příloha 2).

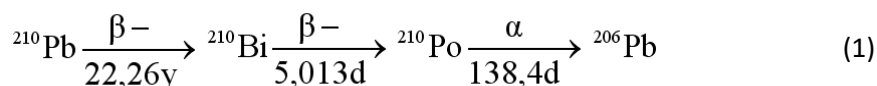
2.3 Radioaktivní galenit z hořících hald

Problematika radioaktivního galenitu (kubický PbS) byla studována ve spolupráci se studentem Michalem Čurdou, dnes zaměstnancem ČGS a studentem doktorského studia PŘF UK, v rámci jeho diplomové práce (Čurda 2014). Po doplnění a rozšíření byla práce publikována (Čurda et al. 2017, Příloha 3).



Obr. 5. Kostrovité krystaly radioaktivního galenitu z Radvanic. Foto P. Škácha. Převzato z Čurdy et al. (2017), Příloha 3.

Radioaktivní galenity se vyskytovaly na hořících haldách uhelných a uranových dolů dolnoslezské pánve na lokalitách Radvanice (důl Kateřina), Markoušovice (důl Ignác) a Rybníček (důl Novátor). Vznikaly procesem desublimace v teplotní zóně 600 - 800 °C v redukční asociaci s kapalnými kovy Pb, Sb, Bi a intermetaliky Pb-Bi, Sn-Bi, Sn-Ge a Pb-Sn. Na lokalitě Radvanice tvořily galenity až 1,5 cm velké kostrovité krystaly (Obr. 5). Jejich radioaktivita byla potvrzena alfa autoradiografií i alfa a gama spektrometrií (Obr. 6). Podle výsledků alfa i gama spektrometrie obsahují galenity izotopy koncového fragmentu rozpadové řady ^{238}U , tedy ^{210}Pb a jeho rozpadové produkty, až po koncové stabilní ^{206}Pb (1).

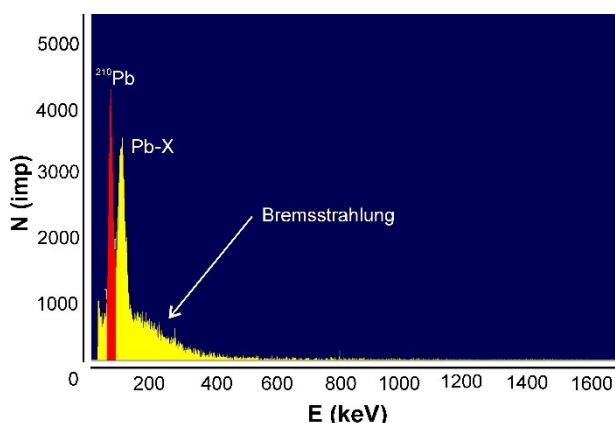


Pro stanovení hmotnostní aktivity ^{210}Pb v galenitech byla využita laboratorní gama spektrometrie (Rámeček 4).

Rámeček 4 - Gama spektrometrické stanovení ^{210}Pb v těžké matrici

Aktivita galenitů byla měřena na nízkopozadovém anticompton-antikoincidenčním gama spektrometru SILAR (popis v části věnované ^{210}Pb datování sedimentárních profilů). Prvními experimenty bylo zjištěno, že je dle předpokladů naměřená intenzita nízkoenergetické linie ^{210}Pb (47 keV) silně ovlivňována absorbcí v těžké matrici vzorku (PbS). Při měření 20 krystalů vycházela hmotnostní aktivita u větších krystalů systematicky nižší, neboť z centra krystalu je „měkké“ gama záření již účinně stíněno. Proto byla měření realizována na mletých vzorcích při konstantní hmotnosti (50 mg), při načitacím čase 1 hod. Jelikož neexistuje standardní materiál tohoto typu (^{210}Pb v PbS matrici), byl připraven sekundární standard rozmícháním 2 mg mletého standardu radiogenního olova (SRM 983, NIST, USA) s certifikovanou aktivitou 16 kBq/g ^{210}Pb (12/2004) do 48 mg neaktivního galenitu z Příbrami – Březových Hor. Tímto postupem byl připraven standard s aktivitou 484 Bq/g ^{210}Pb v galenitu (k 24/5/2014).

U studovaných vzorků byly naměřeny aktivity 135 až 714 Bq/g ^{210}Pb . Podle historických záznamů byla vypočítána původní aktivita galenitů v době vzniku (1960 Rybníček, 1998 Radvanice a 2006 Markoušovice) i jejich integrální dávka v rozmezí $2,2 \times 10^{11}$ až $6,1 \times 10^{11}$ a/g.



Obr. 6. Spektrum elektromagnetického záření galenitu z Radvanic. Nízkopozadový gama spektrometr SILAR, vzorek 50 mg, LT = 1 hod. Převzato z Čurdy et al. (2017), Příloha 3.

Mimořádně zajímavým je charakter emitovaného elektromagnetického záření studovaného galenitu. Podíl záření gama (^{210}Pb , 47 keV) je relativně malý. Převládá totiž záření rentgenové, způsobené sekundárními jadernými efekty, kdy obsažený dceřiný ^{210}Bi (silný energetický beta zářič s $\beta_{\text{max}} = 1,16$ MeV a výtěžkem emise 99 %) „bije“ do olovené matrice. Ve spektru elektromagnetického záření (Obr. 6) můžeme pozorovat jak záření charakteristické Pb-X (ve spektru kompozit čar PbK_β a PbK_α s energiemi 73 – 85 keV), tak i záření bílé (brzdné) s kontínuem pozorovatelným ve spektru dobře až do energií okolo 550 keV.

Byly studovány i vlivy radiace na poškození a deformaci krystalové struktury: Z vyhodnocení PXRD záznamů vyplynulo, že mřížka je poškozena mikronapětím („strain“), patrným z rozdílných sklonů křivek na Williamson-Hallově grafu, pozitivně korelujícím s vypočtenou integrální dávkou. Poškození pak bylo přímo pozorováno pomocí HRTEM. V rámci jednotlivých zrn byly nalezeny jak převládající oblasti plně krystalické, tak oblasti nanokrystalické, s velikostí krystalických domén okolo 10 nm, tak i oblasti plně amorfního PbS. Vysvětlením pozorovaného nehomogenního poškození může být, že zatímco všechny doposud studované metamiktní minerály byly bezvýhradně dielektrika, galenit je přírodní polovodič (Jenkins 2005), ve kterém mohou mřížkové defekty velmi snadno migrovat a shlukovat se do námi pozorovaných nanokrystalických až amorfních domén. V každém případě, námi studovaný galenit je prvním případem metamiktizace pozorovaným na skupině sulfidů v přírodě (Čurda et al. 2017, Příloha 3).

3 Uranem barvená skla a glazury

Hlavní a prvotní motivací k zahájení výzkumu koroze uranem barvených skel bylo studium migrace uranu z těchto materiálů, představujících vhodný antropogenní analog vitifikace jaderného paliva. Záměrem bylo shromáždit a zkoumat projevy koroze v nálezovém materiálu z historických lokalit skláren na Šumavě a v Jizerských horách, nacházejícím se dlouhodobě v podmínkách přírodního zvětrávání na původních sklárenských odvalech. Na tomto tématu mi bylo čest od roku 1999 spolupracovat a vést studenta Radka Procházku (nyní praktického geologa) na jeho cestě k metám diplomové práce (Procházka 2002) a práce doktorské (Procházka 2009), s několika publikovanými výsledky (Procházka et al. 2002, Příloha 4, Procházka 2007, Procházka et al. 2009, Příloha 5).

Naší prvotní zasvětitelkou do této problematiky byla sklářská historička PhDr. Jitka Lněničková (Muzeum Šumavy v Kašperských Horách, nyní na volné noze), která poskytla informace o historii a pomohla nám s výběrem vhodných lokalit: Uranem barvené sklo bylo poprvé v použitelném měřítku vytaveno na Šumavě v některých ze skláren Johana Meyra okolo roku 1830, i když o prvenství jsou stále vedeny spory se zastánci skláren jizerskohorských. Tato znalost se rychle rozšířila a od roku 1840 bylo již produkováno celosvětově. Naše výzkumné lokality byly zaniklé sklárny šumavské v Podlesí u Kašperských Hor (1584 – 1891) a Klášterském Mlýně (firma Loetz 1836- 1947) a sklárna jizerskohorská v Kristiánově nad Kamenicí (1775 – 1887).

Důležitou otázkou, kterou jsme v počátku výzkumu řešili, bylo terénní rozlišení uranových skel od dalších, převládajících druhů. V této době ještě nebyly k dispozici výkonné UV diodové zdroje a upravili jsme pro tyto účely přenosnou lampu s 6 W UV výbojkou. Nebylo však jasné, zda všechna uranová skla vykazují fluorescenci a naopak zda všechna fluoreskující skla obsahují uran. Komplementární možností bylo proto jejich radiometrické vyhledání a prověrka. Problémem je, že uran (bez radia, které bylo odděleno při výrobě uranového barvítka) má velmi nízkou, v terénu takřka nedetekovatelnou gama aktivitu. Zde se nabízela možnost využít měření záření beta, neboť přítomný fragment uranové rozpadové řady (^{238}U až ^{234}U) obsahuje silný energetický beta zářič $^{234\text{m}}\text{Pa}$ ($\beta_{\text{max}} = 2,29 \text{ MeV}$, výtěžek emise 98 %). Proto jsme se rozhodli zkonstruovat terénní sondu pro měření plošné beta aktivity (Rámeček 5).

Rámeček 5 - Terénní stanovení plošné beta aktivity

Ke konstrukci beta sondy nás inspiroval sovětský terénní radiometr PGR (Polevoj gamma-radiometr), resp. jeho beta sonda se čtyřmi GM trubkami typu STS-6 a odnímatelným plechem (Melkov, Puchalskij 1957). V sondě naší konstrukce je použito pět beta-gama GM trubek typu STS-6 detekujících beta záření od energie 300 keV. GM trubice jsou seshora i z boků kryty 3 mm silným olověným plechem zajišťujícím směrový příjem i zvyšující účinnost detekce odrazem beta záření. Pod trubkami je odnímatelný (zásuvný) 4 mm silný ocelový plech. Na konstrukci sondy se podíleli Viktor Goliáš (návrh konstrukce, montáž, zahoření a kalibrace), Radek Procházka (mechanické části) a Petr Nakládal (blok elektroniky). Sonda pracuje v propojení s ze zdrojem napětí a integrátorem RP 12 (ZMA Ostrov n. Ohří) a externím čítačem impulsů. Kalibrována je velkoplošným standardem s U-oxidem. Její citlivost je $3,3 \text{ imp/s/kBq/m}^2$ a účinnost detekce beta 18 %. Pro měření beta záření jsou provedeny dva záměry, „bez plechu“ (beta + gama) a „s plechem“ (gama). Plošnou beta aktivitu pak udává jejich rozdíl. Beta sonda se pro terénní detekci uranových skel plně osvědčila (Obr. 7), byl proměřen i profil sklárenským odvalem v Klášterském Mlýně (Procházka et al. 2002) (Obr. 8).

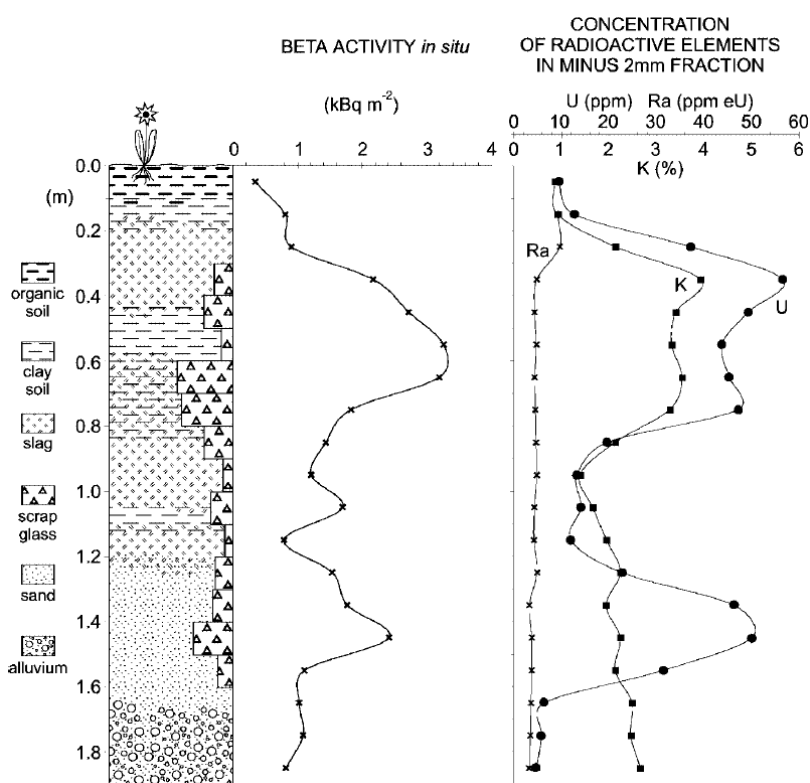


Obr. 7. Beta sonda s nalezenými střepky uranových skel. Sklárna Klášterský Mlýn. Foto V. Goliáš.

Kromě popsané úlohy byla ještě užita v diplomových pracích Radka Košťála (2005) na haldě šachty č. 16 v Příbrami, kde výsledky dobře vizualizovaly zvýšený podíl aktivnějšího prachu na místech pojezdu těžké techniky a v diplomové práci Michala Nekla (2002), Nekl, Goliáš (2002), kde byly v intravilánu města Klatovy některé ze silnic vybudovány za použití odvalového materiálu uranového ložiska Ustaleč. Byly pomocí ní snadno rozlišeny situace, kdy je tento asfaltový materiál na povrchu (zvýšená beta i gama), nebo je již kryt mladší, neaktivní vrstvou (zvýšená gama, nízká beta).

Dalo by se jistě namítnout, že pro měření beta aktivity lze využít moderní komerčně dostupné proporcionální počítače s velkoplošným oknem. Podobně jako v mnoha případech dalších přístrojů produkovaných primárně pro jiné než geologické účely je velkým problémem jejich nízká terénní odolnost, v tomto případě náchylnost tenkostěnného okna detektoru plněného plynem k mechanickému průrazu a tím jeho zničení. Zkonstruovaná sonda je mnohem odolnější. Tak například na odvalu šachty 16 na Příbrami (Košťál 2005) i přes vizuální zhodnocení povrchu a jeho kontrolu podrážkou boty byly po změření 400 bodů v krycí PVC fólii okna detektoru zjištěny 3 průrazy, ovšem bez jakéhokoli ovlivnění funkčnosti sondy.

V současné době je beta sonda pravidelně využívána při laboratorním cvičení předmětu MG431P18 „Radioanalytické metody“ k demonstraci vlastností beta záření, výpočtu korekce na mrtvou dobu a stanovení citlivosti a účinnosti detekce jako součásti zápočtového úkolu.



Obr. 8. Profil odvalu sklárny v Klášterském Mlýně s terénně stanovenou plošnou beta aktivitou a naměřenými koncentracemi radionuklidů z odebraných vzorků stanovenými laboratorní GS. Převzato z Procházky et al. (2002), Příloha 4.

Na výše jmenovaných třech lokalitách se nám podařilo shromáždit bohatý nálezový materiál fragmentů uranových skel, podle typu a dekorů historicky datovaný Jitkou Lněničkovou nejčastěji s přesností ± 5 let. Metodami laboratorní gama spektrometrie a EM-WDS byly jistěny obsahy uranu v rozmezí 0,2 až 0,5 %.

Byly rozlišeny dva typy koroze. První, vyskytující se u střepů skla uložených stabilně ve vlhkém prostředí, charakteristický vznikem homogenní vrstvy ochuzenou o alkálie s precipitací kalcitu (prokázán PXRD i WDS), podobnou hydratovanému silikagelu, která má podobné, někdy i vyšší obsahy uranu, než neporušené sklo. Druhým typem koroze, vyskytující se v sušších částech odvalů je vznik

vrstevnatého, odlupujícího se produktu s irizujícími barvami na povrchu. U tohoto vrstevnatého korozního produktu bylo zjištěno také ochuzení alkáliemi, zvýšení obsahu hliníku a výrazně nižší obsahy uranu, než v neporušeném skle. V těchto vrstvách je hliník vázán v podobě nanokrystalů gibbsitu $\text{Al}(\text{OH})_3$ a kaolinitu, zjištěných HRTEM-SAED. Podle modelování speciálním programem PHREEQC-2 a termodynamických zákonitostí je hlavní rozdíl sorbce uranu (přítomného dle výsledků speciálních výpočtů v roztoku zejména jako bikarbonátkomplex uranylu $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2]^{2-}$ na oba korozní produkty v jeho dobré sorbci na silikagel. Naproti tomu Al-oxyhydroxidy i kaolinit jsou při $\text{pH} \sim 8$ povrchově záporně nabitě a sorbci uranu tak neumožňují (Procházka et al. 2002, Příloha 4, Procházka et al. 2009, Příloha 5).

Na závěr jsme ve spolupráci s prof. Vojtěchem Ettlerem také provedli laboratorní loužení vsádkovými experimenty deionizovanou vodou při laboratorní teplotě po dobu 426 dní na moderních uranových korálcích, produkovaných firmou Jablonex (nyní Preciosa-Ornela). Podařilo se simulovat pouze vznik korozní vrstvy prvního typu, tedy homogenní vrstvy. V případě uranu (stejně jako Si, V, Th, Ca, Ca) po dobu experimentu zůstává loužící křivka konstantní, uran se stále rozpouští a k saturaci nedochází (Procházka et al. 2009, Příloha 5). Vitifikace tedy není ideálním způsobem imobilizace uranu.

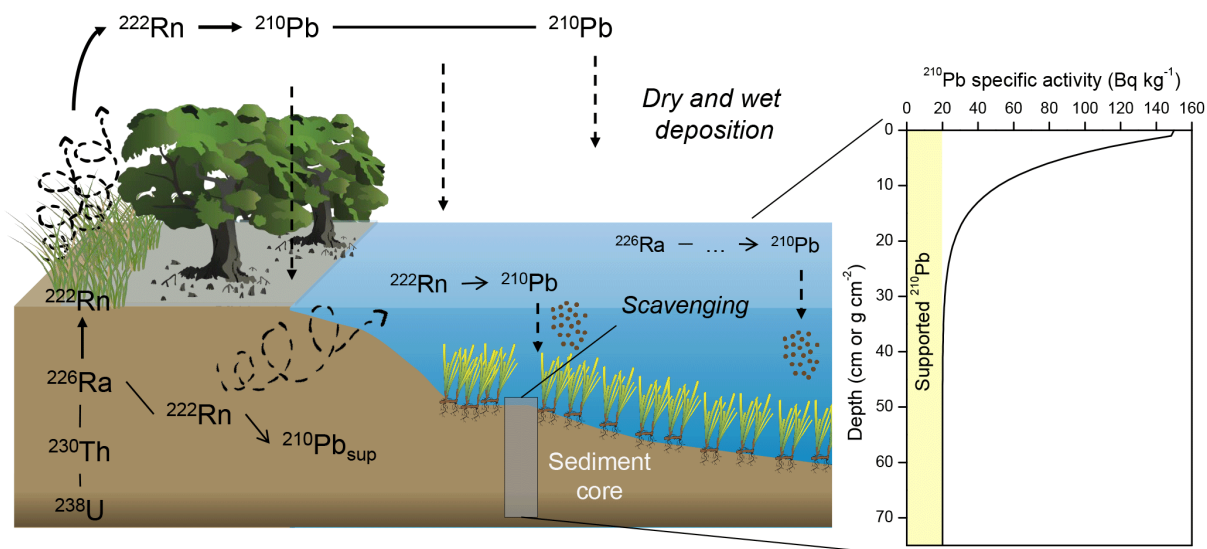
Na náš výzkum koroze moderního uranového skla navázala zahraniční výzkumná skupina. Na skle, které jsme těmto kolegům poskytli, provedli hydrotermálními experimenty při 90°C a různých pH a časech alterace za vzniku vrstevnaté korozní zóny, podobné, jakou jsme pozorovali na přírodních vzorcích (Dohmen et al. 2013). Zde vyvozují názor o kongruentním rozpouštění skla, precipitaci výrazně méně rozpustného silikagelu v blízkosti povrchu a pokračování rozpouštění skla pod touto povrchovou vrstvou a periodické opakování rozpouštění, precipitace a odlupování silikagelové vrstvy. Později tuto hypotézu i experimentálně podpořili při stejných podmínkách alterace na borosilikátovém skle, uměle obohaceném izotopem ^{30}Si metodou nanoSIMS (Geisler et al. 2015).

Zatím poslední prací naší výzkumné skupiny na tomto poli byla bakalářská práce Michala Vopata (2018), který zkoumal historické uranové žluté a slonovinové keramické glazury na historických spotřebních výrobcích (zejména čajových servicech) vyráběných v českých zemích v letech 1912 – 1945. Vlastnoručně zkonstruovanou maloplošnou sondou s alfa scintilátorem $\text{ZnS}(\text{Ag})$, kalibrovanou na talířcích, u kterých byl obsah v glazuře byl stanoven WDS, naměřil na 85 vzorcích obsahy v rozmezí 0,2 až 2,2 % uranu v glazuře.

4 Datování sedimentárních profilů metodou ^{210}Pb

Datování využívá izotopu ^{210}Pb ($T_{1/2} = 22,3$ let), který je členem rozpadové řady ^{238}U , konkrétně dlouhodobým radioaktivním depozitem radonu (^{222}Rn). V tomto případě je využíván jeho trvalý příliv z atmosféry, kdy jsou zejména atmosférickými srážkami strhávány jak krátkodobé produkty radonu (^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi a ^{214}Po), tak i samotný dlouhodobý depozit (^{210}Pb) a trvale ukládány na povrch vznikajícího sedimentu. Zde je jeho aktivita nejvyšší, v hlubších vrstvách postupně klesá, až dosáhne zhruba konstantní úrovně, dané radioaktivní rovnováhou s mateřským ^{226}Ra , přítomným jako geogenní složka sedimentu. Z celkové aktivity ^{210}Pb tak rozlišujeme podíl geogenní „podporovaný“ („supported“ či „base“ ^{210}Pb), obvykle ztotožňovaný s aktivitou ^{226}Ra a část atmogenní („unsupported“ či „excess“ ^{210}Pb), kterou lze využít pro datování (Obr. 9). Z hlediska poločasu ^{210}Pb lze efektivně datovat sedimenty do stáří 100 – 150 let. Metoda tedy pokrývá dobře období antropocénu (Lewis, Maslin 2015), respektive období masívní průmyslové činnosti a s ní související geochemické i biologické indikátory v sedimentárních profilech. Užívá se pro datování profilů rašelinišť a jezerních sedimentů, v některých případech také sedimentů mořských (Arias-Ortiz et al. 2018). Podmínkou je však pokud možno co nejnížší podíl minerálního detritu, který by jinak atmogenní složku ředil. Proto se příliš nepoužívá

například pro svahové, říční či deltové uloženiny, které tuto podmínku nesplňují. Aktivita ^{210}Pb se obvykle stanovuje metodou laboratorní gama spektrometrie (Rámeček 6.)



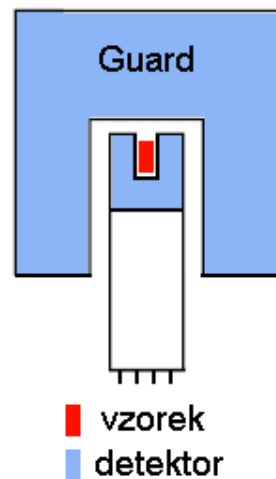
Obr. 9. Cyklus ^{210}Pb a idealizovaný vývoj jeho aktivity v sedimentárním záznamu. Převzato z Arias-Ortiz et al. (2018).

Rámeček 6 - Stanovení nízkých aktivit ^{210}Pb

Zcela klíčová je metodická stránka, neboť radiometrické stanovení ^{210}Pb je v tomto případě nesnadné. Vzorky mají obvykle hmotnost prvních gramů a relativně nízké aktivity. V počátcích jsme využívali pro dataci rašelinných profilů alfa spektrometrické stanovení, kdy je měřen dceřiný produkt ^{210}Pb a to alfa zářič ^{210}Po ($T_{1/2} = 138$ dní), kdy je nutná příprava vzorku chemickou cestou: Rašelina je v autoklávu podrobena totálnímu rozkladu v kyselinách, je přidán vnitřní standard (umělý izotop ^{209}Po), poté jsou ostatní kovy maskovány EDTA a polonium je elektrochemicky vyloučeno na stříbrném terčíku, který je měřen na polovodičovém alfa spektrometru.

V roce 2009 byla zkonstruována aparatura SILAR pro gama spektrometrické stanovení ^{210}Pb . Zatímco alfa spektrometrie je nízkopozadová z principu, tak v případě gama spektrometrie je pro nízkopozadové měření zapotřebí speciální přístup a konfigurace. Pro gama spektrometrické stanovení je jedinou možností využít nízkopozadovou a slabou linku ^{210}Pb (47 keV, výtěžek emise 4,25 %). Aparatura je stíněna jak pasivně (10 cm nízkopozadového Pb), tak i aktivně antikoincidenčním detektorem, jímž je velký studnový NaI(Tl) krystal 160 x 125 mm, který ještě dále potlačuje jak tok fotonů gama z okolí, stejně tak i neužitečný Comptonův rozptyl ze signálu vzorku. Měřicí detektor je zakázkově vyrobený studnový 40 x 40 mm NaI(Tl) detektor s velmi tenkou stěnou. Tato geometrie se nazývá „well-in-well“, tedy uspořádání je 4π anticompton-antikoincidenční (Obr 10). Koincidenční linka je provedena v architektuře CAMAC. Sestává ze zdroje HV, zesilovače a diskriminátoru, logického tvarovacího členu a zpožďovače („delay“), sčítaný s impulzy měřicího detektoru. Výstupní koincidenční impulsy jsou vedeny do vstupu („gate“) spektrometru měřicího detektoru. Ten je obsluhován komerčním multikanálovým analyzátozem DSA 2000 (Canberra) se softwarem GENIE 2000.

Pro aparaturu byla připravena řada sekundárních standardů s lehkou maticí napuštěním dřevěných pilin standardními roztoky produkce ČMI. Pro linii ^{210}Pb (47 keV) má aparatura v používané geometrii válcových 8 ml lahvíček (vzorků) účinnost detekce 46,2 %. Jako referenční materiál pro ^{210}Pb je užíván standard IAEA-447 („moss soil“) se stanovenou aktivitou ^{210}Pb 340 ± 6 Bq/kg ve srovnání s doporučenou hodnotou 338 Bq/kg (korigovaná na rozpad od referenčního data 2009/11/15). Reálné vzorky mají hmotnost nejčastěji v rozmezí 1 – 3 gramy, čas měření je dva dny, pozadí



Obr. 10. Schéma detektorové sestavy 4π anticompton-antikoincidenční gama spektrometru SILAR.

je měřeno 6 dní. Velkou výhodou gama spektrometrického měření je možnost stanovení ^{226}Ra (= „base“ ^{210}Pb) i radiocesia (^{137}Cs), které umožňuje velmi často křížovou kontrolu správnosti datování nukleárními eventy v sedimentárním záznamu. Spektrometr SILAR je využíván i pro výuku předmětu MG431P18 „Radioanalytické metody“ pro demonstraci nízkopozadového měření i úlohu výpočtu energetické kalibrace gama spektrometru.

Pro interpretaci stáří jednotlivých vrstev sedimentu se nejčastěji používají tři základní modely, kdy je vždy některá složka sedimentačního děje předpokládána jako konstantní (což samozřejmě v některých případech platit nemusí): Nejužívanějším modelem je CRS („Constant Rate Supply“), též označovaný jako CF („Constant Flux“), kdy za konstantní je považován tok atmosférického ^{210}Pb (Appleby, Oldfield 1978, Appleby 2001). Druhým je model CIC („Constant Initial Concentration“), tedy za konstantní je považována aktivita ^{210}Pb v povrchové vrstvě sedimentu (Robbins, Edgington 1975, Robbins 1978). Třetím je pak nejvíce zjednodušující model CFCS („Constant Flux : Constant Sedimentation“), kdy jsou za konstantní považovány tok atmosférického ^{210}Pb i akumulární rychlost sedimentu v $\text{g}/\text{cm}^2/\text{rok}$ (Krishnaswamy et al. 1971). Moderně je také užíváno také Bayesianské pravděpodobnostní modelování na základě CRS principu, obzvláště vhodné pro nekompletní sedimentární záznamy (Aquino-López et al. 2018, Aquino-López et al. 2020). V naší laboratoři používáme pro interpretaci stáří klasický model CRS, kromě recentního případu (Kavková et al. 2022), kde byly na tlak recenzenta použity všechny tři modely, ovšem s podobnými výsledky.

Dosud byly úspěšně datovány a publikovány profily sedimentů Štrbského plesa ve Vysokých Tatrách pro výzkum fylogeneze dafnií (Hamrová et al. 2009, Příloha 6), rašeliniště v Krušných a Jizerských horách a na Šumavě pro stanovení vývoje atmosférické depozice olova (Zuna et al. 2011), rašeliniště Wolbrom poblíž polského těžebního revíru Olkusz (sulfidické ložisko Pb-Zn rud typu Mississippi Valley) s depozicí thalia (Vaněk et al. 2021) a jezero Suzdalevo na Sibiři, vzniklé pravděpodobně Tunguzským impaktem (Kavková et al. 2022). Novou aplikací je pak chronometrie vývrátů stromů, kde jsme poprvé aplikovali ^{210}Pb datování na sedimenty zaplňující vývrátové deprese v rozdílných ekosystémech Žofínského pralesa a Horního poloostrova v Michiganu (Šamonil et al. 2013, Příloha 7).

5 Radon v půdním vzduchu

Vzácný plyn radon (^{222}Rn) můžeme nalézt v přírodě ve všech prostředích, ve volné atmosféře (v řádech $10^0 - 10^1 \text{ Bq}/\text{m}^3$), v uzavřených prostředích domů, jeskyní, důlních děl (v řádech $10^1 - 10^5$, výjimečně až $10^6 \text{ Bq}/\text{m}^3$) i v půdním vzduchu (v řádech $10^3 - 10^6 \text{ Bq}/\text{m}^3$) a povrchové a zejména podzemní vodě kde je přítomen v nejvyšších aktivitách (řádu 10^7 , výjimečně až $10^8 \text{ Bq}/\text{m}^3$).

Měření radonu v půdním vzduchu neboli emanometrie je dnes spíše vnímáno jako povinný přívažek ke stavebnímu povolení, poskytuje však mnohem širší možnosti v poznání Země. Nejen jako jedna z nejcitlivějších radiometrických metod při vyhledávání výchozů ložisek uranu, mimořádně efektivní v zakrytých terénech (Matolín in IAEA 2010), ale i jako způsob a prostředek pro řešení jiných úloh, spojených s lokalizací geologických objektů či jejich rozhraní:

5.1 Stínavský silur

Prvním příkladem, důležitým z hlediska české, respektive moravské geologie je použití měření radonu v půdním vzduchu pro účely historické geologie a paleontologie na lokalitě Stínava na Dražanské vrchovině. O této legendární lokalitě a jejím mysteriu jsme se dozvěděli s mým ročníkovým kolegou Michalem Kučerou (dnes profesorem a významným mikropaleontologem na univerzitě v Brémách) již v našem 3. ročníku studia na přednášce Historické geologie od prof. Ivo Chlupáče (1931 – 2002) v roce 1991:

Lokalita leží v široké oblasti moravského neproduktivního spodního karbonu – kulmu, do níž jsou tektonicky zaklesnuty nepravidelné útržky devonu repešského pruhu. Silurské graptolitové břídlíce,

v té době nejstarší paleontologicky prokázané horniny na Moravě, byly objeveny v dědičné štolě železnorudného dolu devonských vulkanosedimentárních rud typu Lahn-Dill (jeden z nejjihnějších výskytů šternbersko-hornobenešovského rudního pásu), těžených snad již Kelty (oppidum Staré Hradisko s rozvinutou železářskou výrobou je odsud pouze 2 km).

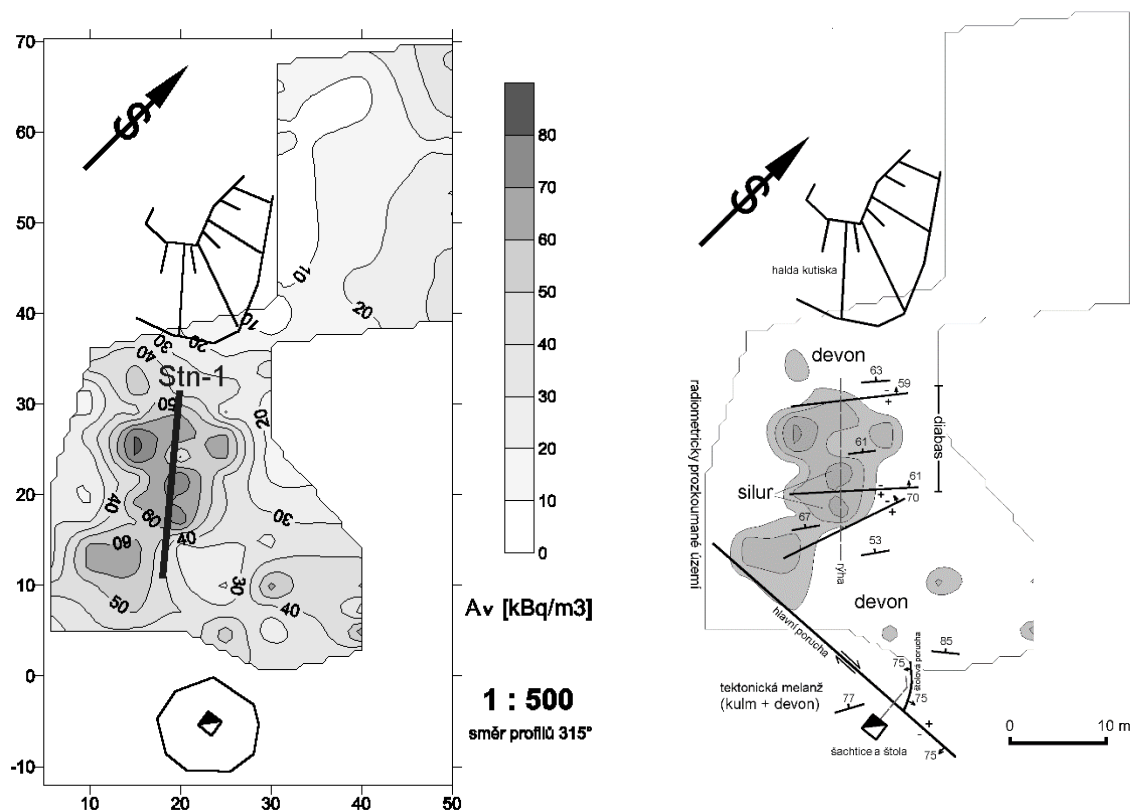
Do čištění dědičné štoly se okolo roku 1932 pustil místní nadšený kutěř Jan Vojáček, krejčí z Drahan. Ve vyvezených břidlicích objevil roku 1934 zvláštní, jemu neznámé otisky František Meisel, který tehdy ještě jako student hornictví v Ostravě dělal Vojáčkovi odborného poradce. O svém nález informoval Josefa Blektu, středoškolského profesora z Plumlova. U něho vzorky náhodně uviděl polyhistor Mauric Remeš, švagr Radima Kettnera, který poprvé rozpoznal, že jde o skutečné silurské graptolity a neváhal Kettnera o tomto fantastickém objevu okamžitě informovat. Společně pak Remeš s Kettnerem za doprovodu Maisela lokalitu několikrát navštívili a svoji stěží uvěřitelnou zprávu zveřejnili (Kettner, Remeš 1935 a další práce). První podrobný popis graptolitů provedl Bouček (1935). Na Drahanech vypukla doslova silurská horečka. Podrobnou historii tohoto objevu přinesli Melichar a Synek (1998). Za války byla lokalita (součást vojenského újezdu Březina) jako výcvikový prostor wehrmachtu nepřístupná. Po válce našli geologové štolu již zavalenou a výzkum byl na dlouhou dobu přerušen (Chlupáč, úst. sděl.).

Ještě jako studenti jsme na lokalitu několikrát v letech 1991 a 1992 nadšeně vyrazili a pokoušeli se provádět první vyhledávací a výkopové práce, neúspěšně. Dynamiku nabral výzkum v letech 1997 – 1998, kdy jsme po výchozu silurských břidlic intenzivně pátrali v rámci projektu „Geologický výzkum okolí Stínavy na Drahanské vrchovině“ (hlavní nositel Rostislav Melichar z PŘF MU v Brně) geofyzikálními metodami. Předpokládali jsme, že černé silurské břidlice budou vodivější (příměs grafitu) a budou mít zvýšené obsahy uranu. Úspěšné nebyly metody geoelektrické (kombinované profilování, VDV, spontánní polarizace), magnetometrie (Dohnal, Jáně 1999), ani terénní gama spektrometrie a podpovrchové měření gama aktivity, na němž se podílel bakalářský student Pavel Kada (Goliáš, Kada 1999). V případě geoelektrických metod byla velmi dobře patrná pouze pozice železnorudného tělesa se sulfidickou příměsí, které „přehlušilo“ případné projevy grafitických břidlic. Málo kontrastní zvýšení obsahu uranu bylo naměřeno pouze na dvou bodech (skutečně na místě výchozu siluru) gama spektrometricky. Mělkým výkopem byly zastiženy pouze světlé svahoviny; málo věrohodná indikace nebyla dále ověřována (Goliáš, Kada 1999). K cíli tehdy nevedly ani pokusné odkryvné práce provedené jak na povrchu, tak i ve štolě, kde měly být podle všeho silurské horniny dosažitelné nejbližší. V této době nezbylo než alespoň revidovat staré archivované vzorky s graptolity (Kraft, Marek 1999) a nově byla zhodnocena jejich mikropaleontologie (Fatka 1999). Komplexnějšího hodnocení se dočkaly i další aspekty lokality, a to magnetismus kulmských sedimentů (Chadima, Melichar 1999), geochemie devonských vulkanitů (Hanžl 1999), mineralogie železných rud (Goliáš 1999) i historie jejich těžby (Goliáš, Prudká 1999). Širší okolí Stínavy bylo také nově geologicky mapováno (Melichar 1999).

Lokalita však nebyla opuštěna ani po skončení projektu. Se zmáháním štoly jsme pokračovali přes značné geotechnické potíže i v letech 1999 až 2002 za vydatné podpory geoložky Vladimíry Jaškové (Muzeum Prostějovska v Prostějově). Odkryvnými pracemi na štolě byly v roce 2002 za poruchou naraženy šedé břidlice, paleontologicky náležící střednímu devonu – emsu. Bylo tak zjištěno, že prostorový rozsah siluru je zřejmě výrazně menší, než jak jej zakreslil Meisel v plánu štoly (Kettner, Remeš 1935) a práce na štolě byly zastaveny. V té době také zesílily hlasy pochybovačů, tvrdících, že na Stínavě žádný silur není a původní nález je pouze obrátným podvrhem.

Po úvaze jsme se rozhodli vsadit opět na geofyzikální radiometrické metody a pokusit se najít silurské břidlice z povrchu. Výsledky laboratorní GS indikovaly u silurských břidlic (vzorek z odvalu dědičné štoly) poněkud vyšší obsahy uranu: 3,9 oproti devonským 2,2 ppm eU(Ra) (Goliáš, Kada 1999). Šance

tedy nebyla příliš velká; k našemu štěstí byly ale v rýze zastiženy břidlice špičkově až s 9,1 ppm eU(Ra). Z předchozích etap jsme znali větší mocnosti svahovin, nasadili jsme proto emanometrii. V roce 2003 jsme realizovali podrobný emanační průzkum sondováním do hloubky 1 m, kdy bylo prozkoumáno území nad štolou v měřítku 1 : 500. V prostoru pod haldou železnorudného dolu byla naměřena relativně výrazná emanační anomálie o ploše přibližně 200 m² (na izolínii 50 kBq/m³) s maximy až 81 kBq/m³ radonu s podílem 65 – 90 % ²²²Rn složky (Obr. 11a, b).



Obr. 11a. Izoliniová mapa aktivity radonu v půdním vzduchu na lokalitě Stínava (2003). Emanometr RP-25 (ZMA Ostrov nad Ohří) s ionizační komorou objemu 0,43 litru. Síť 10 x 2,5 metru, v anomálním poli 5 x 2,5 m, celkem 122 bodů. Zpracováno programem Surfer. Vyznačena pozice rýhy z roku 2004. Převzato z Goliáše et al. (2011), Příloha 8.

Obr. 11b. Detailní geologická pozice silurské šupiny ověřená technickými pracemi v superpozici s emanační anomálií (zobrazena plocha hodnot nad 50 kBq/m³), kontrolující pozici silurských břidlic. Převzato z Goliáše et al. (2011), Příloha 8.

V roce 2004 byla emanační anomálie ověřena strojně hloubenou rýhou délky 19 metrů, která protнула celou sekvenci silurských graptolitových břidlic v délce cca 12 metrů, na obou stranách oddělenou zlomy od okolních břidlic devonských. Na lokalitu bylo tehdy operativně přivoláno několik dalších geologů. Rýha byla podrobně dokumentována a bylo shromážděno množství paleontologického materiálu i litologických vzorků, které byly později kolokviálně zhodnoceny paleontologickými specialisty. Dnes jsou uloženy v depozitáři Chlupáčova muzea (PřF UK).

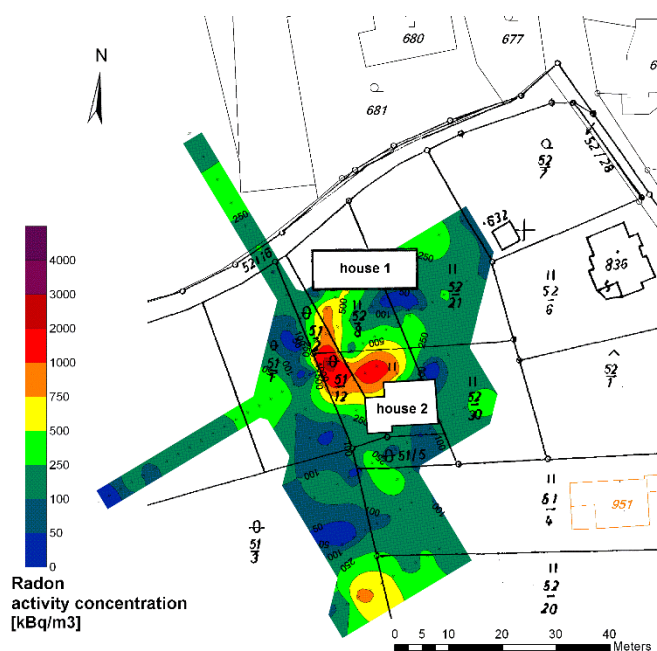
V porovnání se stratigrafií odvozenou z archivovaného materiálu ze štoly (Kraft, Marek 1999) je zřejmé, že rýhou byla zastižena podobná sekvence silurských hornin. Díky určené metráži sdružující graptolitová společenstva došlo k podstatné redukci spodního stratigrafického intervalu pouze na úzký rozsah rozhraní dvou graptolitových zón svrchního llandovery, zatímco ve vyšších stratigrafických úrovních došlo naopak k podstatnému rozšíření stratigrafického rozsahu o několik zón svrchního wenlocku a bazálního ludlowu, které nebyly prokázány staršími sběry ze štoly. Z hlediska tektoniky tvoří stínavské silurské graptolitové břidlice šupinu, podle orientace systémů kliváže dvakrát

překocenou, ve složitě prohněteném materiálu při bázi kulmského příkrovu a její dnešní povrchový rozsah je oproti okolnímu devonu omezen vícekrát reaktivovanými směrnými zlomy (Goliáš et al. 2011, Příloha 8).

5.2 Kokonínská uranová žíla

Ze zcela jiného koncentračního řádu aktivity radonu je výchoz žíly s uranovou mineralizací na kokonínském zlomu v intravilánu města Jablonec nad Nisou (část Kokonín). Tuto lokalitu jsme objevili v roce 2014 při vyhledávacím průzkumu pramenů radioaktivních minerálních vod v oblasti tanvaldského granitu (Kohn 2015). V kokonínském parku byl na linii kokonínského zlomu nalezen nejvýznamnější zdroj celého tanvaldského granitu – Schindlerův pramen (2,2 – 2,5 kBq/l ^{222}Rn , 25 l/min), nazvaný podle místního rodáka Josefa Schindlera (1814-1890), vodoláče a pokračovatele odkazu Vincenze Priessnitze. Při podrobném průzkumu zlomové linie jsme narazili na stavební pozemek se zvýšenou radioaktivitou, se dvěma nově postavenými domy. V pokryvu se zde vyskytovaly „horké“ úlomky uranové rudy, které nás dovedly k výchozu bohaté čočky uranové mineralizace v rampě mezi oběma domy. Nemile byli překvapeni majitelé obou nových domů (držitelé čerstvých „radonových posudků“) i primátor města Jablonec n. Nisou, které jsme o této skutečnosti neprodleně informovali.

V součinnosti s majiteli a primátorem pak byla zadána diplomová práce mongolské studentce Gereltsetseg Tumurkhuu, která měla za úkol provést doplňující měření a situaci objektivizovat. Kromě podrobného měření v okolí obou domů jsme v roce 2015 realizovali gama spektrometrické mapování celého průběhu kokonínského zlomu na ploše zhruba 0,25 x 1 km, které odhalilo výchozy dalších dvou čoček uranového zrudnění v (prozatím) nezastavěném území.



Obr. 12. Izolíniová mapa aktivity radonu v půdním vzduchu na výchoze žíly s uranovým zrudněním na stavebních parcelách lokality Kokonín v superpozici s katastrální mapou. Emanometr RP-25 (ZMA Ostrov nad Ohří) s ionizační komorou objemu 0,43 litru. Sít 10 x 2,5 metru, v anomálním poli 5 x 2,5 m, celkem 109 bodů. Zpracováno programem Surfer. Převzato z Goliáše et al. (2016), Příloha 9.

Aktivity radonu v půdním vzduchu dosahovaly maxima (3,3 MBq/m³) v místě výchozu uranového zrudnění, ale i v bezprostřední blízkosti základů obou domů, postavených přímo na této žíle, jsme opakovaně naměřili až kolem 1 MBq/m³ (Obr. 12) (Tumurkhuu 2016, Goliáš et al. 2016, Příloha 9).

Vývody směrem k efektivitě tzv. „radonového programu“ ponecháváme v tomto případě raději na váženém čtenáři.

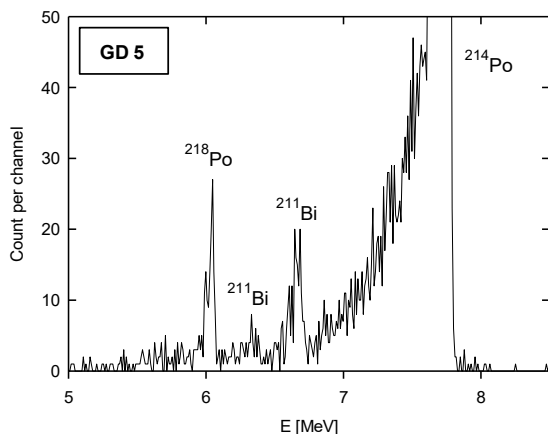
V současnosti je v řešení diplomová práce Bc. Antonína Lustika, který má podrobně mineralogicky zhodnotit archivovaný bohatý nálezový materiál z této nové lokality.

5.3 Izotopické stáří radonu

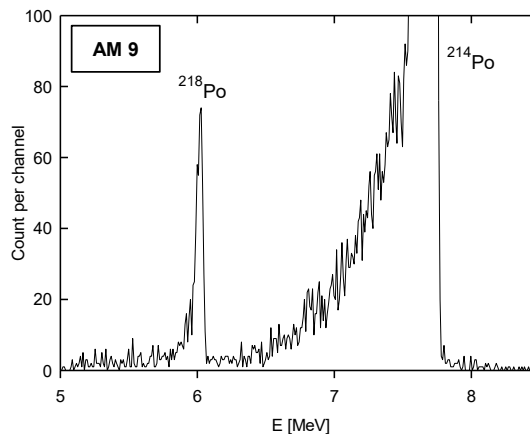
Tato studie navázala na diplomovou práci studentky Daniely Pittauerové (dnes Daniela Ransby, Alfred Wegener Institut v Brémách), která se zajímala o dlouhodobé zvětvávání uranem bohatých haldovin na odvalu dolu z 16. století na žíle Geister (Dušní žíla) na Jáchymově, v žilném uzlu Rovnost. Lokalita byla komplexně prozkoumána a detailně zhodnocena nasazením více geofyzikálních metod i přímého vzorkování haldou i jejím podložím a geochemickým i mineralogickým zhodnocením odebraných geomateriálů. Aktivita radonu zde byly naměřeny vysoké, v rozmezí 100 – 500 kBq/m³ ²²²Rn v aktivní haldovině a nejvíce na výchozu odžilků, kde objemové aktivity lokálně dosahovaly až okolo 1 MBq/m³ ²²²Rn (Pittauerová 2002, Pittauerová, Goliáš 2002, Pittauerová et al. 2003, Pittauerová, Goliáš 2006).

V roce 2003 jsme na lokalitě realizovali výzkum izotopického složení radonu filtrovaného půdního vzduchu (filtr 0,45 μm) za použití elektrostatické depozice produktů radonu na leštěné nerezové terčíky. Na lokalitě jsme vybudovali polní laboratoř s vakuovou alfa spektrometrickou aparaturou (detektor PIPS 450 mm²), umožňující měřit s vysokým energetickým rozlišením (FWHM 50 – 60 keV), kde byly deponované terčíky měřeny v časových sekvencích a byly takto sledovány aktivity a průběh radioaktivního rozpadu krátkodobých produktů izotopů radonu.

Radon má v přírodě tři izotopy: Nejznámějším je dlouhodobý izotop ²²²Rn ($T_{1/2} = 3,8$ dne) z rozpadové řady ²³⁸U, následuje v některých případech hojný izotop ²²⁰Rn ($T_{1/2} = 55,6$ s) z rozpadové řady ²³²Th, nazývaný „thoron“ a poněkud neprávem přehlížený izotop ²¹⁹Rn ($T_{1/2} = 3,96$ s) z rozpadové řady ²³⁵U nazývaný „aktinon“.



Obr. 13a. Detail alfa spektra krátkodobých produktů radonu, vzorkovaného na horizontu aktivní haldoviny (blízký zdroj Rn), s výrazným zastoupením izotopu ²¹¹Bi. Převzato z Goliáše et al. (2005), Příloha 10.



Obr. 13b. Detail alfa spektra krátkodobých produktů radonu, vzorkovaného nad zrudněným odžilkem žíly Geister (vzdálenější zdroj Rn) s minoritním zastoupením izotopu ²¹¹Bi. Převzato z Goliáše et al. (2005), Příloha 10.

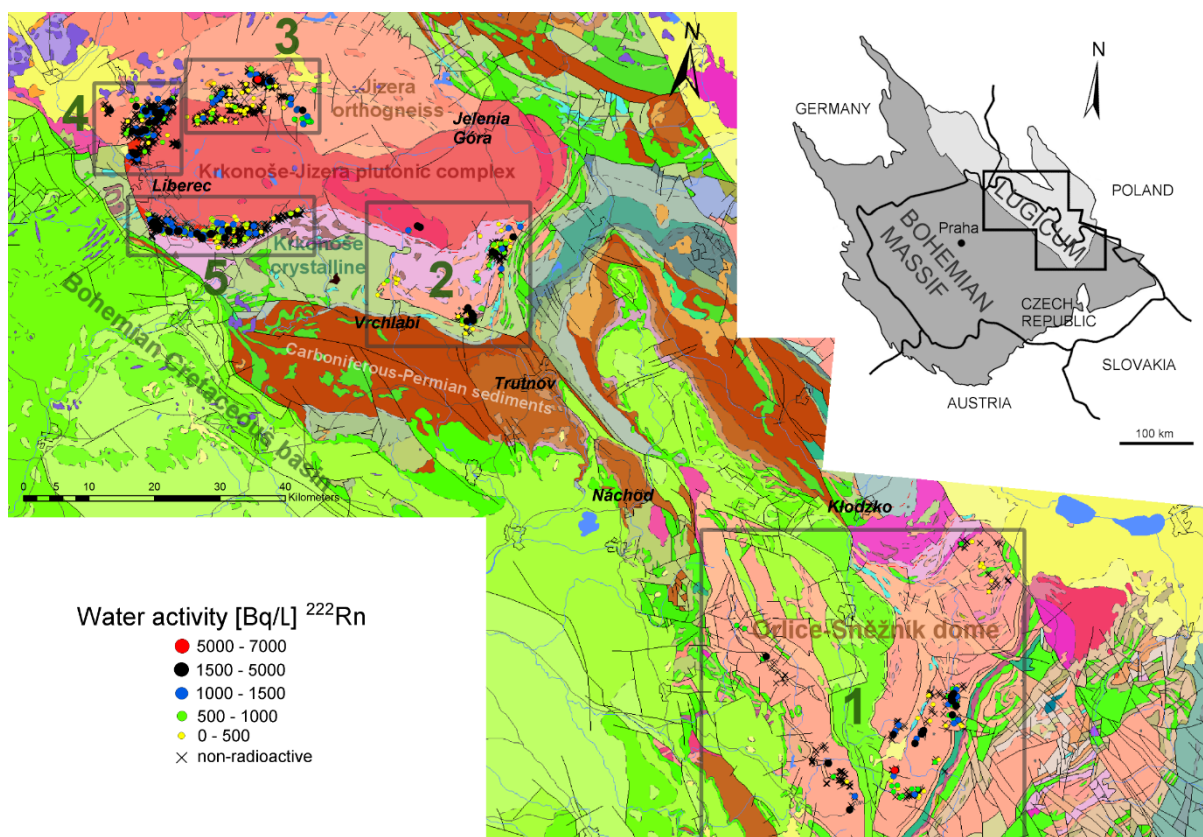
Bylo zjištěno, že radon je na lokalitě Geister v různých geologických pozicích izotopicky rozdílný. Izotop ²²⁰Rn („thoron“) se zde prakticky nevyskytoval, ve směsi bylo indikováno vždy okolo 100 % ²²²Rn složky. Naproti tomu se zde podařilo naměřit krátkodobý produkt ²¹⁹Rn („aktinon“) a to izotop ²¹¹Bi ($T_{1/2} = 36,1$ min). Aktinon byl v obzvláště hojném zastoupení stanoven v radonu pocházejícím z haldoviny,

tedy blízkého zdroje radonu, zatímco v radonu z odžilku, tedy hlubšího zdroje byl zastoupen podstatně méně (Obr. 13a, b). Bylo možné situaci matematicky modelovat a interpretovat „stáří radonu“ podle naměřených poměrů $^{211}\text{Bi}/^{214}\text{Po}$. Tento poměr je málo citlivý k délce vzorkování i délce měření a naopak je velice citlivý ke vstupnímu poměru $^{219}\text{Rn}/^{222}\text{Rn}$. Tímto způsobem je tedy možno radon „datovat“, respektive porovnat relativní vzdálenost jeho zdrojů, či zdroj radonu lokalizovat (Goliáš et al. 2005, Příloha 10).

6 Radioaktivita minerálních vod

K tomuto mimořádně zajímavému tématu mne přivedli okolo roku 2003 geofyzik prof. Jan Gruntorád (1928 – 2005), který se na sklonku svého života začal zabývat geomedicínou a při několika návštěvách otevřel témata působení radioaktivity na lidský organismus a radioaktivity vod, a také ložiskový geolog, jeden z mých velkých učitelů, odborník na ložiska uranu ing. Oskar Pluskal CSc. (1932 – 2009), který v mnoha plodných diskusích několikrát zmínil výskyt pramenů radonových vod nalezených při vyhledávacím průzkumu na uran v orlicko-sněžnické klenbě, který vedl za svého působení jako ředitel závodu uranového průzkumu v Novém Městě na Moravě do roku 1969.

Po zorientování v problematice jsme začali s naší výzkumnou skupinou s vyhledáváním a zkoumáním zdrojů tohoto cenného typu minerálních vod, definovaného naší legislativou jako vody s aktivitou nad 1,5 kBq/l ^{222}Rn (Zákon č. 164/2001 Sb. „lázeňský zákon“) v krystalinických oblastech Českého masívu. Započali jsme v oblasti orlicko-sněžnického krystalinika, kde byla i navázána dlouhodobá přeshraniční spolupráce s prof. Tadeuszem A. Przylibskim (Politechnika Wroclawska) a jeho výzkumnou skupinou.



Obr. 14. Radioaktivita vod v oblasti lugika a obrysy průzkumných oblastí 1 až 5. GIS kompozit na podkladě geologické mapy 1 : 500 000 (www.geology.cz). Převzato z Goliáše et al. (2022), Příloha 11.

Na základě vyvinuté metodiky a pozitivních výsledků byly postupně prozkoumány a (s jedinou výjimkou východních Krkonoš, kde studentka téma opustila) formou diplomových prací finalizovány výsledky

z celé oblasti lugika (Obr. 14), kde hlavní zdrojovou horninou byly lugické (sněžnické, krkonošské, kowarské a jizerské) ortoruly: 1) 2005-2006 orlicko-sněžnické krystalinikum (Lipanský 2007, dnes praktický hydrogeolog), 2) 2008-2009 východní Krkonoše (Goliáš 2007, Goliáš et al. 2010), 3) 2010-2011 Lázně Libverda – Świeradów-Zdrój (Hrušková 2013, dnes doktorské studium na téma aktivačních procesů vod), 4) 2012-2013 Chrastava – Bogatynia (Černík 2017). Na základě pozitivních výsledků na odsunuté kře tanvaldského granitu u Bedřichovky v rámci území 4) byl průzkum realizován také v oblasti 5) 2014 – 2015 Tanvaldský granit (Kohn P. 2015).

Terénní vyhledávací akce byly od počátku organizovány jako kolektivní, kdy se po terénu pohybovalo zároveň až pět průzkumných skupin. Rychle se vyvinuly do podoby dobrovolných kurzů radiohydrogeochemického mapování, kterých se postupně zúčastnilo jistě již více desítek studentů. Byla vyvinuta a úspěšně nasazena metoda gama indikace, kdy není aktivita radonu měřena u všech vodních projevů, ale pouze u vývěrů „indikovaných“ podle zvýšeného příkonu záření gama ve vývěru a nikoli u vodních projevů „negativních“. Pracovně klidné období covidového lockdownu bylo využito pro vytěžení všech archivovaných dat získaných v terénu, jejich kvantitativnímu zhodnocení a statistickému zpracování i ověření efektivity gama indikační metody za pomoci Josefa Ježka (PřF UK) a publikování těchto údajů (Goliáš et al. 2022, Příloha 11):

V oblasti lugika bylo celkem měřeno 2354 vodních projevů, z nichž byla u 660 stanovena aktivita radonu. Bylo nalezeno celkem 111 vodních zdrojů z aktivitou nad 1,5 kBq/l ^{222}Rn . Nejaktivnějším zdrojem celého lugika je pramen Michael (4,8 – 6,2 kBq/l ^{222}Rn , 0,35 l/min), jeden z klastru Andělských pramenů v Novém Městě p. Smrkem. Zdroj s nejvyšším radiačním tokem (aktivita násobená průtokem) je impozantní Jakubův pramen ve Stříbrnici pod kralickým Sněžníkem (1,8 – 2,5 kBq/l, 90 – 180 l/min). Některé významné prameny byly technicky podchyceny pro dlouhodobější pozorování i zpřístupnění veřejnosti. Mnohé z nich se staly populárními turistickými cíli i oblíbenými místy balneace. Příkladem je „lesní radioaktivní balneopark“ vybudovaný okrašlovacím spolkem N. Města p. Smrkem v areálu Andělských pramenů, který je lázeňskými lékaři z Lázní Libverdy doporučován k doplňkové terapii (Goliáš et al. 2013). Některé průběžné výsledky byly také zařazeny do souborného kompendia Krásného et al. 2012.

Vývěry radioaktivních vod jsou vázány na zlomové struktury, vždy potvrzené při nasazení geofyzikálního průzkumu. Nebyla nalezena žádná závislost výskytu na terénní morfologii, ani jiném přímo pozorovatelném přírodním fenoménu. Každý radioaktivní pramen je svým způsobem unikát. Možné je jediné zobecnění: Radioaktivní prameny se nevyskytují samostatně, ale tvoří takřka vždy klastry více vývěrů. Radonové vody krystalinika jsou obvykle studené a málo mineralizované (pod 200 mg/l), jednoduchých hydrochemických typů (nejčastěji Ca-Na-HCO₃-SO₄). Byly však zachyceny i klastry vod radon – chloridových, s celkovou mineralizací až 1,5 g/l v Albrechticích u Frýdlantu (Goliáš et al. 2014, Goliáš et al. 2020, Příloha 11), nebo na Dlouhém Mostě a v Kokoníně (Kohn P. 2015, Goliáš et al. 2022, Příloha 11), typů Na-Ca-Cl či Na-Cl.

Byla vyslovena hypotéza o vzniku radioaktivních pramenů bariérového typu, kdy může být pramen v některých případech zformován na tektonicky oživeném kontaktu dvou různých hornin, který představuje jak geochemickou, tak i hydrogeologickou bariéru. Takové zdroje byly pozorovány vícekrát: ortorula vs. opuka (na okraji kralického prolomu, klástr Dolní Hedeč, území 1), ortorula vs. dolomit (prameny Sv. Vojtěcha, území 2), ortorula vs. fylit(?) (Andělské prameny, území 3) a tanvaldský granit vs. svor (Kokonín, Schindlerův pramen, území 5) (Goliáš et al. 2022, Příloha 11).

Průběžně jsme pracovali také na jiných projektech, a to radioaktivitě vod v Karlových Varech ve formě diplomových prací Zdeňka Třískaly, dnes vedoucího Českého inspektorátu lázní a zřídel Ministerstva zdravotnictví (Třískala 2008, Goliáš et al. 2009) a Veroniky Žídkové (2009).

Moderně byla také zhodnocena radiohydrochemie vod Lázní Jeseník Tomášem Kohnem, dnes praktickým hydrogeologem (Kohn T. 2018). Nově byly také formou bakalářské práce zhodnoceny radioaktivní prameny v Praze – Čimicích s aktivitou až 1200 Bq/l ^{222}Rn , vyvěrající v kabelovém tunelu Holešovice z břidlic barrandienského neoproterozoika s tělesy silicitů (Lustik 2021, Lustik et al. 2022).

Velmi zajímavé výsledky byly získány při výzkumu aktivovaných pevných geomateriálů systematicky odebíraných při podchycování pramenů ve formě diplomové práce (Fanta 2016) i výzkumu unikátních vzorků mineralizovaných lugických ortorul z vývěrových lokalit pramenů, jako materiálu potenciálně vodu aktivujících (diplomová práce Fatkové 2022). Ve výzkumu pevných vzorků a studiu aktivačních procesů budeme jistě pokračovat. V současné době navazuje ve výzkumu aktivačních procesů svojí doktorskou prací Lenka Hájková (roz. Hrušková) stopovacími pokusy na prameništi Sv. Vojtěcha ve spolupráci s hydrogeologem Jiřím Bruthansem.

Zatím posledním, systematicky prozkoumaným územím je oblast Skalná – Bad Brambach (2016 - 2018) na mimořádně fertilním smrčinském granitu, finalizovaná ve formě diplomové práce Štěpánky Turnové, dnes praktické vodohospodářky (Turnová 2019). Zde byl v roce 2016 nalezen zatím nejradioaktivnější povrchový vývěr na území ČR, pramen Břetislav nedaleko Plesné (11,4 – 13,2 kBq/l ^{222}Rn , 2,4 – 5,2 l/min). Byl nazván jménem RNDr. Břetislava Vylity, CSc. (1932 – 2015), našeho významného hydrogeologa, který celý svůj plodný život zasvětil minerálním vodám v západních Čechách. Z tuzemských zdrojů ho překonává pouze podzemním vrtem zachycený jáchymovský pramen Agricola (24 kBq/l ^{222}Rn , 10 l/min), ostatní balneologicky využívané jáchymovské prameny mají aktivity nižší. V této oblasti, známé i významnou seismickou aktivitou prozatím zůstáváme a budujeme zde laboratoř kontinuálního monitoringu pramene Pod Skalou (7,6 – 10,2 kBq/l ^{222}Rn , 0,9 – 3,8 l/min) ve Skalně u Chebu.

7 Diskuse a další perspektivy

Pojem „radioaktivita“ nemá u laické veřejnosti příliš dobrý zvuk. Je synonymem nebezpečnosti, tím spíše že není vidět, s důsledky odporu až zavržení jaderné energie i všech dalších radiačních činností a možných přírodních expozic u značné části populace. Škodlivost nízkých dávek (pod 100 mSv) však není prokázána, a také souvislost mezi radonem v domech a rakovinou plic byla vědecky vyvrácena metaanalýzou (v té době) všech třiceti dvou předchozích studií (Dobrzyński et al. 2017). V současné době je však tato oblast přeregulovaná, kdy mnoho přírodních látek a geomateriálů nevyhovuje příliš přísným limitům nejen radiačních, ale i dalších norem (např. obsahy kovů v půdách) a veřejnost je bohužel i odbornými pracovníky přírodními radionuklidy a radioaktivitou aktivně strašena. Iracionální strach před radioaktivitou („radiofobie“) má však ve svých důsledcích mnohem negativnější důsledky než radioaktivita sama (Orient 2017). Naději lze spatřovat v pozitivní roli výuky a vzdělávání, kdy můžeme hledat poučení z přírody a historie Země, která nás po 4,2 miliardy let utvrzuje, že radioaktivita je přirozenou biogenní složkou a k životu jí potřebujeme. Velkou pozitivní roli má i edukace a propagace na poli radioaktivních vod, které jsou pro léčbu úspěšně užívány již více než 100 let (Becker 2004) a jejich tradiční širokou oblibu nedokázalo vykořenit ani moderní tmářství iracionálního strachu před radioaktivitou.

Na poli výzkumu radionuklidů v přírodních systémech pak máme otevřeno mnoho cest, kudy se můžeme vydat: Za nadále perspektivní spatřujeme studium uranové sekundární mineralizace, tedy poznání přírodních minerálů uranu i minerálů uranylu, důležité pro predikci chování jaderného paliva v palivovém cyklu i jaderného odpadu po uložení (Costa Peluzo, Kraka 2021, Zhang et al. 2022). Náš výzkum na tomto poli průběžně probíhá ve spojení s Jakubem Plášilem, kdy je realizováno posouzení stavu jejich radioaktivní rovnováhy a datace metodou $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$. Novými možnostmi pak mohou být aplikace AMS (UJV Řež), zamýšlený nákup nového „uranového“ TIMS či aktuálně

rozjednaná spolupráce se zahraniční laboratoří disponující touto metodou. V současné době také spolupracujeme na projektu výzkumu přírodní radiační alterace bitumenů, zajímavého analogu dlouhodobé degradace bitumenovaných radioaktivních odpadů (hlavní řešitel Vladimír Machovič, Ústav struktury a mechaniky hornin AV ČR). Některé výsledky jsme již publikovali (Havelcová et al. 2022). Na našem pracovišti na tomto projektu provádí výzkum doktorský student Vladimír Strunga (zaměstnanec UJV Řež) i byla čerstvě obhájena také velmi povedená bakalářská práce Dominika Nováka (2022), popisující uranovou a thoriovou mineralizaci v sedimentech permského rudnického obzoru na lokalitě Vrchlabí, kterou po doplnění hodláme publikovat. Základní informace o radioaktivitě minerálů je studentům podána již v prvním ročníku v přednášce MG431P52 „Mineralogie“. Toto téma je pak v celé šíři vyučováno v rámci předmětu MG431P68 „Radioaktivní minerály“. O geochemii uranu a minerálních fázích a procesech důležitých pro ložiskotvorbu se studenti dozvědí i v předmětu MG432P16 „Ložiska radioaktivních surovin“.

Na poli uranem barvených skel a glazur je jistě po výzkumu přírodní alterace skel logicky vhodný navazující výzkum alterace glazur, kde máme archivovány již některé vhodné vzorky. Velmi zajímavé jsou také historické otázky počátku použití uranu jak v českých zemích (rivalita v prvenství skláren na Šumavě a Jizerských horách), na Cornwallu již v roce 1817 (Lole 1995) či nejvíce fantazii jitrící použití uranu k barvení skla starými Římany kolem roku 79 našeho letopočtu (Kulnicki-Goldfinger 2018). O historii, vlastnostech a dalších aspektech uranových skel a glazur je pojednáno v jedné z lekcí předmětu MG431P68 „Radioaktivní minerály“, o jejich alteraci pak v předmětu MG431P28 „Technická mineralogie“, v části věnované jadernému palivu a ukládání radioaktivních odpadů.

Datování sedimentů metodou ^{210}Pb považujeme za metodu v naší radiometrické laboratoři již zavedenou a osvědčenou. Metoda je také vyučována v rámci předmětu MG431P18 „Radioanalytické metody“. V současné době „čas konzumující“ aparatura 4π anticompton-antikoincidenčního gama spektrometru SILAR trvale měří další sedimentární profily a jistě poskytne vynikající výsledky pro řešení úloh našich kolegů. Nejbližším cílem je u této datovací metody standardizace našich výstupů za použití balíku SERAC v programovacím jazyku R, prosazovaná v mezinárodním měřítku Bruelem a Sabatierem (2020).

Emanometrie, jako jedna z atmogeochemických metod, je připravena k řešení dalších úloh lokalizace a vizualizace geologických objektů, pokud bude zapotřebí. V současnosti je stále široce užívána k řešení geologických úkolů v zakrytých terénech (Tayebi et al. 2019, Andrassy et al. 2021). Emanometrii také pravidelně prakticky vyučujeme v rámci kurzu MG431T12 „Terénní kurz geochemický“. S doktorskou studentkou Lenkou Hájkovou, roz. Hruškovou máme v současné době rozpracovanou otázku vizualizace aktivity a obrazu radonové emanace na rozhraní saturované a nesaturované zóny výchozů aktivační zóny na lokalitě radioaktivních pramenů v Horní Malé Úpě, kde máme naměřena zajímavá data čekající na interpretaci.

V oblasti radioaktivity vod se také otevírá více možností. Logickou volbou by bylo pokračování v systematickém vyhledávání zdrojů radioaktivních minerálních vod gama indikační metodou (Goliáš et al. 2022, Příloha 11) v nových perspektivních oblastech, ze kterých lze jmenovat například okolí Dolního Žandova, kde je dosti vysoká šance nálezu smíšených typů vod Rn-CO_2 , nebo perspektivní oblast svratecké ortoruly, kde byl již jeden zdroj při nesystematickém průzkumu nalezen. Prozatím ale zůstáváme na smrčinském granitu při budování podzemní laboratoře kontinuálního monitoringu parametrů pramene Pod Skalou u Skalné, kde pravidelně organizujeme terénní akce za účasti studentů. Zde očekáváme zajímavé výsledky v souvislosti se zemětřesnou aktivitou. Spolupracujeme také s biologii na výzkumu biologického oživení radioaktivních pramenů, kde je aktuálně podán grantový projekt na podporu toho tématu.

Z celého textu habilitační práce je zřejmé, že představené odborné aktivity tvoří širokou škálu výzkumných zájmů, pro něž je charakteristická interdisciplinarita, v níž můžeme hledat a nacházet více prostoru pro řadu inovativních myšlenek a vzájemných mezioborových inspirací. Na druhé straně zde samozřejmě existuje i řada nezanedbatelných rizik, z nichž lze jmenovat například tendence k přílišnému zjednodušování vedoucím k nepochopení či misinterpretaci na hranicích více exaktních „tvrdých“ a více empirických „měkkých“ oborů, potíže v hledání možností financování i publikace výsledků (např. významný obor minerálních vod dosud nemá svůj vědecký časopis) atd. (cf. Horlick-Jones, Sime 2004, Taekema, van Klink 2011). Interdisciplinarita prováděného výzkumu pak přináší aplikaci fundamentálních matematických, fyzikálních, chemických a radiochemických poznatků do oblastí mineralogie, materiálových věd a jejich historie, hydrogeologie, geochemie minerálních vod, atmogeochemie a dalších geologických oborů, s výrazným vkladem do sedimentologie, paleoekologie a paleobiodiverzity ale například i na první pohled málo pravděpodobného lesnictví. Výzkumnou pozici proto spatřujeme jako nejzajímavější a nejprínosnější právě na pomezí a křižovatce různých oborů, kdy hlavním sjednocujícím a generálním motivem je radioaktivita. Z hlediska perspektivy vidíme budoucnost našich výzkumných aktivit jak v základním, tak i aplikovaném výzkumu na poli mnohotvárného uranu, dnes mimořádně významného ve velmi důležitých činnostech vedoucích k zajištění udržitelné energie, neboť energie je civilizace, stejně tak i na více aplikovaném poli radioaktivity minerálních vod a jejich přímého přínosu do oblastí humánní medicíny a balneologie, vedoucí ke zkvalitnění života, neboť minerály jsou zdraví (cf. Gomes, Rautureau eds. 2021).

Na závěr je třeba říci, že při výzkumu radioaktivity a radioaktivních prvků v přírodních procesech narážíme na mnohá omezení a obtížně splnitelné podmínky, kterými mohou být čistota separovaných fází, rovnovážné systémy mimo datovací škálu, disturbance sedimentárních profilů (cca každý pátý), některé metody mají vyšší limity stanovitelnosti a minerály mohou být krystalograficky postižené procesy metamiktizace, kdy poskytují difúzní data PXRD, Ramanovské nebo infračervené spektroskopie a další nesnáze.

Naopak nám geologické procesy poskytují mnoho možností aplikace radionuklidových systémů ke stanovení stáří krystalizace, sedimentace i jejich rychlostí a jistě i další zajímavé aplikační příležitosti. Je tedy třeba hledat cesty a rozvíjet postupy a věnovat se edukaci dalších výzkumníků na tomto poli. Při problémech bychom se neměli vzdávat, ale hledat cesty, neboť radioaktivita a přírodní i umělé radionuklidy jsou mocným nástrojem poznání přírodních procesů.

8 Literatura

- Anrássy E., Mojžeš A., Nogová E., Čangel O. (2021): Surface identification of undetermined spaces with the use of soil radon emanometry. *Contributions to Geophysics and Geology* 52(2), 189-205.
- Appleby P.G. (2001): Chronostratigraphic techniques in recent sediments. In: *Tracking change using lake sediments*, 1, Springer. 171-203.
- Appleby P.G., Oldfield F. (1978): The calculation of lead-210 dates assuming a constant rate of supply of unsupported 210Pb to the sediment. *CATENA* 5, 1-8.
- Aquino-López M.A., Blaauw M., Christen J.A., Sanderson N.K (2018): Bayesian analysis of 210Pb dating. *Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics* 23, 317-333.
- Aquino-López M.A., Ruiz-Fernández A.C., Blaauw M., Sanchez-Cabeza J-A. (2020): Comparing classical and Bayesian 210Pb dating models in human-impacted aquatic environments. *Quaternary Geology* 60, 101106.
- Arias-Ortiz, A., Masqué, P., Garcia-Orellana, J., Serrano, O., Mazarrasa, I., Marbà, N., Lovelock, C. E., Lavery, P. S., and Duarte, C. M. (2018): Reviews and syntheses: 210Pb-derived sediment and carbon accumulation rates in vegetated coastal ecosystems – setting the record straight, *Biogeosciences Discussions* 15, 6791–6818.
- Avivar, J., Ferrer, L., Casas, M., Cerdá V. (2011) Smart thorium and uranium determination exploiting renewable solid-phase extraction applied to environmental samples in a wide concentration range. *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 400, 3585–3594.
- Becker K. (2004): One century of radon therapy. *International Journal of Low Radiation* 1, 334–357.
- Bruel R., Sabatier P. (2020): serac: an R package for ShotlivEd RADionuclide chronology of recent sediment cores. *Journal of Environmental Radioactivity* 225, 106449.
- Bouček B. (1935): O silurské fauně od Stínavy (západně od Plumlova) na Dražanské vysočině. *Časopis Vlasteneckého Spolku musea (Olomouc), Odd. přír.*, 48, 3-4, 129-138. Olomouc.
- B. Boudon, G.M. Henderson, C.C. Lundstrom, S.P. Turner (eds.) 2003. Uranium-series geochemistry. Rev. in *Mineralogy and Geochemistry* Vol. 52, Min. Soc. Am. Washington., 656s.
- Carter, H. E., Warwick, P., Cobb J. and Longworth, G. (1999) Determination of uranium and thorium in geological materials using extraction chromatography. *Analyst* 124, 271-274.
- Costa Peluzo B.M.T., Kraka E. (2021): Uranium: The Nuclear fuel cycle and beyond. *International Journal of Molecular Sciences* 23(9), 4655.
- Cuney, M., Kyser, K. (2015): *Geology and geochemistry of uranium and thorium deposits*. Short Course Series, Mineralogical Society of Canada, Montreal. 46, 345s.
- Černík T. (2017): *Prameny radioaktivních minerálních vod v oblasti Chrastava – Bogatynia*. MS. Diplomová práce, PŘF UK Praha. 63s, 1příl.
- Čurda M. (2014): *Izotopy olova a olovo 210 v recentních galenitech dolnoslezské pánve*. MS. Diplomová práce, PŘF UK Praha. 53s.

- Čurda M., Goliáš V., Klementová M., Strnad L., Matěj Z., Škoda R. (2017): Radiation damage in sulfides: Radioactive galena from burning heaps, after coal mining in the Lower Silasian basin (Czech Republic). *American Mineralogist* 102, 1788-1795.
- Dobrzyński L.; Fornalski K.W., Reszcyńska J. (2017): Meta-analysis of thirty-two case-control and two ecological radon studies of lung cancer. *Journal of Radiation Research* 59, 149–163.
- Dohmen L., Lenting Ch., Fonseca R.O.C., Nagel T., Heuser A., Geisler T. (2013): Pattern formation in silicate glass corrosion zones. *International Journal of Applied Glass Science* 4(4), 357-370.
- Dohnal J., Jáně Z. (1999): Výsledky geofyzikálního průzkumu na lokalitě Stínava – Repešský žleb. *Přírodovědné Studie Muzea (Prostějov)* 2, 43-48. Prostějov.
- Ehring K., Kamenetsky S., McPhie J., Macmillan E., Thompson J., Kamenetsky M., Maas R. (2021): Staged formation of the supergiant Olympic Dam uranium deposit, Australia. *Geology* 49(11), 1312-1316.
- Fanta M. (2016): Datování vývěrů radioaktivních minerálních vod v krkonošsko-jizerském krystaliniku metodou $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$. MS. Diplomová práce. PŘF UK Praha. 41s.
- Fatka O. (1999): Výsledky mikropaleontologického výzkumu silurských hornin na lokalitě Stínava – Repešský žleb (Drahanská vrchovina). *Přírodovědné Studie Muzea (Prostějov)* 2, 17-22. Prostějov.
- Fatková K. (2022): Uranová mineralizace ortorul lugika jako prekurzor výskytu radioaktivních pramenů. MS. Diplomová práce. PŘF UK Praha. 96s, 3příl.
- Fejgl M. (2003): Aplikace nové metody pro alfa spektrometrické stanovení obsahu a izotopického složení uranu v hutních struskách, uranem barvených sklech a produktech jejich alterace. MS, Diplomová práce. PŘF UK, Praha. 45s, 7příl.
- Geisler T., Nagel T., Kilburn M.R., Jansen A., Icenhower J.P., Fonseca R.O.C., Grange M., Nemchin A.A. (2015): The mechanism of borosilicate glass corrosion revisited. *Geochemica et Cosmochimica Acta* 158. 112-129.
- Goliáš V. (1999): Rudní mineralizace lokality Stínava-Repešský žleb. *Přírodovědné Studie Muzea (Prostějov)* 2, 57-68. Prostějov.
- Goliáš V. (2007): Vývěry léčivých radioaktivních vod v Janských Lázních - Těsném dole. – In: Štursa J. & Knapik R. (eds), Geoekologické problémy Krkonoš. *Opera Corcontica* 44/1, 161-169.
- Goliáš V., Hrušková L., Černík T., Bruthans J., Nakládal P., Churáčková Z., Kula A. (2014): Albrechtický chloridový okrsek. *Zprávy o geologických výzkumech v roce 2013/H - Hydrogeologie*. 159-164.
- Goliáš V., Hrušková L., Lipanský T., Černík T., Kohn P., Ježek J., Procházka R., Przylibski T.A., Dohnal J., Strnad L., Kowalska A., Fialkowska-Lichwa L., Mišta W., Nowakowski R. (2022): Exploration and investigation of high-level radon medicinal springs in the crystalline units: Lugicum. *Water* 14(2), 200.
- Goliáš V., Hrušková L., Przylibski T.A., Lipanský T., Černík T. (2013): Radioactive springs of the Krkonoše Mts and Jizera Mts as geological phenomena, healing sources and tourist attractions. *Opera Corcontica* 50/S. 135-142.
- Goliáš V., Kada P. (1999): Výsledky radiometrického průzkumu paleozoických hornin lokality Stínava – Repešský žleb. *Přírodovědné Studie Muzea (Prostějov)* 2, 31-42. Prostějov.

- Goliáš V., Prudká A. (1999): Nástin historie těžby železných rud na ložisku v Repešském žlebu u Stínavy (Drahanská vrchovina). *Přírodovědné Studie Muzea (Prostějov)* 2, 69-79. Prostějov.
- Goliáš V., Pittauerová D., Procházka R., Třískala Z. (2005): Field alpha-spectroscopy of radon (^{222}Rn) and actinon (^{219}Rn) progeny in soil gas: Locating a radon source. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 266. 461-470.
- Goliáš V., Jašková V., Melichar R., Štorch P., Prokop R., Budil P., Kraft P., Marek J., Holub F.V., Mikuláš R. (2011): Výchoz silurských hornin v Repešském žlebu na Stínavě, Drahanská vrchovina, Morava. *Přírodovědné Studie Muzea (Prostějov)* 12-13, 7-21.
- Goliáš V., Przylibski T.A., Lipanský T., Dohnal J., Mišta J., Nowakowski R., Tejnecký V., Mokrá Z., Vávrová J., Šimon J., Jáně Z. (2010): Prameny radioaktivních minerálních vod na území Kowary – Horní Malá Úpa. *Opera Corcontica* 47/S1. 75-90.
- Goliáš V., Tumurkhuu G., Kohn P., Šálek O., Plášil J., Škoda R., Soumar J. (2016): Construction of new houses on a uranium vein outcrop: a case study from the Czech Republic. *Nukleonika* 61(3). 343-349.
- Goliáš V., Vylita T., Třískala Z., Procházka R., Pittauerová D. (2009): Short-term radioactive disequilibrium in thermal mineral waters in Karlovy Vary (Carlsbad) spa, Czech Republic. *Radioprotection* 44/5, 155-158.
- Gomes C., Rautureau M. (eds.) (2021): Minerals *latu sensu* and human health. Benefits, toxicity and pathologies. Springer. 668s.
- Hanžl P. (1999): Geochemie devonských bazických vulkanitů u Stínavy (Drahanská vrchovina). *Přírodovědné Studie Muzea (Prostějov)* 2, 49-56. Prostějov.
- Hamrová E., Goliáš V., Petrusek A. (2010): Identifying century-old long-spined *Daphnia*: species replacement in a mountain lake characterised by paleogenetic methods. *Hydrobiologia* 643. 97-106.
- Havelcová M., Sýkorová I., René M., Mizera J., Coubal M., Machovič V., Strunga V., Goliáš V. (2022): Geology and petrography of uraniferous bitumens in permo-carboniferous sediments (Vrchlabí, Czech Republic). *Minerals* 12/5, 544.
- Horlick-Jones T., Sime J. (2004): Living on the border: knowledge, risk and transdisciplinarity. *Futures* 36, 441-456.
- Hrušková L. (2013): Prameny radioaktivních minerálních vod v oblasti Lázně Libverda – Świeradów-Zdrój. MS. Diplomová práce, PŘF UK Praha. 68s, 30příl.
- Chadima M., Melichar R. (1999): Magnetická susceptibilita kulmských drob a břidlic střední části Drahanské vrchoviny. *Přírodovědné Studie Muzea (Prostějov)* 2, 23-30. Prostějov.
- IAEA (2010): Radioelement Mapping: Basic Principles, Objectives, Guides; Technical Reports; International Atomic Energy Agency: Vienna, Austria, 2010; 123s.
- Jarka P. (2007): Uran-polymetalická mineralizace Jánské žíly, Příbram-Březové Hory, ČR: Alfa-spektrometrické stanovení radionuklidů. MS, Diplomová práce, PŘF UK. 45p., 4příl.
- Jenkins T. (2005): A brief history of semiconductors. *Physics Education* 40, 430.
- Kavková R., Vondrák D., Chattová B., Švecová E., Takáč M., Goliáš V., Štorch R., Stanghellini C., Kletetschka G. (2022): Suzdalevo Lake (Central Siberia, Russia)—A Tunguska Event-Related Impact Crater? *Frontiers in the Earth Science*. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.777631>

- Killeen, P.G., Carmichael, C.M. (1976) Determination of radioactive disequilibrium in uranium ores by alpha-spectrometry. *Papers of Geological Survey of Canada* 75, 1–17.
- Kettner R., Remeš M. (1935): Objev silurských břidlic s graptolitovou faunou na Moravě. *Věstník Královské České Společnosti Nauk, Tř. mat.-přírodověd.* 16, 1 – 11. Praha.
- Kohn P. (2015): Prameny radioaktivních minerálních vod v oblasti tanvaldského granitu. MS, Diplomová práce. PŘF UK, Praha. 34s, 2příl.
- Kohn T. (2018): Podzemní vody a lázeňské prameny Lázní Jeseník: Nová hydrogeochemická data. MS. Diplomová práce. PŘF UK Praha. 55s, 11příl.
- Košťál R. (2005): Radiometrická charakteristika, homogenita a distribuce radioaktivních komponent v odvalovém materiálu šachty č. 16 v Příbrami – Hájích. MS. Diplomová práce. PŘF UK Praha. 25s, 9příl.
- Kraft P., Marek J. (1999): Silurští graptoliti a hlavonožci z lokality Stínava – Repešský žleb (Drahanská vrchovina, Morava). *Přírodovědné Studie Muzea (Prostějov)* 2, 7-16. Prostějov.
- Krásný J. et al. (2012): Podzemní vody České republiky. ČGS Praha, 1143s.
- Krishnaswamy S., Lal D., Martin J.M., Meybeck M. (1971): Geochronology of lake sediments. *Earth Planetary Science Letters* 11, 407-414.
- Kulnicki-Goldfinger J.J. (2018): Uran w szkle historycznym. *Szkło i Ceramika* 1, 16-21.
- Lewis S.L., Maslin M.A. (2015): Defining the Anthropocene. *Nature* 519, 171-180.
- Lipanský T. (2007): Prameny radioaktivních minerálních vod v orlicko-sněžnické klenbě. MS. Diplomová práce. PŘF UK Praha. 76s, 4příl.
- Lole F.P. (1995): Uranium glass in 1817 – A pre-Riedel record. *Journal of Glass Studies* 37, 139-140.
- Lustik A. (2021): Radiohydrogeochemická charakteristika a geologická pozice vývěrů vod v kabelovém tunelu Holešovice-Čimice. MS, Bakalářská práce. PŘF UK. 32s, 3příl.
- Lustik A., Goliáš V., Cupal P., Bruthans J., Schröfel J., Kachlík V., Jílková L., Mihaljevič M. (2022): Radioaktivní prameny v Praze-Čimicích. *Zprávy o geologických výzkumech* 55/1. 27-34.
- Majer V. et al. (1981): Základy jaderné chemie, 2. vydání, SNTL/ALFA Praha.
- Maxwell, S.L. (1998) Rapid actinide-separation methods. *Radioactivity and Radiochemistry* 8, 36–44.
- Melichar R. (1999): Výsledky nového geologického mapování paleozoika na Drahanské vrchovině. *Přírodovědné Studie Muzea (Prostějov)* 2, 81-84. Prostějov.
- Melichar R., Synek M. (1998): Historie objevení a průzkumu siluru a devonu repešského pruhu na Drahanské vrchovině v okolí Stínavy a Ptení. *Přírodovědné Studie Muzea (Prostějov)* 1, 25-38. Prostějov.
- Melkov V.G., Puchalskij L.Č. (1957): Poiski mestorožděnij urana. Gosgeoltechizdat. Moskva. 219s.
- Moučka V. (1968), Laboratorní radiometrické metody. In: Karous (Ed). Radiometrie, Učební text, vydavatelství UK, Praha. 29-47.
- Nekl M. (2002): Kontaminace klatovských vozovek přírodními radionuklidy. MS. Diplomová práce. PŘF UK, Praha. 28s, 22příl.

Nekl M., Goliáš V. (2002): Contamination of roads in Klatovy by natural radionuclides from waste rock dumps of the former uranium mine Ustaleč. In: B. Kříbek & J. Zeman (Eds.): Uranium deposits: From their genesis to their environmental aspects. Proceedings. 155-156. ČGS, Prague.

Novák D. (2022): Uranové zrudnění podkrkonošského permu: Vazba radioaktivních prvků v horninách rudnického obzoru na lokalitě Vrchlabí. MS, Bakalářská práce. 49s, 1příl.

Orient J.M. (2017): Fukushima and Reflections on Radiation as a Terror Weapon. *Journal of American Physicians and Surgeons* 19(2), 48–55.

Pittauerová D. (2002): Zvětrávání uranu na historické haldě stříbrného dolu v Jáchymově. MS. Diplomová práce, PŘF UK, Praha. 40s, 20příl.

Pittauerová D., Goliáš V. (2002): Weathering of mine wastes after historical silver mining in the Jáchymov ore district (Czech Republic) and migration of uranium. In: B. Kříbek & J. Zeman (Eds.): Uranium deposits: From their genesis to their environmental aspects. Proceedings. 157-160. ČGS, Prague.

Pittauerová D., Goliáš V. (2006): Late stage of weathering of uranium ores as a waste rock after historical silver mining. In: The uranium production and raw materials for the nuclear fuel cycle – Supply and demand, economics, the environment and energy security. IAEA, Vienna. 272-276.

Pittauerová D., Dohnal J., Goliáš V., Jáně Z. (2003): Poznatky komplexního geofyzikálního měření v prostoru historické šachty Geister u Jáchymova. *Uhlí, rudy, geologický průzkum* 10. 25–29.

Plášil J., Čejka J., Sejkora J., Škácha P., Goliáš V., Jarka P., Laufek F., Jehlička J., Němec I., Strnad L., 2010. Widenmannite, a rare uranyl lead carbonate: occurrence, formation and characterization. *Mineralogical Magazine* 74, 1. 97-110.

Procházka R. (2002): Přírodní koroze historických skel barvených sloučeninami uranu. MS. Diplomová práce. PŘF UK Praha. 41s, 17příl.

Procházka R., Goliáš V., Hlásenský I., Strnad L., Lněničková J. (2002): Natural corrosion of old potash glass coloured with uranium compounds. *Ceramics-Silikáty* 46(3). 86-96.

Procházka R. (2007): Natural corrosion of the uranium-colored historical glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids* 353(18-21). 2052-2056.

Procházka R. (2009): Dlouhodobá přírodní koroze skel barvených uranem. MS. Disertační práce. PŘF UK. 70s, 12příl.

Procházka R., Ettler V., Goliáš V., Klementová M., Mihaljevič M., Šebek O., Strnad L. (2009): A comparison of natural and experimental long-term corrosion of uranium-colored glass. *Journal of Non-Crystalline Solids* 355(43-44). 2134-2142.

Robbins J.A. (1978): Geochemical and geophysical applications of radioactive lead. In: The biogeochemistry of lead in the environment, Ed. J. Nriagu. Elsevier, Amsterdam, 285-293.

Robbins J.A., Edgington D.N. (1975): Determination of recent sedimentation rates in Lake Michigan using Pb-210 and Cs-137. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 39, 285-304.

Roberts N.M.W., Drost K., Horstwood M.S.A., Condon D.J., Chew D., Drak, H., Milodowski A.E., McLean N.M., Smye A.J., Walker R.J., Haslam R., Hodson K., Imbe, J., Beaudoin N., Lee, J. K. (2020): Laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS) U–Pb carbonate geochronology: strategies, progress, and limitations. *Geochronology* 2, 33–61.

Roll M. (2017): Stanovení stáří sekundárních minerál uranu metodou $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ na vybraných lokalitách Českého masívu. MS, Diplomová práce. PŘF UK, Praha. 44s, 1příl.

Skinner, M., Knight, D. (2016) The behaviour of selected fission products and actinides on UTEVA[®] resin. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 307, 2549–2555.

Šamonil P., Schaerzl R.J., Valtera M., Goliáš V., Baldrian P., Vašíčková I., Adam D., Janík D., Hort L. (2013): Crossdating of disturbances by tree uprooting: Can treethrow microtopography persist for 6000 years? *Forest Ecology and Management* 307, 123–135.

Škácha P. (2007): Charakteristika uran – polymetalické mineralizace Jánské žíly a přerozdělení izotopů olova do sekundárních fází, Příbram – Březové Hory, ČR. MS, Diplomová práce. PŘF UK Praha. 41s, 4příl.

Škácha P., Goliáš V., Sejkora J., Plášil J., Strnad L., Škoda R., Ježek J. (2009)? Hydrothermal uranium-base metal mineralization of the Jánská vein, Březové Hory, Příbram, Czech Republic: lead isotopes and chemical dating of uraninite. *Journal of Geosciences* 54, 1–13.

Taekema S., van Klink B. (2011): On The Border: Limits and possibilities of interdisciplinary research. In: B.M.J. van Klink & H.S. Tekema (eds.), Law and method. Interdisciplinary research into law. Tübingen: Mohr Siebeck, 7–32.

Tayebi A., Tayebi M., El Maghraoui M. (2019): Emanometry detection of radon abnormal contacts nasked in the plain of gharb. *International Journal of Civil Engineering and technology* 10, 282–288.

Třískala Z. (2008): Krátkodobá radioaktivní nerovnováha termálních minerálních vod v Karlových Varech. MS. Diplomová práce. PŘF UK Praha. 36s, 23příl.

Tumurkhuu G. (2016): Geologický a geofyzikální průzkum kokonínského zlomu pro stavební pozemky (Jablonec n. Nisou, ČR). MS. Diplomová práce, PŘF UK, Praha. 36s, 8příl.

Turnová Š. (2019): Léčivé radioaktivní prameny v oblasti Skalná – Bad Brambach. MS. Diplomová práce. PŘF UK Praha. 69s, 2příl.

Vaněk A., Vejvodová K., Mihaljevič M., Ettler V., Trubač J., Vaňková M., Goliáš V., Teper L., Sutkowska K., Vokurková P., Penízek V., Zádorová T., Drábek O., (2021): Thallium and lead variations in a contaminated peatland: A combined isotopic study from a mining/smeltering area. *Environmental Pollution* 290. 117973.

Vopat M. (2018): Uran v historických keramických glazurách: Stanovení detekcí alfa záření, porovnání s dalšími metodami. MS, Bakalářská práce, PŘF UK Praha. 38s, 3příl.

Zákon č. 164/2001 Sb: Zákon o přírodních léčivých zdrojích, zdrojích přírodních minerálních vod, přírodních léčebných lázních a lázeňských místech a o změně některých souvisejících zákonů („lázeňský zákon“).

Zhang Y., Lu K.T., Zheng R. (2022): Synthetic uranium oxide hydrate materials: Current advances and future perspectives. *Dalton Transactions* 51, 2158–2169.

Zuna M., Mihaljevič M., Šebek O., Ettler V., Handley M., Navrátil T., Goliáš V. (2011): Recent lead deposition trends in the Czech Republic as recorded by peat bogs and tree rings. *Atmospheric Environment* 45, 28. 4950–4958.

Žídková V. (2009): Alfaskopmetrické stanovení izotopů radia v minerálních vodách karlovarské termy. MS. Diplomová práce. PŘF UK Praha. 39s, 3příl.