

Časopriestor Spacetime

21. 6/2022
ISSN 2730-0110

Interaktívne vedecko-popularizačné médium významných autorov a vedeckých pracovníkov
Interactive popular science medium of important authors and scientists

Prof. RNDr. **Pavel Povinec**, DrSc.

Univerzita Komenského, Fakulta matematiky, fyziky a informatiky,
Katedra jadrovej fyziky a biofyziky

Rádioizotopová historiografia

Od astrofyziky

ku archeológii

Obsah

3	Prof. RNDr. Pavel Povinec, DrSc.
5	Abstrakt
6	Abstract
7	Rádioizotopy v astrofyzike
9	Rádioizotopy vo výskume klimatických zmien
12	Rádioizotopová oceánológia
14	Rádioizotopové datovanie vína
15	Rádiouhlíkové datovanie v archeológii
17	Nové metódy analýzy rádioizotopov
24	Podakovanie
24	Literatúra
26	Významné publikácie autora
27	Najcitovanejšie publikácie autora

Časopriestor // Spacetime

Interaktívne vedecko-popularizačné médium významných autorov a vedeckých pracovníkov.

Šéfredaktor: Dr.h.c. mult. prof. PhDr. Ing. Štefan Kassay, DrSc.

Recenzent a editor: Dr.h.c. mult. prof. Ing. Štefan Luby, DrSc.

Grafická úprava: Dušan Ščepka.

Za odborný obsah materiálov zodpovedá autor.

Vydavateľ: INTERCEDU, a.s., Moyzesova 4/A, 902 01 Pezinok, Slovenská republika

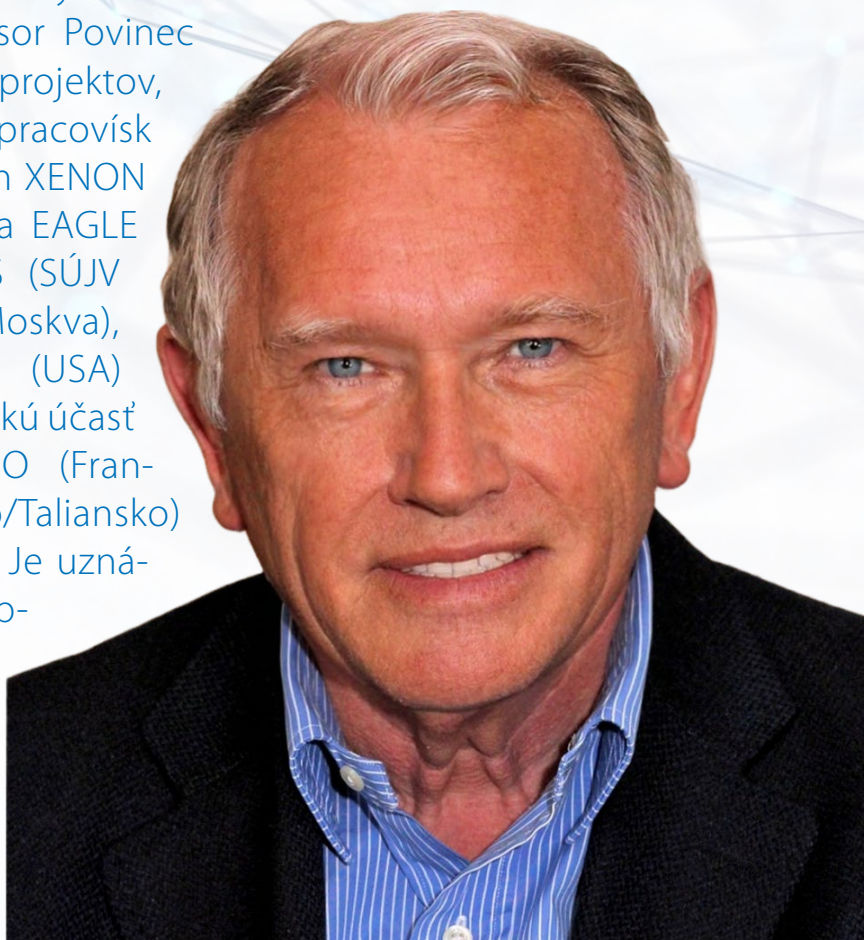
ISSN 2730-0110

Prof. RNDr.

Pavel Povinec,

DrSc.

Pavel Povinec absolvoval štúdium na Prírodovedeckej fakulte UK v roku 1965 ako jeden z prvých absolventov novej špecializácie Jadrová fyzika. V tom istom roku začal pracovať na fakulte ako asistent, v roku 1978 sa stal docentom a v roku 1984 profesorom. Na novovzniknutej Matematicko-fyzikálnej fakulte UK zastával funkciu vedúceho Katedry jadrovej fyziky a funkciu prvého prodekana fakulty. V roku 1992 získal ako prvý (a posledný) zástupca Československa vedúcu pozíciu v Medzinárodnej agentúre pre atómovú energiu (IAEA, International Atomic Energy Agency), kde zastával funkciu riaditeľa Laboratória pre morskú rádioaktivitu v Monaku. Tu sa venoval tiež oceánografickému výskumu, zorganizoval a zúčastnil sa viacerých oceánografických expedícií a stal sa prvým slovenským oceanológom. Po ukončení misie v Monaku sa v roku 2005 vrátil na Fakultu matematiky, fyziky a informatiky UK, kde je profesorom na Katedre jadrovej fyziky a biofyziky a významne sa zaslúžil o vybudovanie nového Centra pre nukleárne a urýchľovačové technológie (CENTA). Profesor Povinec viedol 9 medzinárodných projektov, ako aj účasť slovenských pracovníkov na zahraničných projektoch XENON (LNGS, Taliansko), DELPHI a EAGLE (CERN), HYPERON a ARES (SÚJV Dubna), LUNA (GEOKHI, Moskva), AUSTRON (Viedeň), SDC (USA) a v súčasnosti vedie slovenskú účasť na projektoch SuperNEMO (Francúzsko), CRESST (Nemecko/Taliansko) a LEGEND (USA/Taliansko). Je uznávaným odborníkom v oblasti výskumu zriedkavých jadrových procesov a environmentálnej fyziky a patrí medzi zakladateľov týchto odborov na Slovensku.



Rádioaktivita je hlavnou doménou jeho výskumu a aplikácií. Vybudoval viaceré laboratória na UK, ako aj v IAEA Monako, ktoré patria medzi svetovú špičku. Prispel k získaniu nových poznatkov o jadrových premenách a o jadrových procesoch. Vyvinul nové typy detektorov a nové metódy merania veľmi nízkych rádioaktivít. Prispel k výskumu mesačných vzoriek a meteoritov, vrátane meteoritov z Marsu a z Mesiaca. Získal nové poznatky o rádioaktivite životného prostredia – napr. UK má vo svete druhý najdlhší, 55-ročný rad C-14 pozorovaný v atmosfére. Ďalej prispel k objavu 11-ročného slnečného cyklu C-14 v biosfére, získal nové poznatky o vplyve jadrových elektrární na ich okolie, o radiačnom dopade havárií v Černobyle a Fukušime, o charakteristikách podzemných vôd, o variáciách izotopov v moriach a oceánoch, atď. Všetky tieto poznatky prispeli k lepšiemu pochopeniu jadrových a environmentálnych procesov a k širšiemu využitiu izotopov ako prírodných stopovačov. Opublikoval vyše 800 vedeckých článkov, z toho vyše 400 v karentovaných časopisoch, na ktoré je vyše 12 000 citácií. Jeho Hirschov index je 57. Podľa Academic Research patrí medzi top 10 autorov z environmentálnej fyziky. Je spoluautorom 14 monografií a 11 kapitol publikovaných v zahraničných vydavateľstvách. V roku 2014 získal so spoluautormi K. Hirosem a M. Aoyamom za monografiu *Fukushima Accident: Radioactivity Impact on the Environment*, ktorú vydalo nakladateľstvo Elsevier, ako prvý slovenský autor cenu American Publishers Awards for Professional and Scholarly Excellence (knižný Oscar). Je editorom a členom redakčných rád 6 medzinárodných časopisov. Ako editor spracoval 17 špeciálnych čísiel vedeckých časopisov a zborníkov zameraných na zriedkavé jadrové procesy a environmentálnu rádioaktivitu. Predniesol vyše 50 pozvaných referátov na významných medzinárodných konferenciách, spoluorganizoval 12 medzinárodných konferencií a spolupracoval pri organizovaní 26 konferencií ako vedúci odborných sekcií a člen vedeckých výborov. Prednášal jadrovú a environmentálnu fyziku, viedol 20 diplomových prác a vychoval 26 doktorandov/kandidátov vied. Prednášal tiež na viacerých zahraničných univerzitách a výskumných centrách (napr. v Nice, Bologni, Seattle, Oxforde, Livermoore, Petrohrade, Tbilisi). Bol členom vedeckých rád UK, FMFI UK, MFF UK, PriF UK, EF SVŠT, FÚ SAV, členom Vedeckej rady SÚJV Dubna, členom komisie IUPAC pre štandardy, členom výkonného výboru Europhysical Society, členom výboru World Council on Isotopes, vice-prezidentom IAHS Commission for Groundwater-Seawater Interactions, členom výboru European Energy Association. Okrem domácich vyznamenaní (napr. UK, MFF UK, PriF UK, JČSMF, JSMF, ČVUT, EF SVŠT, atď.) získal viacero zahraničných medailí a ocenení, napr. bol členom IAEA tímu, ktorý získal v roku 2005 Nobelovu cenu mieru, získal ceny a medaily z IAEA (Viedeň), UNEP (New York), UNESCO (Paríž), FAO (Rím), CEA (Paríž), Univerzita v Tbilisi, atď.

Abstrakt

Rádioaktívne izotopy predstavujú unikátne stopovače environmentálnych procesov, zahŕňujúce nielen procesy ich vzniku (napr. ich produkcie kozmickým žiarením), ale tiež ich šírenie v atmosfére a v ďalších zemských rezervoároch až po ich finálne uloženie v izotopových archívoch, ktoré zaznamenávajú ich časový vývoj (ako sú letokruhy stromov, stalagmity/stalaktity, koraly, sladkovodné a morské sedimenty, ľadovce, a pod.). V prípade kozmických objektov sú to povrchy planét (napr. Mars, ale tiež Mesiac), asteroidy a meteority, ktoré po ich páde na zemský povrch uchovávajú informácie o ich vzniku. Rádioizotopy preto nachádzajú široké využitie v astrofyzike (napr. vo výskume kozmického žiarenia a jeho variácií), vo výskume klimatických zmien a iných environmentálnych procesov, pri výskume znečistenia životného prostredia, pri datovaní geologických procesov, ako aj pri datovaní historických a archeologických objektov. Vzhľadom na veľmi obsiahlu problematiku, budeme sa zaoberať len vybraným okruhom tém, napr. environmentálnu rádioaktivitu obmedzíme na minimum (viď napr. Povinec et al., 2013, 2021a). Na Fakulte matematiky, fyziky a informatiky Univerzity Komenského vzniklo Centrum pre nukleárne a urýchľovačové technológie (CENTA), ktoré umožňuje využívať nové iónové technológie – analýza pomocou iónových zväzkov (IBA – Ion Beam Analysis), a urýchľovačová hmotnostná spektrometria (AMS – Accelerator Mass Spectrometry), na analýzu vzoriek rôzneho pôvodu a spolu s rádiometrickými metódami (gama-spektrometria a iné) realizovať rádioizotopový výskum vo viacerých vedných odboroch.

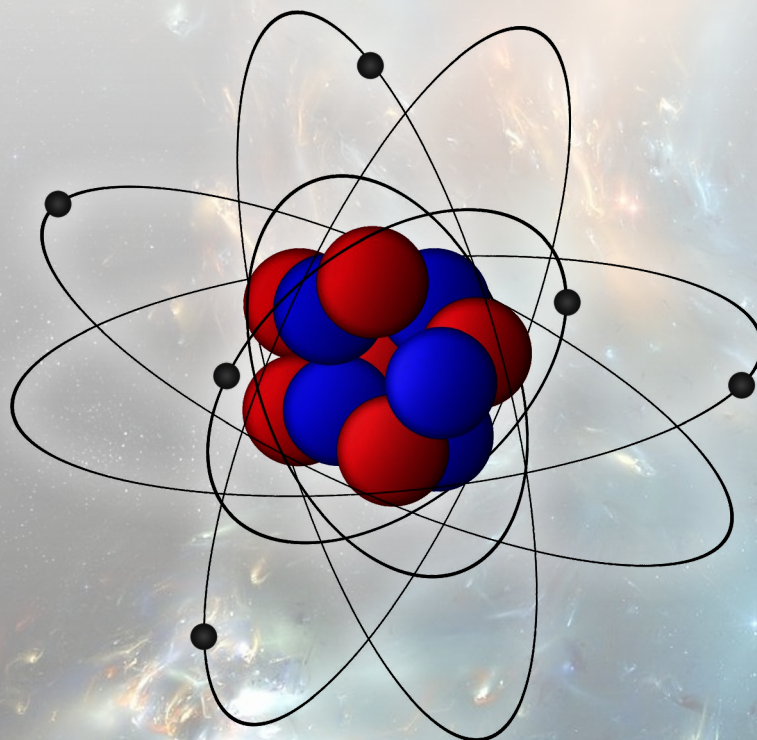
Kľúčové slová: rádioizotopy, uhlík-14, berýlium-10, alumínium-26, kobalt-60, cesium-137, kozmické žiarenie, meteority, klimatické zmeny, cykly slnečnej aktivity, letokruhy stromov, ľadovce, Malá doba ľadová, rádioizotopová oceánológia, svetový oceán, morská voda, datovanie vín, datovanie slovenských kostolov



Abstract

Radioactive isotopes represent unique tracers of environmental processes which include not only processes of their formation (e.g., their production by cosmic radiation), but also their propagation in the atmosphere and in other earth reservoirs, up to their final deposition in isotope archives which register their time development (e.g., tree rings, stalagmites/stalactites, corals, fresh water and marine sediments, and glaciers). In the case of space objects, they include surfaces of planets (e.g., Mars, but also Moon), asteroids and specifically meteorites, which after their fall on the earth surface keep information on their origin. They find wide applications in astrophysics (e.g., in investigations of cosmic radiation and its variations), in climate change and other environmental studies, including environmental contamination, in radioisotope dating of geological processes, as well as of historical and archaeological objects. Because of very comprehensive topics we shall focus only on selected themes, e.g., environmental radioactivity we shall restrict on the minimum (see e.g., Povinec et al., 2013, 2021a). A Centre for Nuclear and Accelerator Technologies (CENTA) has been recently established at the Faculty of Mathematics, Physics and Informatics of the Comenius University which afford opportunity to use new ion technologies (ion beam analysis, IBA, and accelerator mass spectrometry, AMS) for analysis of samples of various origin, and together with radiometric methods (gamma-spectrometry and others) to carry out radioisotope research in several scientific fields.

Keywords: *radioisotopes, carbon-14, beryllium-10, aluminium-26, cobalt-60, cesium-137, cosmic rays, meteorites, climate change, solar activity, sunspot numbers, solar activity cycles, tree rings, Little ice age, radioisotope oceanology, world oceans, seawater, dating of wines, dating of Slovak churches*

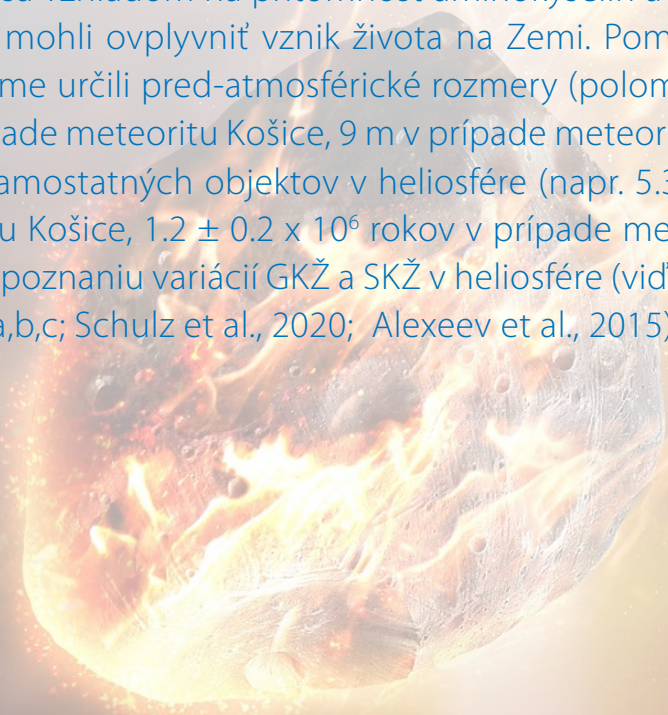


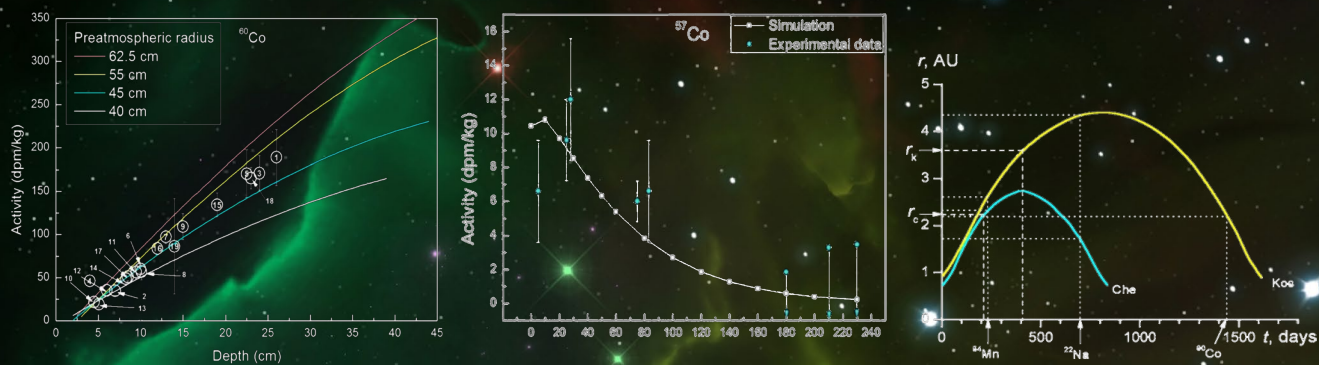
Rádioizotopy v astrofyzike

Významnú súčasť astrofyziky tvorí výskum kozmického žiarenia a jeho časových variácií ako aj priestorových variácií v heliosfére. Najbližším zdrojom kozmického žiarenia je Slnko (slnečné kozmické žiarenie, SKŽ), ktoré počas erupcií emituje prevažne protóny o strednej energii okolo 100 MeV (maximálna energia je do 1 GeV). Slnko súčasne významne ovplyvňuje (v dôsledku zmien v jeho aktivite) tok galaktického kozmického žiarenia (GKŽ) (90 % protóny a 10 % jadrá) v heliosfére, kde energie protónov dosahujú hodnoty až 10^{17} eV. Extragalaktické kozmické žiarenie predstavuje častice s energiou nad 10^{17} eV).

Rádioizotopy prispievajú v oblasti výskumu supernov, keď rádioaktívne jadrá (napr. Fe-60, polčas premeny 2,6 miliónov rokov), emitované počas výbuchov supernov, sú transportované v kozmickom priestore až do zemskej atmosféry a potom sú deponované v morských sedimentoch alebo v Fe-Mn krustách. Za posledných 10 miliónov rokov boli zaznamenané niekoľkonásobné výbuchy supernov vo vzdialenostiach pod 100 parsec.

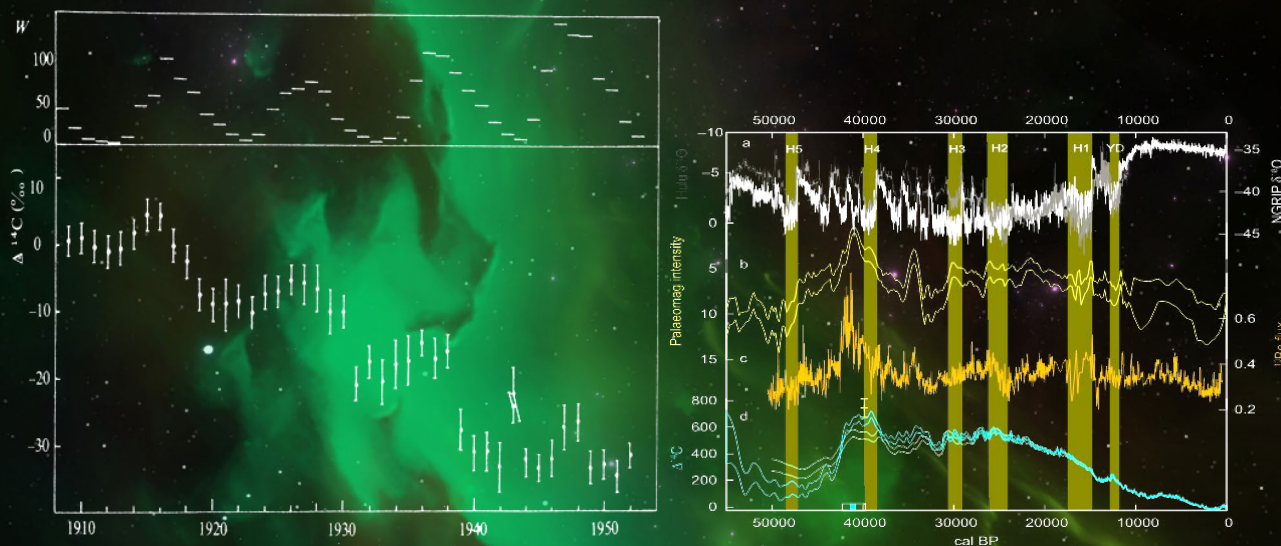
Druhá oblasť využitia rádioizotopov je vo výskume kozmogénnych rádioizotopov v meteoritoch, ktoré vznikajú ako výsledok interakcií častíc predovšetkým primárneho GKŽ s meteoritmi (ale tiež s povrchmi planét, Mesiaca a asteroidov), ale čiastočne tiež v dôsledku interakcií slnečných protónov s týmito telesami. Ako príklad môžeme uviesť náš najnovší výskum rádioaktivity meteoritov-chondritov (obr. 1) (Košice a Čeljabinsk), ale tiež meteoritov z Marsu (Tissint, Chassigny, Nakhla) a z Mesiaca (Oued Awlitis 001, Galb Inal), ako aj železných meteoritov (napr. Smolenice, Potůčky). Patrí sem aj nedávno spadnutý meteorit Winchcombe (uhlíkatý chondrit), ktorý sa vzhľadom na prítomnosť aminokyselín a vody považuje za typ meteoritov, ktoré mohli ovplyvniť vznik života na Zemi. Pomocou kozmogénnych rádioizotopov sme určili pred-atmosférické rozmery (polomery) meteoritov (napr. 50 ± 5 cm v prípade meteoritu Košice, 9 m v prípade meteoritu Čeljabinsk), ich expozičné veky ako samostatných objektov v heliosfére (napr. $5.3 \pm 0.1 \times 10^6$ rokov v prípade meteoritu Košice, $1.2 \pm 0.2 \times 10^6$ rokov v prípade meteoritu Čeljabinsk), a prispeli sme tiež k poznaniu variácií GKŽ a SKŽ v heliosfére (viď napr. Povinec et al. 2009, 2015a,b, 2020a,b,c; Schulz et al., 2020; Alexeev et al., 2015).





Obr. 1: Kozmogénne rádioizotopy v meteoritoch (vľavo – Monte Carlo simulácie a analýzy Co-60 v meteorite Košice; uprostred – Monte Carlo simulácie a analýzy Al-26 v meteorite Čeljabinsk; vpravo – produkcia rádioizotopov v meteoritoch Čeljabinsk a Košice). Upravené podľa Povinec et al., 2015a,b; Alexeev et al., 2015.

Ako príklad využitia kozmogénnych rádioizotopov na výskum SKŽ (okrem povrchových vzoriek z Mesiaca a perspektívne aj z Marsu, pretože vrchná vrstva meteoritov je v dôsledku ablácie v atmosfére zvyčajne odstránená) možno uviesť výskum uhlíka-14 (C-14) v letokruhoch stromov, ktoré môžu zaznamenať erupcie slnečných protónov do zemskej atmosféry. Tomuto výskumu je v súčasnosti venovaná veľká pozornosť, pretože umožňuje získať informácie o slnečnej aktivite za posledných 10 000 rokov. Exotickými vzorkami na výskum slnečnej aktivity sú aj vzorky starých vín, kde sme ako prví zaregistrovali slnečnú erupciu protónov v roku 1942, ktorá bola zaznamenaná v letokruhu v roku 1943 (obr. 2).



Obr. 2. Vľavo: Variácie koncentrácie C-14 vo vzorkách gruzínskych vín, ktoré jednak potvrdzujú existenciu 11-ročného slnečného cyklu v biosfére, ale tiež zvýšenie C-14 koncentrácie (1943) v dôsledku emisie slnečných protónov počas erupcie (upravené podľa Burchuladze et al., 1980). Vpravo: a) Priebeh záznamov O-18 (indikuje zmeny teploty v Grónskom ľade), d) C-14 (o/oo), c) Be-10 (10^6 st/cm².rok) a b) intenzity geomagnetického poľa za posledných 50 000 rokov (prevzaté od Reimer et al., 2020). (BP – before present, t. j. pred rokom 1950).

Rádioizotopy vo výskume klimatických zmien

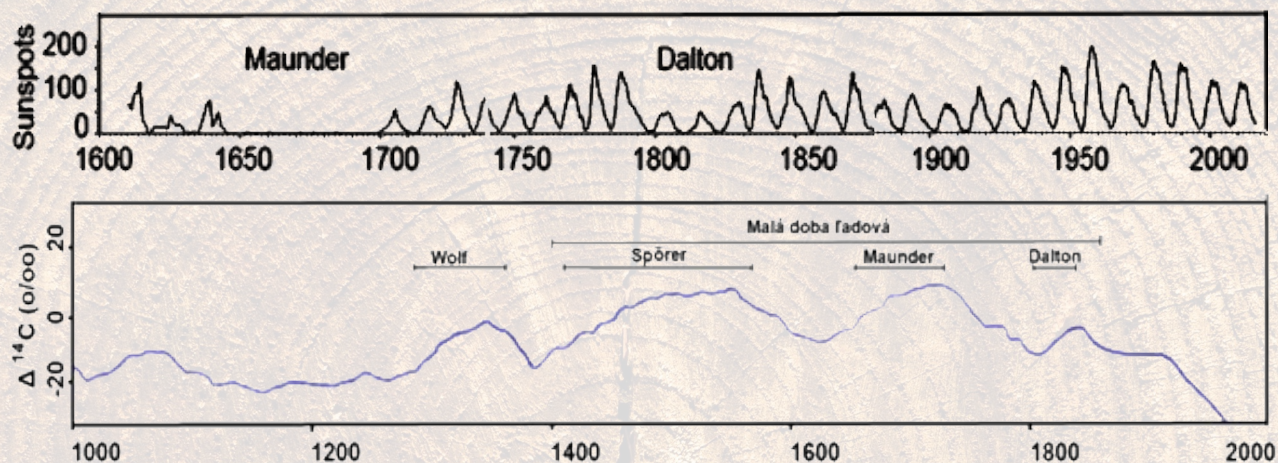
Typickým príkladom je výskum klimatických zmien pomocou rádioizotopu C-14, ktorý má polčas premeny 5 730 rokov. Kozmogénny C-14, ktorý vznikne v zemskej atmosfére v dôsledku interakcií sekundárnych častíc kozmického žiarenia (najmä neutrónov) s atómami vzduchu (dusík a kyslík), oxiduje na CO₂, ktorý sa v dôsledku výmenných procesov dostáva do biosféry a do oceánov. Preto napr. v letokruhoch stromov nachádzame C-14 v koncentrácii, ktorá zodpovedá tej, ktorá bola v atmosfére, keď letokruh rástol. Okrem analýzy C-14 v letokruhoch stromov za posledných 10 tisíc rokov možno využiť aj iné vzorky, ktorých vek je starší, ako sú napr. stalagmity/stalaktity, koral, sedimenty, a pod., čím možno vybudovať časovú škálu za posledných 50 tisíc rokov (obr. 2).

Druhým vhodným kozmogénnym rádioizotopom je Be-10, ktorý má polčas premeny 1,6 milióna rokov a ktorý vzniká v atmosfére v trieštivých reakciách častíc kozmického žiarenia s atómami atmosféry. Po vzniku sa prichytí na aerosóly, a v dôsledku gravitácie sa dostane na zemský povrch a do oceánov. Vhodnými vzorkami (archívami Be-10) sú ľadovce a morské sedimenty, ktoré umožňujú získať časové škály jeho koncentrácie počas doby okolo 2 miliónov rokov.

Ako príklad uvádzame na Obr. 2 priebehy záznamov O-18 (indikuje teplotu; ľadový vrt v Grónsku), C-14, Be-10 a intenzitu geomagnetického poľa za posledných 50 000 rokov. Najdôležitejšie zistenie je, že teplota počas Holocénu (posledných 11 000 rokov) bola nad normál, s absenciou ľadových dôb, ktoré boli často pozorované v minulosti (medzi 11 000 až 50 000 rokmi). Súhlas medzi C-14 a Be-10 záznamami je pozoruhodný, a súčasne potvrdzuje význam zmien intenzity geomagnetického poľa na ich produkciu, pretože ovplyvňujú tok častíc galaktického kozmického žiarenia, ktoré dopadajú do atmosféry (Reimer et al., 2020).



Bližší pohľad na koniec Holocénu ukazuje, že teplé obdobie (+0.3 °C) v rokoch 1150 - 1350 (tzv. Stredoveká klimatická anomália) vystriedala Malá doba ľadová v rokoch 1400 - 1830 (pokles teploty o -1 °C). Porovnanie so slnečnou aktivitou v tomto období (priame porovnanie je možné len od roku 1610, keď sa začali zaznamenávať počty škvŕn na Slnku) ukazuje, že veľké minimum slnečnej aktivity (Maunderovo minimum) korešponduje s teplotným minimom Malej doby ľadovej v období rokov 1650 - 1700. Malá doba ľadová zahŕňa však okrem Maunderovho minima aj ďalšie dve veľké minimá slnečnej aktivity, konkrétne Daltonovo minimum (1798 - 1822) a najmä časovo najdlhšie Spörerovo minimum (1416 - 1534), čo zdôrazňuje vplyv slnečnej aktivity na klimatický vývoj počas Malej doby ľadovej, a vplyv Slnka na vývoj klímy preto nemožno podceňovať. Stredovekú klimatickú anomáliu oddeľuje od Malej doby ľadovej ďalšie veľké minimum slnečnej aktivity, Wolfovo minimum (1282 - 1342). Časová poloha Spörerovho a Wolfovho minima bola určená na základe porovnania výpočtov produkcie C-14 v atmosfére od Maunderovho minima po súčasnosť a jej predikcie pred Maunderovo minimum (Brehm et al., 2021).



Obr. 3. Hore: Priebeh slnečnej aktivity podľa pozorovaného stredného počtu slnečných škvŕn, ktorý dokumentuje existenciu 11-ročných a približne 100 ročných slnečných cyklov – Daltonovo minimum (1798-1822), Maunderovo minimum (1645-1715; v tomto období bol nameraný počet slnečných škvŕn zanedbateľný). Dole: Priebeh C-14 (spriemerované dáta) v letokruhoch stromov za posledných 1000 rokov s indikáciou C-14 maxím, ktoré korešpondujú s minimami slnečnej aktivity (upravené podľa Brehm et al., 2021).

Ako vidieť z obr. 3, veľké minimá slnečnej aktivity korešpondujú so zvýšeným obsahom C-14 v biosfére (v letokruhoch stromov). Táto antikorelácia medzi zníženou slnečnou aktivitou a zvýšenou produkciou C-14 v atmosfére súvisí s tým, že v čase slnečného minima je v heliosfére zvýšený tok častíc GKŽ, pretože nie je ovplyvňovaný zníženou intenzitou slnečného vetra (modulácia GKŽ absentuje, resp. je znížená, Ross and Chaplin, 2019). Súčasne možno pozorovať, že C-14 maximá zostávajú za minimami slnečnej aktivity o niekoľko rokov, čo je spôsobené časovým posunom od produkcie C-14 v atmosfére do jeho prechodu do biosféry, ako to už bolo pozorované skôr v prípade vzoriek vín a letokruhov stromov počas 11-ročných slnečných cyklov začiatkom 20. storočia (Burchuladze et al., 1980, 1988; Povinec et al., 1983; Attolini et al., 1989).

Slnko a jeho aktivita v minulosti teda významne ovplyvňovali klimatické pomery na Zemi. Z Obr. 3 vidieť, že slnečná aktivita od Gleissbergovho minima (1889 - 1901) postupne narastala, dosiahla pík okolo roku 1960, avšak centennial minimum očakávané okolo roku 2000 nebolo zatiaľ dosiahnuté, pretože stredné počty slnečných škvŕn v 11-ročných maximách po roku 2000 stále presahujú hodnotu 100 a predikcia pre prebiehajúci 11-ročný cyklus (č. 27) je podobná. Veľké slnečné minimum teda mešká, a bude preto veľmi zaujímavé ako sa slnečná aktivita bude vyvíjať v budúcnosti.

V súčasnosti sú diskutované najmä otázky antropogénnych príčin zmeny klímy v dôsledku zvyšovania koncentrácie skleníkových plynov v atmosfére, ktoré sú považované za najvýznamnejší klimatický efekt Antropocénu (nové geologické obdobie po Holocéne). Veľa otázok však stále zostáva neobjasnených, ako je napríklad pokles strednej povrchovej teploty v rokoch 1940 až 1980, hoci koncentrácia CO₂ v atmosfére narastala, až po súčasné hodnoty okolo 415 ppm oproti pôvodným 280 ppm, ktorá bola v predindustriálnom období. Ďalší vývoj klímy na Zemi bude preto veľmi zaujímavý – či sa podarí zastaviť nárast antropogénnych skleníkových plynov (ale tiež či bude narastať koncentrácia metánu v dôsledku topenia permafrostu), a ako ďalší klimatický vývoj ovplyvnia prírodné (najmä astronomické) javy, vrátane poklesu slnečnej aktivity, vzniku malých ľadových dôb, a pod.



Rádioizotopová oceánológia

Veľa rádioizotopov, ktoré nachádzajú uplatnenie v pozemskom výskume, našli uplatnenie aj v oceánológii (Povinec et al., 2020d). Medzi najčastejšie používané patria H-3, Be-10, C-14, Mn-53, I-129, izotopy uránu a tória (a ich rozpadových radov) a transurány. Pričinili sme sa tiež o využitie stabilných izotopov, ako sú H-2 a O-18, vo výskume charakteristík morskej vody. Uvedieme aspoň jednu aplikáciu na využitie rádioizotopov v oceánológii, ktorú bolo možné realizovať vďaka vývoju nových rádioanalytických metód:

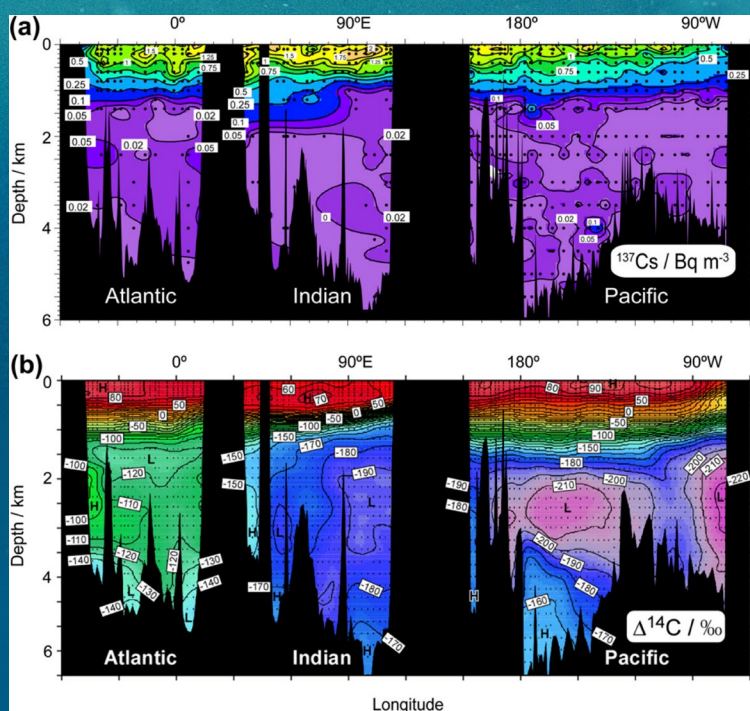
- AMS v prípade analýzy C-14 (antropogénny pôvod v povrchových vodách zo skúšok jadrových zbraní v atmosfére, a kozmogénny v hlbokých vodách), kde vďaka vysokej citlivosti stačilo na analýzu štvrt decilitra vody, oproti 100-200 L potrebným pri použití radiometrických metód;
- podzemná gama-spektrometria v prípade analýzy Cs-137 (antropogénny pôvod), kde stačilo na analýzu 10 L vody, oproti 200-400 L potrebných pre gama-spektrometriu v povrchových laboratóriách.

V rámci spoločného projektu SHOTS s účasťou Japonska, IAEA a Slovenska, bola v rokoch 2003 - 2004 realizovaná globálna oceánografická expedícia BEAGLE-2003 (Blue Ocean Global Expedition), ktorej cieľom bolo odobrať povrchové a hlbkové vzorky morskej vody pozdĺž celej zemepisnej šírky 20 °S, s cieľom získať nové informácie o procesoch v morských vodách a ich pozdĺžnom a hlbkovom transporte (až na morské dno), ktoré sú dôležité pre ďalší výskum dopadu klimatických zmien na oceány.

Na obr. 4 sú znázornené hlbkové profily Cs-137 a C-14 vo vodách oceánov, ktoré predstavujú prvé výsledky globálnej rádioizotopovej oceánológie (Aoyama et al., 2011). C-14 profily ukazujú na účinnú sekvestráciu CO₂ z povrchových do hlbkových vôd (najmä v Tichom a Indickom oceáne), ktorá je mimoriadne dôležitá pre znižovanie obsahu CO₂ v atmosfére, čo je kľúčový faktor pre budúci vývoj klímy na Zemi. V prípade Cs-137 sú to súčasne prvé morské mapy detailných profilov, ktoré bolo možné uskutočniť vďaka jeho analýzám v podzemných laboratóriách. Výsledky ukázali, že na rozdiel od C-14, Cs-137 nie je rovnomerne rozšírený v povrchových vodách, čo reflektuje globálny spád zo skúšok jadrových zbraní. V Atlantickom a Tichom oceáne sme pozorovali rýchly transport Cs-137 na morské dno, na rozdiel od Indického oceánu, kde sa vytvára finálne prírodné úložisko morského odpadu (Povinec et al., 2011). Z ďalších dôležitých výsledkov je zistenie, že dochádza k merateľnému zvýšeniu teploty morskej vody aj v najväčších hĺbkach pri morskom dne, čo je prekvapením, pretože vek takýchto vôd je okolo 1000 rokov. Dosiahnuté výsledky boli publikované v špeciálnom čísle časopisu Progress in Oceanography, 89, 2011.

Zaujímavý oceánografický výskum sme robili tiež v severozápadnom Tichom oceáne (obr. 5) s cieľom získať informácie o pohybe vôd kontaminovaných po dumpingu rádioaktívneho odpadu, ako aj o prenose plutóniom kontaminovaných vôd z vojenskej základne na ostrove Bikini do severnej časti oceánu (Povinec et al., 2003). Získané údaje o rádioaktivite vôd a sedimentov zohrali rozhodujúcu úlohu ako pozadové dáta pri hodnotení dopadu fukušimskej havárie na severný Tichý oceán (Povinec et al., 2013, 2021a). Podobné expedície som organizoval tiež

v južnom Tichom oceáne na ostrovoch Mururoa a Fangataufa (a v ich okolí) s cieľom získať informácie o rádioaktívnej kontaminácii prostredia po francúzskych skúškach jadrových bômb (Povinec et al., 1999).



Obr. 4. Hĺbkové profily Cs-137 a C-14 vo vodách oceánov, ktoré predstavujú prvé výsledky globálnej rádioizotopovej oceánologie (upravené podľa Aoyama et al., 2011). Zaujímavý je vznik prírodného úložiska morského odpadu v Indickom oceáne (žlté maximum okolo 90° E a hĺbke 500 m), a postupný prechod antropogénneho C-14 (CO₂ sekvestrácia) do väčších hĺbok, kde nahrádza kozmogénny C-14 (negatívne hodnoty).

vol. 6 | 2022



Obr. 5. Hore vľavo: Účastníci medzinárodnej oceánografickej expedície pod hlavičkou OSN-IAEA v Tichom oceáne (P. Povinec ako vedúci expedície v strede). Hore vpravo: P. Povinec ako vedúci IAEA tímu na expedícii okolo ostrova Bikini (výskum Pu-kontaminácie po US skúškach jadrových bômb). Dole vľavo: P. Povinec v lagúne juho-tichomorského ostrova Mururoa s pohľadom na vežu podzemnej atómovej strelnice (výskum Pu-kontaminácie po francúzskych skúškach jadrových bômb). Dole vpravo: P. Povinec po ukončení vrtu sedimentu v lagúne ostrova Mururoa.

Rádioizotopové datovanie vína

Viacere rádioizotopy môžeme využiť na datovanie organických alebo anorganických vzoriek, ako sú napr. H-3, C-14, Be-10, Al-26, K-40, Mn-53, Cs-137, atď. Medzi najčastejšie používané patrí C-14 (rádiouhlíkové datovanie), a to buď kozmogénny (datovací limit je okolo 50-tisíc rokov) alebo antropogénny (limit je niekoľko desiatok rokov).

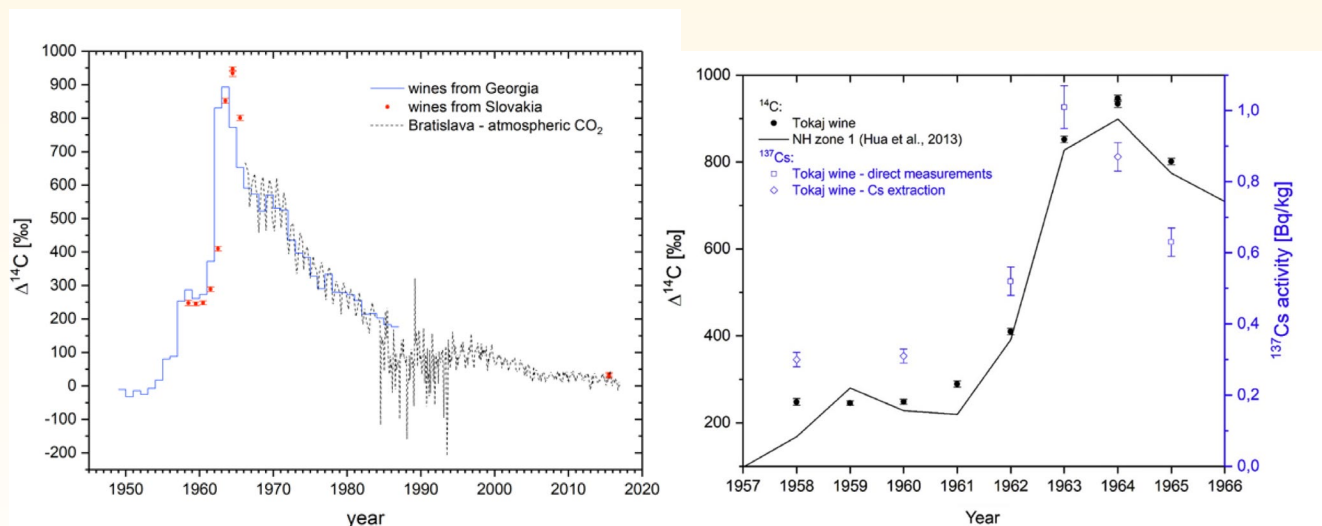
V prípade rádiouhlíkového datovania, živé organizmy (napr. človek, zvieratá, rastliny) počas svojho života prijímajú z atmosféry C-14, ktorý sa viaže do ich buniek a predstavuje tú istú koncentráciu aká je v atmosfére. Po uhynutí organizmu (napr. po zbere hrozna) sa tento transport C-14 preruší a nahromadený C-14 sa v dôsledku rádioaktívnej premeny začne premieňať na stabilný N-14 s polčasom premeny 5 730 rokov. Ak zmeriame počet atómov C-14, ktoré ešte zostali v danej vzorke, vieme vypočítať jej vek.

V prípade datovania vína využívame obidva zdroje C-14 v atmosfére:

- kozmogénny C-14, ktorý vznikol v atmosfére ako výsledok interakcií častíc kozmického žiarenia s atómami atmosféry, alebo
- antropogénny C-14, ktorý sa dostal do atmosféry po skúškach jadrových zbraní.

Rozsah datovania starých vín je najčastejšie do niekoľko sto rokov, lebo staršie vzorky nie sú často k dispozícii, hoci v Gruzínsku bola nájdená vzorka vína, ktorej vek bol určený na 8 000 rokov. Typické neurčitosti veku datovaného vína sú ± 10 rokov. Avšak kozmogénny C-14 môžeme využiť aj na precíznejšie datovanie mladších vín, keď nameranú koncentráciu C-14 porovnávame s kalibračnou C-14 krivkou.

Na datovanie vín od roku 1950 využívame antropogénny C-14, keď porovnávame jeho priebeh v atmosfére a vo víne (obr. 6) (Burchuladze et al., 1988; Povinec et al., 2020c). Pre odstránenie neurčitosti, či víno pochádza pred roka 1963 (kedy bola koncentrácia C-14 v atmosfére maximálna), alebo po ňom, využívame ďalší antropogénny rádioizotop Cs-137 (polčas premeny 30 rokov), ako vidieť z Obr. 6. Táto metóda umožňuje dosiahnuť presnosť datovania vína ± 1 rok.



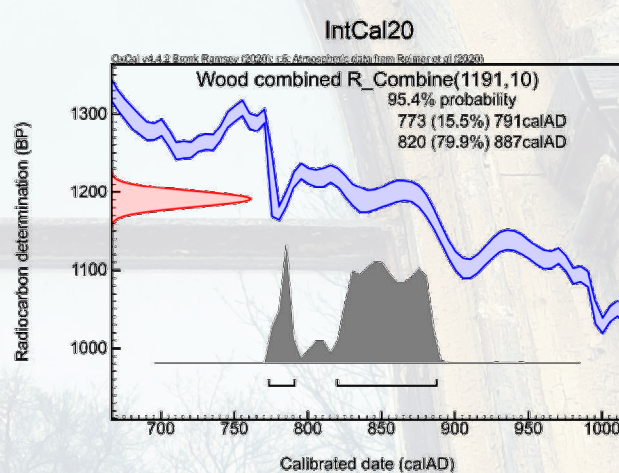
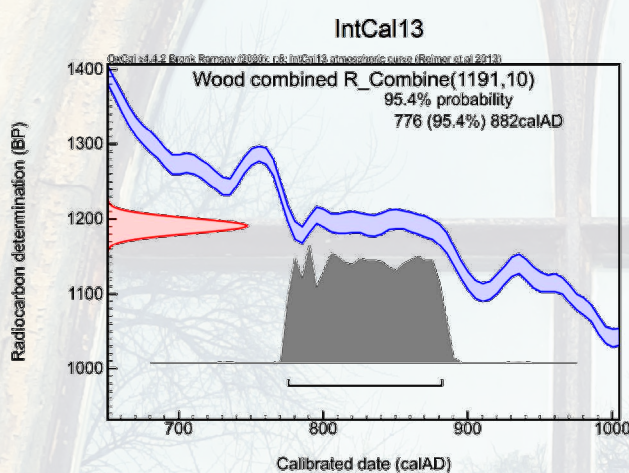
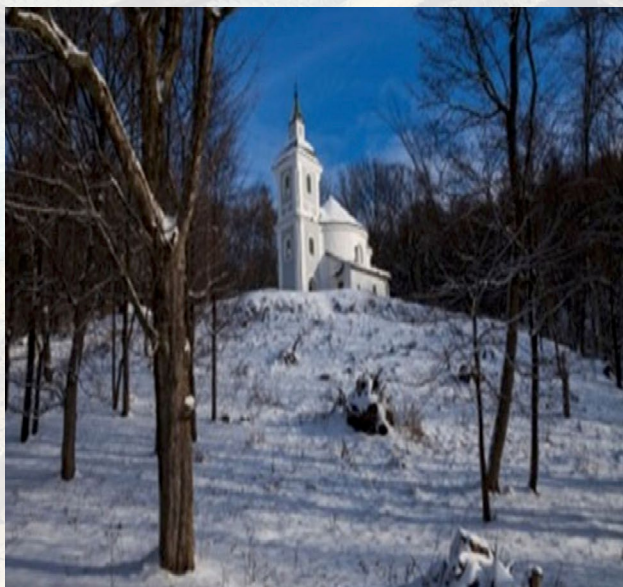
Obr. 6. Vľavo: Porovnanie koncentrácie antropogénneho C-14 v atmosfére (píky) a vo víne (body). Vpravo: Datovanie vína pomocou C-14 a Cs-137 (NH – severná pologuľa; Cs extraction – merané po separácii Cs z vína; upravené podľa Povinec et al., 2020c).

Rádiouhlíkové datovanie v archeológii

Z veľkého počtu rádiouhlíkového (C-14) datovania vzoriek rôzneho pôvodu (napr. ľudské kosti, zvieracie kosti, staré potraviny, obrazy, drevo, uhličky, malta, omietka, stalagmity/stalaktity, morská voda, morské živočíchy, sedimenty, atď.), ako príklad rádiouhlíkového datovania uvádzame výsledky rádiouhlíkových analýz vzoriek uhlikov, dreva, malty a omietky z múrov rímskokatolíckej kaplnky, Rotundy svätého Juraja pri Nitrianskej Blatnici, ako aj z Kostola sv. Margity Antiochijskej v Kopčanoch (obr. 7), pretože získané výsledky majú aj veľký historický význam.

Keďže predbežné výsledky rádiouhlíkového datovania získané v našom laboratóriu na Katedre jadrovej fyziky a biofyziky FMFI UK ukazovali, že vek Rotundy môže siahať do prvej polovice 9. storočia (pôvodné archeologické výskumy ukazovali na mladší vek), vytvorili sme medzinárodné konzorcium významných rádiouhlíkových laboratórií, aby nezávisle určilo vek Rotundy. Výsledky rádiouhlíkového konzorcia (Povinec et al., 2021b) potvrdili naše predbežné výsledky, že Rotunda bola postavená už v prvej polovici 9. storočia (830 ± 30 AD), dokonca s viac ako 80-percentnou pravdepodobnosťou určili, že Rotunda bola postavená ešte pred príchodom sv. Cyrila a Metoda na Veľkú Moravu (t. j. pred rokom 863).

Podobné (zatiaľ predbežné, ešte nepublikované) výsledky boli dosiahnuté rádiouhlíkovým datovaním vzoriek z múrov Kostola sv. Margity Antiochijskej v Kopčanoch, ktorého rekonštrukcia bola ukončená v roku 2021. Medzinárodné konzorcium rádiouhlíkových laboratórií potvrdilo, že aj tento kostol bol postavený v prvej polovici 9. storočia.



Obr. 7. Hore: Pohľad na Rotundu sv. Juraja pri Nitrianskej Blatnici a Kostol sv. Margity Antiochijskej v Kopčanoch (pred rekonštrukciou). Dole: Získané výsledky datovania Rotundy dokumentujú, že priebeh kalibračnej krivky ovplyvnil chyby výsledkov datovania. Upravené podľa Povinec et al., 2021.

AMS technológia umožnila v oboch prípadoch datovať vzorky uhlíkov o hmotnosti len niekoľko miligramov a dosiahnuť presné výsledky, čo nebolo možné predtým realizovať pomocou rádiometrických metód. Navyše, prístrojová neurčitosť výsledkov je ešte 3-krát menšia (± 10 rokov), čo je spôsobené tým, že rádiouhlíková kalibračná krivka v oblasti rokov 790 - 880 AD vykazuje plateau, hoci jej novšia verzia z roku 2020 (obr. 7 vpravo dole) je už presnejšia ako bola pôvodná z roku 2013 (obr. 7 vľavo dole). Toto je práve oblasť, ktorej sa perspektívne plánujeme ešte viac venovať, a spresnením analýz C-14 v letokruhoch stromov z tohto obdobia prispieť ku spresneniu kalibračnej krivky, a tým aj k spresneniu výsledkov datovania vzoriek z rannej histórie Slovenska.

Získané výsledky datovania oboch kostolov znamenajú, že kresťanstvo na území Slovenska (presnejšie v Nitrianskom kniežatstve) bolo rozšírené už počas panovania kniežaťa Pribinu. Určené veky oboch kostolov súčasne znamenajú, že sú to pravdepodobne najstaršie stojace sakrálne stavby nielen na území Slovenska, ale aj v celej východnej časti Strednej Európy (východne od Salzburgu).

Nové metódy analýzy rádioizotopov

Na analýzu rádioizotopov v rôznych objektoch sa tradične používajú tzv. rádiometrické metódy, ktoré využívajú na ich identifikáciu žiarenie, ktoré sprevádza ich rádioaktívnu premenu (ako je napr. alfa-žiarenie, beta-žiarenie, gama-žiarenie a röntgenové žiarenie). Takéto metódy je výhodné použiť vtedy, keď polčas rádioaktívnej premeny je krátky, napríklad do niekoľko rokov. Navyše, niektoré rádionuklidy emitujú len čisté beta-žiarenie o nízkej energii, ktoré nie je sprevádzané gama-žiarením (čo je zvyčajne najvýhodnejšia metóda registrácie rádioaktívnej premeny), čo vyžaduje špeciálne detektory s vnútornou rádioaktívnou náplňou (napr. plynovou, priamo pripravenou zo skúmanej vzorky, napr. Povinec, 1972).

Hoci využitie hmotnostných spektrometrov na analýzu stabilných izotopov (najmä vo fyzikálnych a chemických vedách) je značne rozšírené, ich použitie na analýzu rádioaktívnych izotopov, ktoré sa zvyčajne nachádzajú vo veľmi nízkych koncentráciách, je problematické pre vysoké pozadie spektrometrov.

V poslednom čase sa však objavili nové typy hmotnostných spektrometrov, ktoré tieto nedostatky čiastočne eliminujú (napr. TIMS – Thermal Ionisation Mass Spectrometer, ale najmä ICPMS – Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer), avšak pre niektoré typy rádioizotopov sa tieto spektrometre zatiaľ nedajú použiť.



Revolučným príspevkom bolo preto vyvinutie urýchľovačovej hmotnostnej spektrometrie (AMS – Accelerator Mass Spectrometry), keď sa ióny, ktoré sa idú analyzovať, urýchlia na energie niekoľko MeV, čím sa podstatne zníži pozadie spektrometra. Našťastie, táto technológia bola vyvinutá už skôr pre experimenty v jadrovej fyzike, takže prvé úspešné experimenty s AMS boli opublikované už v roku 1977. AMS je vhodná najmä na analýzu rádioaktívnych izotopov s dlhým polčasom premeny (od desiatky rokov až do niekoľko miliárd rokov), ako sú napríklad rádiouhlík (uhlík-14), berýlium-10, alumínium-26, mangán-53, iód-128, rádioizotopy uránu či plutónia, a ďalšie desiatky rádioizotopov. AMS je mimoriadne citlivou metódou, pretože umožňuje analyzovať skúmané rádioaktívne jadrá ako keby boli stabilné, nemusíme teda čakať na ich rádioaktívnu premenu, čo pri dlhých polčasoch premien je vážny problém. Meranie totiž priamo hmotnosť iónov, nie sprevádzajúce žiarenie, ktoré vzniká pri rádioaktívnej premene jadier. Vďaka použitiu urýchlených iónov na urýchľovači, podstatne znížime pozadie hmotnostnej spektrometrie, čo umožňuje dosiahnuť výborné detekčné limity, napr. určiť už niekoľko desiatok skúmaných rádioaktívnych atómov vo vzorke, oproti desiatkam – stovkám miliónov rádioaktívnych atómov, potrebných pri tradičných analýzach (napr. pomocou gama-spektrometrie). Vďaka urýchľovaču dokážeme analyzovať napríklad rádiouhlík (C-14) už vo vzorkách s hmotnosťou okolo jedného mikrogramu uhlíka, teda asi miliónkrát menšie vzorky ako sme mohli analyzovať pomocou proporcionálnych alebo kvapalných scintilačných detektorov. Doba merania sa tiež podstatne zmenšila, z niekoľkých dní na niekoľko minút, takže podstatnú časť zaberá príprava vzoriek (niekoľko hodín). Podobne, v prípade analýzy plutónia v životnom prostredí pomocou alfa-spektrometrie, doba spracovania a analýzy vzorky bola niekoľko dní, použitím urýchľovača možno čas skrátiť len na niekoľko hodín, čo je tiež veľmi dôležité v prípade havárií jadrových zariadení.

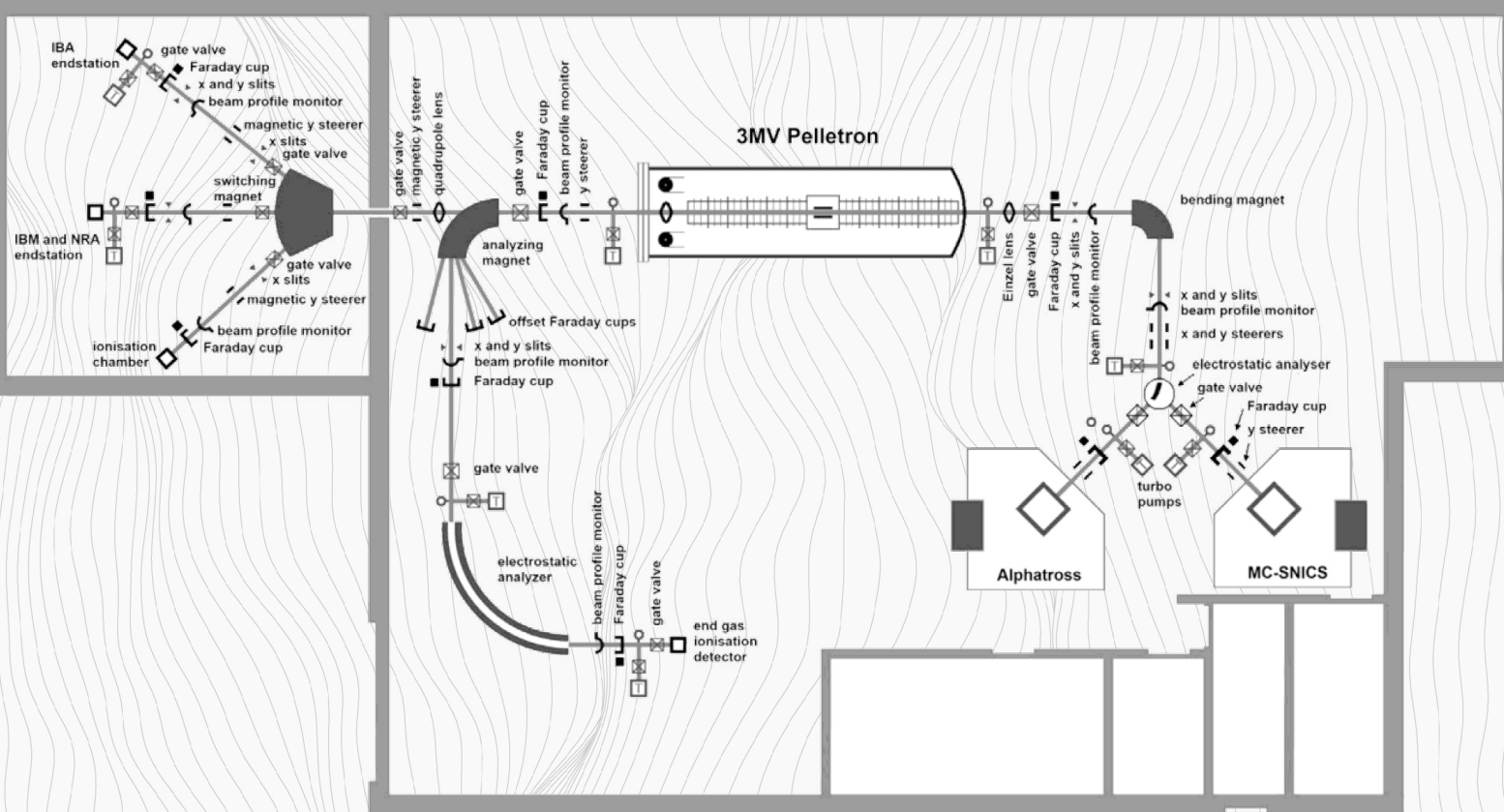
Katedra jadrovej fyziky a biofyziky Fakulty matematiky, fyziky a informatiky Univerzity Komenského má vyše päťdesiat ročnú tradíciu vo výskume fyziky nízkych rádioaktivít, ako aj vývoja prístrojov na meranie veľmi nízkych koncentrácií rádioizotopov v rôznych typoch vzoriek, ako sú napr. meteority, lunárne vzorky, biosférické vzorky, morské vzorky (voda, sedimenty, biota), ale tiež vzorky technického charakteru ako sú rôzne materiály na konštrukciu veľmi citlivých zariadení, ktoré sa používajú v podzemných laboratóriách na výskum zriedkavých jadrových procesov (Povinec, 1972, 1978, 2018a,b; Povinec et al., 1968, 2009). Spektrum výskumných činností je veľmi rozsiahle, avšak jeho spoločným menovateľom je rádioaktivita vo všetkých jej formách a prejavoch. Katedra bola v tomto smere vedúcim pracoviskom už v Československu, a získala dobrý kredit aj v rámci medzinárodnej spolupráce, najmä v oblasti merania nízkych rádioaktivít trícia, uhlíka-14 a v nízkopozadovej gama-spektrometrii.

Veľkorozmerné umelecké vzorky ako aj vzorky živých organizmov je možné ožarovať a analyzovať priamo na vzduchu použitím externého iónového zväzku, bez nutnosti vkladať vzorky do reakčnej vákuovej komory. Napríklad v oblasti biomedicíny je zaujímavý výskum vplyvu ionizujúceho žiarenia na DNA a všeobecne na živé organizmy (vrátane človeka), a tiež vplyv znečistenia životného prostredia na zdravie obyvateľstva.

Pokračovaním tejto tradície vo fyzike nízkych rádioaktivít bola aj snaha vybudovať AMS laboratórium (najmä po mojom návrate z IAEA Monako, kde som mal možnosť spolupracovať s významnými AMS laboratóriami pri využívaní tejto technológie vo výskume morskej rádioaktivity. V rokoch 2008-2011 sme vypracovali tri projekty a získali finančné prostriedky na ich realizáciu zo štrukturálnych fondov EU, ako aj v rámci projektu Technickej kooperácie s IAEA. Vytvorením Centra pre nukleárne a urýchľovačové technológie (CENTA), ako súčasť fakultného Centra excelencie pre fyzikálny výskum, sme vybudovali laboratórium tandemového urýchľovača iónov (Povinec et al., 2015c,d), ktoré sa skladá z niekoľkých



Obr. 8. Súčasný pohľad do haly urýchľovača



Obr. 9. schéma urýchľovačového laboratória s iónovými zdrojmi, injektorom iónov do urýchľovača, vlastného tandemového urýchľovača Pelletron (urýchľovacie napätie do 3 MV), AMS iónového kanálu, a troch IBA kanálov umiestnených v bunkri (dole). Upravené podľa Povinec et al., 2015b.

základných častí: má dva zdroje iónov na urýchľovanie, jeden je pre pevné vzorky (MC SNICS) a druhý pre plynné terčiky (Alphas), ďalej je vybavené injektorom iónov do urýchľovača, vlastným urýchľovačom iónov Pelletron a dvoma iónovými kanálmi na analýzu urýchlených iónov, obr. 8 (výrobcom týchto zariadení je National Electrostatics Corp. (NEC), USA).

Tandemový urýchľovač iónov sa nachádza v samostatnej hale v areáli Fakulty matematiky, fyziky a informatiky UK v Mlynskej doline, a je prístupný aj iným vedeckým a výskumným inštitúciám prostredníctvom spoločných projektov a analýz vzoriek. Zariadenie umožňuje urýchľovať ióny od vodíka až po veľmi ťažké ióny plutónia a bolo vybudované s cieľom robiť výskum v dvoch základných oblastiach. Prvou z nich je využitie zväzku iónov na analytické účely (IBA – Ion Beam Analysis), keď sa ožarujú skúmané vzorky a analyzuje sa vznikajúce žiarenie, ako je napr. X-žiarenie (PIXE metóda) alebo gama-žiarenie (PIGE metóda). Skúmané vzorky môžu pochádzať z rôznych oblastí výskumu – materiálový, environmentálny, biomedicínsky, archeologický výskum a pod. Zaujímavé výskumy robíme v oblasti životného prostredia, ako je napr. výskum súčasného a historického znečistenia atmosféry a biosféry ťažkými kovmi na vzorkách odobratých v Mlynskej doline a v Jasnej v oblasti čistého ovzdušia, ako aj štúdium prechodu prvkov z pôdy do rastlín. Napríklad pre potravinársky sektor sme študovali znečistenie potravín (vrátane biopotravín) rôznymi prvkami, a dobrá správa je, že neboli

zistené žiadne prvky, ktoré by prevyšovali povolené koncentrácie v potravinách. Z ďalších výskumov možno ešte spomenúť výskum separácie rádioizotopov z morskej vody (v súvislosti s fukušimskou haváriou), analýzy uránu v rôznych materiáloch, výskum znečistenia polovodičových materiálov, analýzy železných a kamenných meteoritov, a pod. Z oblasti materiálového výskumu získava na význame napr. výskum prímiesí v konštrukčných materiáloch jadrových reaktorov novej generácie (vrátane termojadrových reaktorov), výskum modifikácie vlastností materiálov po ich ožarovaní jadrovým žiarením (napr. pre jadrové reaktory, pre kozmické materiály a elektrotechnické súčiastky), a pod. Veľkou výhodou urýchľovačových metód je možnosť nedeštruktívnej analýzy vzoriek, napr. analýzy vzácnych obrazov, sošiek, listín, a pod., s cieľom zistiť či sú pravé a nejedná sa teda o falzifikáty (Povinec, 2018a,b). Druhá oblasť výskumu – už spomínaná urýchľovačová hmotnostná spektrometria (AMS) - zahŕňa analýzu rádioaktívnych izotopov s dlhým polčasom premeny (od desiatky rokov až do niekoľko miliárd rokov). Pretože AMS dosahuje podstatne vyššiu citlivosť ako rádiometrické metódy, umožňuje realizovať výskumy, ktoré predtým nebolo možné robiť buď pre nízku citlivosť používaných zariadení alebo pre nevyhnutnosť používať príliš veľké vzorky, ktoré však nebolo možné získať.

V súčasnosti pracujeme na rozšírení laboratória o samostatný iónový kanál pre AMS analýzy (obr. 8), pozostávajúceho z elektromagnetu s vysokým rozlíšením, dvoch elektrostatických deflektorov a ďalších prídavných zariadení, ktoré umožnia analyzovať v rôznych vzorkách rádioaktívne izotopy od trícia (rádioaktívny izotop vodíka) až po izotopy plutónia. V dôsledku pandemickej situácie sa inštalácia tohto iónového kanálu oneskorila, no v priebehu augusta 2022 by mala byť ukončená. Rozšírenie laboratória je realizované v rámci spoločného projektu UK a Slovenskej technickej univerzity „Advancing University Capacity and Competence in Research, Development and Innovation (ACCORD)“, ktorý je spolufinancovaný Európskou úniou. V rámci tohto projektu budujeme na fakulte tiež podzemné laboratórium s koincidenčným gama-spektrometrom s antikozmickou ochranou, ktoré umožní podstatne zlepšiť detekčné limity pre rádioizotopy emitujúce pri svojej premene gama-žiarenie. Spojením AMS laboratória s podzemným laboratóriom vznikne unikátne pracovisko, ktoré umožní analyzovať všetky významné rádioizotopy už pri veľmi nízkych koncentráciách v ľubovoľných vzorkách.

Hlavné možnosti využitia AMS technológie, ktoré boli realizované v rámci medzinárodnej spolupráce, boli dosiaľ najmä v týchto oblastiach: výskum dopadu prevádzky jadrových elektrární na životné prostredie (vrátane havárií v Černobyle a Fukušime) – štúdium rádioizotopov v atmosfére, biosfére a v hydrosfére (vrátane znečistenia morského prostredia po fukušimskej havárii); využitie rádioizotopov na výskum klimatických zmien – štúdium uhlíka-14 v letokruhoch stromov, hodnotenie dopadu spaľovania fosílnych palív na znečistenie atmosféry a výskum vplyvu slnečnej aktivity (11-ročné slnečné cykly) na variácie kozmogénnych rádioizotopov; využitie rádioizoto-

pov ako stopovačov prírodných procesov: atmosféra – biosféra, atmosféra - hydrosféra (oceán); výskum rádioaktívneho znečistenia konštrukčných materiálov detektorov pre experimenty v podzemných laboratóriách; výskum rádioizotopov v meteoritoch na určenie ich radiačných vekov, pred-atmosférických rozmerov a variácií kozmického žiarenia v heliosfére; rádiouhlíkové datovanie (do veku 50 tisíc rokov) organických a anorganických vzoriek pre environmentálny a archeologický výskum a pre štúdium historických artefaktov.

Veľa aktivít v oblasti urýchľovačových technológií sa realizuje v rámci spolupráce s viacerými domácimi pracoviskami. Dlhodobá spolupráca je napr. so Slovenskými elektrárnami pri hodnotení dopadu prevádzky jadrových elektrární v Jaslovských Bohuniciach a v Mochovciach na životné prostredie. Úspešná je spolupráca s Lekárskou fakultou UK v biomedicínskom výskume, napríklad pri štúdiu dopadu ožarovania živých organizmov elektromagnetickým žiarením (podobnému tomu, ktoré generujú mobilné telefóny) a sledovanie zvýšených koncentrácií niektorých ťažkých kovov v ožiarených mozgoch zajacov, ako aj analýzy ťažkých kovov v mozgoch ľudí, ktorí trpeli neurodegeneratívnymi ochoreniami. S viacerými vysokými školami, ústavmi SAV, ako aj s ďalšími pracoviskami boli realizované viaceré projekty (a ďalšie spoločné projekty sú v štádiu prípravy), napr. výskum rádioaktivity geologických, potravinárskych a materiálových vzoriek, vzoriek podzemných vôd, analýzy meteoritov, datovanie archeologických a iných typov vzoriek, a pod.). Ďalšie informácie o urýchľovačovom laboratóriu a o možnostiach jeho využitia možno získať na www.centa.sk. Bližšie informácie o potencionálnych projektoch a o možnostiach spolupráce, datovaní vzoriek a analýzach rádionuklidov a prvkov v rôznych vzorkách možno získať na emailovej adrese: pavel.povinec@uniba.sk.

Významná je tiež spolupráca so zahraničnými pracoviskami, napr. s Medzinárodnou agentúrou pre atómovú energiu (IAEA) so sídlom vo Viedni, ktorá prispela k rozšíreniu urýchľovačového laboratória, keďže financovala časť zariadenia výstupného iónového kanálu urýchľovača, ktoré umožňuje robiť špeciálne PIXE a PIGE analýzy. Vďaka finančnej podpore IAEA, ale tiež možnosti vyslať mladých vedeckých pracovníkov na zahraničné stáže (aj s podporou Úradu jadrového dozoru SR), získalo naše pracovisko cenné medzinárodné skúsenosti a uznanie. Patríme totiž medzi málo pracovísk s takým širokým záberom, ktoré okrem radiometrických metód (najmä nízkoenergiavej gama-spektrometrie), dokáže využívať na analýzu vzoriek aj urýchľovačové technológie.

Výskum vplyvu prevádzky jadrových elektrární a jadrových nehôd (akými boli napríklad Fukušima či Černobyl) na životné prostredie, rádioaktivita atmosféry a biosféry, ale tiež morská rádioaktivita, to sú dôležité témy našej medzinárodnej spolupráce s pracoviskami v Japonsku, USA, Francúzsku, Nemecku, Grécku, Južnej Kórei, Číne,



Obr. 10. CENTA tím v hale urýchľovača

Česku, Maďarsku, atď. Sledovali sme napríklad prítomnosť C-14 a ďalších izotopov vo vodách v okolí jadrovej elektrárne Fukušima a v Tichom oceáne, aby sme získali informácie o pohybe rádioaktívnych látok v oceáne po havárii, a ich možnom vplyve na radiačné dávky obyvateľstva prostredníctvom konzumácie rýb a morských plodov. V súčasnosti robíme napr. výskum rádioaktivity Červeného mora s cieľom prispieť k poznaniu dlhodobej cirkulácie vodných mäs v mori a ich výmeny s Arabským morom.

Jednou z oblastí, kde sa urýchľovačové metódy začali najnovšie využívať, je aj výskum zriedkavých jadrových procesov v podzemných laboratóriách, najmä bezneutrínovej dvojitej beta-premeny jadier a hľadanie hypotetických častíc temnej hmoty. Tieto experimenty vyžadujú použitie superčistých materiálov na konštrukciu detektorov (s minimálnou rádionuklidovou kontamináciou), a urýchľovačová hmotnostná spektrometria sa javí ako najcitlivejšia metóda na kontrolu ich rádiočistoty. Preto úspešne spolupracujeme na významných zahraničných projektoch ako sú SuperNEMO a LEGEND (výskum bezneutrínovej dvojitej beta-premeny jadier Se-82 a Ge-76), a CRESST (hľadanie častíc temnej hmoty), ktoré patria vo svojich odboroch ku svetovej špičke. Urýchľovačové technológie tvoria preto tiež dôležitú súčasť publikačnej činnosti pracovníkov katedry. Okrem niekoľkých monografií a kapitol v monografiách, je to vyše sto článkov opublikovaných vo významných zahraničných časopisoch, ako aj desiatky referátov a posterov prezentovaných na medzinárodných konferenciách.

Pod'akovanie

Je mi milou povinnosťou poďakovať mojim kolegom na katedre a na fakulte, ako aj ďalším domácim a zahraničným spolupracovníkom za dlhoročnú spoluprácu, bez ktorej by tak rozsiahlu vedecko-výskumnú činnosť nebolo možné realizovať.

Literatúra

Alexeev V.A., Laubenstein M., Povinec P.P., Ustinova G.K.: Variations of cosmogenic radionuclide production rates along the meteorite orbits. *Advanc. Space Res.* 56 (2015) 766-771.

Aoyama M., Povinec P.P., Sanchez-Cabeza, J.-A.: The Southern Hemisphere Ocean Tracer Studies (SHOTS) project. *Progress in Oceanography* 89 (2011) 1–6.

Attolini M.R., Galli M., Nanni T., Povinec P.: A cyclogram analysis of the Bratislava 14C tree-ring record during the last century. *Radiocarbon*, 31 (1989) 839-845).

Brehm N. et al., Eleven-year solar cycles over the last millennium revealed by radiocarbon in tree rings. *Nature Geosci.* 14 (2021) 10-15.

Burchuladze A. A., Pagava S.V., Povinec P., Togonidze G., Usačev S.: Radiocarbon variations with the 11-year solar cycle during the last century. *Nature* 287 (1980) 320-322.

Burchuladze A.A., Chudý M., Eristavi I.V., Pagava S.V., Povinec P., Šivo A., Togonidze G.I.: Anthropogenic 14C variations in atmospheric CO₂ and wines. *Radiocarbon* 31 (1989) 771-776.

Povinec P.: Preparation of methane gas filing for proportional 3H and 14C counters. *Radioanal. Lett.* 9 (1972) 127–135.

Povinec P.: Multiwire proportional counters for low level 14C and 3H measurements. *Nucl. Instrum. Meth.* 156 (1978) 441–445.

Povinec P.P.: New ultra-sensitive radioanalytical technologies for new science. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 316 (2018a) 893–931.

Povinec P.P.: Developments in radioanalytics: from Geiger counters to single atom counting. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 318 (2018b) 1573–1585.

Povinec P., Šáro Š., Chudý M., Šeliga M.: The rapid method of carbon-14 counting in atmospheric carbon dioxide. *Intern. J. Appl. Radiat. Isotop.* 19 (1968) 877–881.

Povinec P., Burchuladze A.A., Pagava S.V.: Short term variations in radiocarbon concentration with the 11-year solar cycle: *Radiocarbon* 25 (1983) 259-266.

Povinec P.P., Woodhead D., Blowers P., Bonfield R., Cooper M., Chen Q., Dahlgaard H., Dovlete C., Fox V., Froehlich K., Gastaud J., Groening M., Hamilton T., Ikeuchi Y., Kanish G., Krueger A., Li-ong Wee Kwong L., Matthews M., Morgenstern U., Mulsow S., Pettersson H., Smedley P., Taylor B., Taylor C., Tinker R.: Marine radioactivity assessment of Mururoa and Fangataufa atolls. *Sci. Total Environ.* 237-238 (1999) 249-267.

Povinec, P.P., Livingston, H.D., Shima, S., Aoyama, M., Gastaud, J., Goroncy, I., Hirose, K., Huyhn-Ngoc, L., Ikeuchi, Y., Ito, T., La Rosa, J., Liong Wee Kwong, L., Lee, S.-H., Moriya, H., Mulsow, S., Oregioni, B., Pettersson, H., Togawa, O.: IAEA'97 expedition to the NW Pacific Ocean and results e results of oceanographic and radionuclide investigations of the water column. *Deep-Sea Res. II* 50 (2003) 2607-2638.

Povinec P.P., Betti M., Jull A.J.T., Vojtyla P.: New isotope technologies for environmental physics. *Acta Phys. Slovaca* 58 (2008) 1-154.

Povinec P.P., Sýkora I., Porubčan V., Ješkovský M.: Analysis of ^{26}Al in meteorite samples by coincidence gamma-ray spectrometry. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 282 (2009) 805–808.

Povinec, P.P., Aoyama, M., Fukasawa, M., Hirose, K., Komura, K., Sanchez-Cabeza, J.A., Gastaud, J., Ješkovský, M., Levy, I., Sykora, I., 2010. ^{137}Cs water profiles in the South Indian Ocean – an evidence for accumulation of pollutants in the subtropical gyre. *Progress in Oceanography* 89 (2011) 17–30.

Povinec, P.P., Hirose, K., Aoyama, M., 2013. *Fukushima Accident: Radioactivity Impact on the Environment*. Elsevier, New York, 2013, 382p.

Povinec P.P., Masarik J., Sýkora I., Kováčik A., Beňo J., Laubenstein M., Porubčan V.: Cosmogenic radionuclides in the Kosice meteorite: Experimental investigations and Monte Carlo simulations. *Meteoritics. Planet. Sci.* 50 (2015a) 880–892.

Povinec P. P., Laubenstein M., Jull A. J. T., Ferriere L., Brandstatter F., Sýkora I., Masarik J., Beňo J., Kováčik A., Topa D., Koeberl C.: Cosmogenic radionuclides and mineralogical properties of the Chelyabinsk (LL5) meteorite: What do we learn about the meteoroid? *Meteoritics Planet. Sci.* 50 (2015b) 273–286.

Povinec P.P., Masarik J., Kúš P., Holý K., Ješkovský M., Breier R., Staníček J., Šivo A., Richtáriková M., Kováčik A., Szarka J., Steier P., Priller A.: A new IBA-AMS laboratory at the Comenius University in Bratislava (Slovakia). *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B* 342 (2015c) 321-326.

Povinec P.P., Masarik J., Ješkovský M., Kaizer J., Šivo A., Breier R., Pánik J., Staníček J., Richtáriková M., Zahoran M., Zeman J.: Development of the accelerator mass spectrometry technology at the Comenius University in Bratislava. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B* 36 1 (2015d) 87–94.

Povinec, P P, Sýkora, I, Ferrière, L, Koeberl, C, 2020. Analyses of radionuclides in the Oued Awlitis 001 and Galb Inal lunar meteorites by HPGe gamma-ray spectrometry. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 324 (2020a) 1-9.

Povinec P.P., Sýkora I., Macke R.J., Tóth J., Kornoš L., Porubčan V.: Radionuclides in Chassigny and Nakhla meteorites of Mars origin: Implications for their pre-atmospheric sizes and cosmic-ray exposure ages. *Planet. Space Sci.* 186 (2020b) 104914.

Povinec P.P., Kontuľ I., Lee S.H., Sýkora I., Kaizer J., Richtáriková M.: Radiocarbon and ^{137}Cs dating of wines. *J. Environ. Radioact.* 217 (2020c) 106205.

Povinec P.P., Eriksson M., Scholten J., Betti M.: Marine Radioactivity Analysis. In: *Handbook of Radioactivity Analysis*, Ed. M. Annunziata, Academic Press, New York, 4th Edition, Vol. 2, (2020d) 316-392.

Povinec, P.P., Hirose, K., Aoyama, M., Tateda Y.: Fukushima Accident: 10 years after. Elsevier, New York, 2021a, 560p.

Povinec P.P., Cherkinsky A., Dorica J., Hajdas I., Jull A.J.T., Kontuľ I., Molnár M., Svetlik I., Wild E.M.: Radiocarbon dating of st. George's Rotunda in Nitrianska Blatnica (Slovakia): International consortium results. Radiocarbon 63 (2021b) 953–976.

Reimer P. et al.: IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 cal kBP) and marine radiocarbon age calibration curves 0–50,000 years cal BP. Radiocarbon 62 (2020) 725–757.

Ross E., Chaplin W.J.: The Behaviour of galactic cosmic-ray intensity during solar activity cycle 24. Solar Phys. 294 (2019) 8.

Schulz T., Povinec P.P., Feriere L., Jull A.J.T., Kováčik A., Sýkora I., Tush J., Muenker C., Topa D., Koeberl C.: The complex history of the Tissint meteorite, from its crystallization on Mars to its landing on Earth, inferred from isotopic systems and cosmogenic nuclides. Meteoritics Planet Sci. 1-18 (2020) doi:10.1111/maps.13435.

Významné publikácie autora

Knižné publikácie

Povinec, P.P., Hirose, K., Aoyama, M., Tateda Y.: Fukushima Accident: 10 years after. Elsevier, New York, 2021, 560p

Povinec P.P., Eriksson M., Scholten J., Betti M.: Marine Radioactivity Analysis. In: Handbook of Radioactivity Analysis, Ed. M. Annunziata, Academic Press, New York, 4th Edition, Vol. 2, 2020, 316-392.

Ješkovský M., J. Kaizer, I. Kontuľ, G. Lujanienė, M. Mullerová, P.P. Povinec: Analysis of environmental radionuclides. In 5th Edition Handbook of Radioactivity Analysis, Ed. M. Annunziata, Academic Press, New York, Vol. 2, 2020, 138-261.

Povinec, P.P., Hirose, K., Aoyama, M., 2013. Fukushima Accident: Radioactivity Impact on the Environment. Elsevier, New York, 2013, 382p.

Povinec P.P., K. Hirose: Radionuclides as Tracers of Ocean Currents. In: Encyclopedia of Sustainability Science and Technology, Springer, New York, 2012.

Povinec, P.P.: Indian Ocean. Radionuclides in the Environment. In: Encyclopedia of Inorganic Chemistry, Wiley, New York, 2010.

Povinec, P.P., A. Aarkrog, K.O. Buesseler, R. Delfanti, K. Hirose, G.H. Hong, T. Ito, H.D. Livingston, H. Nies, V.E. Noshkin, S. Shima, O. Togawa: Worldwide Marine Radioactivity Studies (WOMARS). Radionuclide levels in Oceans and Seas. IAEA, Vienna, 2005, 186p.

Povinec, P.P.: Developments in analytical technologies for marine radionuclide studies. In: Marine Radioactivity, Elsevier, New York, 2004.

Dovlete, C., Povinec, P.P. Quantification of uncertainty in gamma-spectrometric analysis of environmental samples. In: Quantifying uncertainty in nuclear analytical measurements. IAEA, Vienna, 2004.

Povinec, P.P., Gayol, J., Togawa, O., Honda, T. Global Marine Radioactivity Database (GLOMARD). IAEA, Vienna, 2001, 51p.

Povinec, P.P., Ballestra, S., Baxter, M.S., Boisson, F., Carroll, J., Fowler, S.W., Gastaud, J., Gayol, J., Hamilton, L., Harms, I., Huynh-Ngoc, L., Liong Wee Kwong, L., Miquel, J.C., Oregioni, P., Osvath, I., Parsi, P., Scott, E.M. Radioactivity in the Arctic Seas. IAEA, Vienna, 1999, 71p.

Povinec, P.P. et al. The Radiological Situation of the Atolls of Mururoa and Fangataufa. Radionuclide Concentrations Measured in the Aquatic Environment of the Atolls. Vol. 2, IAEA, Vienna, 1998, 118p.

Povinec, P.P., Aarkrog, A., Baxter, M.S., Bettencourt, A.O., Bojanowski, R., Bologna, A., Charmasson S., Cunha, I., Delfanti, R., Duran, E., Holm, E., Jeffree, R., Livingston, H.D., Mahapanyawong, S., Nies H., Osvath, I., Pingyu, Li, Sanchez, A., Smith, J.N., Swift, D. A. Sources of Radioactivity in the Marine Environment and their Relative Contribution to Overall Dose Assessment from Marine Radioactivity (MARDOS). IAEA, Vienna, 1995, 54p.

Gonzales, A., ..., Povinec, P.P. et al. The Radiological Situation of the Atolls of Mururoa and Fangataufa. IAEA, Vienna, 1998, 282p.

de Geer, L.-E., ..., Povinec, P.P. et al. The Radiological Situation of the Atolls of Mururoa and Fangataufa. Inventory of Radionuclides Underground at the Atolls. Vol. 3, IAEA, Vienna, 1998, 94p.

Fairhurst, C., ..., Povinec, P.P. et al. The Radiological Situation of the Atolls of Mururoa And Fangataufa. Releases to the Biosphere of Radionuclides from Underground Nuclear Weapons Tests at the Atolls. Vol. 4, IAEA, Vienna, 1998, 270p.

Mittelstaedt, E., ... Povinec, P.P. et al. The Radiological Situation of the Atolls of Mururoa And Fangataufa. Transport of Radioactive Material in the Marine Environment. Vol. 5. IAEA, Vienna, 1998, 140p.

Levins, D.M. ... Povinec, P.P. et al. The Radiological Situation of the Atolls of Mururoa and Fangataufa. Doses Due to Radioactive Materials Present in the Environment or Released from the Atolls. Vol. 6, IAEA, Vienna, 1998, 52p.

Sjoebloom, K., ... Povinec, P.P., et al. Radiological Conditions of the Western Kara Sea. IAEA, Vienna, 1998, 124p.

Burnett, W.C., ..., Povinec, P.P. et al.: Quantifying submarine groundwater discharge in the coastal zone via multiple methods. In: Nuclear and Isotope Techniques for the Characterization of Submarine Groundwater Discharge in Coastal Zones. IAEA, Vienna, 2008, 50p.

Najcitovanejšie publikácie autora

Quantifying submarine groundwater discharge in the coastal zone via multiple methods.
WC Burnett, PK Aggarwal, A Aureli, H Bokuniewicz, JE Cable, ..., PP Povinec, ...
Science of the total Environment 367 (2-3), 498-543 (977 citácií)

Tracking of airborne radionuclides from the damaged Fukushima Dai-ichi nuclear reactors by European networks.

O Masson, A Baeza, J Bieringer, K Brudecki, S Bucci, M Cappai, ..., PP Povinec,...
Environmental Science & Technology 45 (18), 7670-7677 (358 citácií)

Probing new physics models of neutrinoless double beta decay with SuperNEMO.
R Arnold, C Augier, J Baker, AS Barabash, A Basharina-Freshville, ..., PP Povinec,...
The European Physical Journal C 70 (4), 927-943 (262 citácií)

The large enriched germanium experiment for neutrinoless double beta decay (LEGEND).
N Abgrall, A Abramov, N Abrosimov, I Abt, M Agostini, M Agartioglu, ... , PP Povinec,...
AIP Conference Proceedings 1894 (1), 020027 (256 citácií)

A comparison of doses from ¹³⁷Cs and ²¹⁰Po in marine food: A major international study.
A Aarkrog, MS Baxter, AO Bettencourt, R Bojanowski, A Bologna, ... , PP Povinec,...
Journal of Environmental Radioactivity 34 (1), 69-90 (239 citácií)

Underground measurements of radioactivity.
M Laubenstein, M Hult, J Gasparro, D Arnold, S Neumaier, G Heusser, ... , PP Povinec,...
Applied Radiation and Isotopes 61 (2-3), 167-172 (196 citácií)

Results of the search for neutrinoless double- decay in with the NEMO-3 experiment.
R Arnold, C Augier, JD Baker, AS Barabash, A Basharina-Freshville, ... , PP Povinec,...
Physical Review D 92 (7), 072011 (192 citácií)

Anthropogenic marine radioactivity.
HD Livingston, PP Povinec
Ocean & Coastal Management 43 (8-9), 689-712 (188 citácií)

Fukushima accident: radioactivity impact on the environment.
PP Povinec, K Hirose, M Aoyama
Elsevier, New York, 2013, 382p (184 citácií)

Iodine-129 in seawater offshore Fukushima: distribution, inorganic speciation, sources, and budget.
X Hou, PP Povinec, L Zhang, K Shi, D Biddulph, CC Chang, Y Fan, ...
Environmental science & technology 47 (7), 3091-3098 (171 citácií)

Cesium, iodine and tritium in NW Pacific waters—a comparison of the Fukushima impact with global fallout.
PP Povinec, M Aoyama, D Biddulph, R Breier, K Buessler, CC Chang, ...
Biogeosciences 10 (8), 5481-5496 (134 citácií)

⁹⁰Sr, ¹³⁷Cs and ^{239,240}Pu concentration surface water time series in the Pacific and Indian Oceans—WOMARS results.
PP Povinec, A Aarkrog, KO Buessler, R Delfanti, K Hirose, GH Hong, ...
Journal of environmental radioactivity 81 (1), 63-87 (133 citácií)

Separation of actinides, cesium and strontium from marine samples using extraction chromatography and sorbents.
JJ La Rosa, W Burnett, SH Lee, I Levy, J Gastaud, PP Povinec
Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 248 (3), 765-770 (125 citácií)

IAEA'97 expedition to the NW Pacific Ocean—results of oceanographic and radionuclide investigations of the water column.

PP Povinec, HD Livingston, S Shima, M Aoyama, J Gastaud, I Goroncy, ...
Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography 50 (17-21), 2607-2637 (124 citácií)

A millennium perspective on the contribution of global fallout radionuclides to ocean science.
HD Livingston, PP Povinec
Health Physics 82 (5), 656-668 (119 citácií)

Search for neutrinoless double-beta decay of ^{150}Nd with the NEMO-3 detector.
R Arnold, C Augier, JD Baker, AS Barabash, A Basharina-Freshville, ... , PP Povinec, ...
Physical Review D 89 (11), 111101 (112 citácií)

^{90}Sr and ^{137}Cs in the Black Sea after the Chernobyl NPP accident: inventories, balance and tracer applications.
VN Egorov, PP Povinec, GG Polikarpov, NA Stokozov, SB Gulin, ...
Journal of Environmental Radioactivity 43 (2), 137-155 (111 citácií)

Radiostrontium in the western North Pacific: characteristics, behavior, and the Fukushima impact.
PP Povinec, K Hirose, M Aoyama.
Environmental science & technology 46 (18), 10356-10363 (109 citácií)

Analysis of plutonium isotopes in marine samples by radiometric, ICP-MS and AMS techniques
SH Lee, J Gastaud, JJ La Rosa, L Kwong, PP Povinec, E Wyse, LK Fifield, ...
Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 248 (3), 757-764 (107 citácií)

Spatial distribution of ^3H , ^{90}Sr , ^{137}Cs and $^{239,240}\text{Pu}$ in surface waters of the Pacific and Indian Oceans—GLOMARD database.
PP Povinec, K Hirose, T Honda, T Ito, EM Scott, O Togawa
Journal of Environmental Radioactivity 76 (1-2), 113-137 (106 citácií)

Časopriestor Spacetime

Interaktívne vedecko-popularizačné médium významných autorov a vedeckých pracovníkov
Interactive popular science medium of important authors and scientists

