

## MILNÍKY A VYBRANÉ APLIKACE RADIOUHLÍKOVÉHO DATOVÁNÍ

VOJTĚCH VALÁŠEK<sup>a,b</sup>, MARKÉTA PETROVÁ<sup>a,c</sup>, IVO SVĚTLÍK<sup>a</sup>, VERONIKA BRYCHOVÁ<sup>a</sup>,  
JAN KUBANČÁK<sup>d</sup> a KATEŘINA PACHNEROVÁ BRABCOVÁ<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Ústav jaderné fyziky AV ČR, v.v.i., Na Truhlářce 39/64, 180 00 Praha, <sup>b</sup> Ústav pro životní prostředí, Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy Praha 2, Benátská 2, 128 01 Praha, <sup>c</sup> Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, České vysoké učení technické v Praze, Břehová 7, 115 19 Praha, Česká republika, <sup>d</sup> Ústav experimentálnej fyziky SAV, v.v.i., Watsonova 47, 040 01 Košice, Slovensko  
brabcova@ujf.cas.cz

Došlo 29.11.22, přijato 2.1.23.

Historie radiouhlíkového datování je vymezena několika zásadními milníky – vlastním objevem, vynucenou revizí základních principů, objevem urychlovačové hmotnostní spektrometrie a antropogenními vlivy. Současné možnosti metody jsou ukázány na dvou forenzních aplikacích v oblasti trestné činnosti páchané na lidech i ohrožených druzích zvířat.

Klíčová slova: radiouhlíkové datování, urychlovačová hmotnostní spektrometrie, forenzní aplikace, slonovina

## Obsah

1. Úvod
2. Objev radiouhlíkového datování
3. Revize základních principů
4. Měření radiouhlíku metodou urychlovačové hmotnostní spektrometrie
5. Antropogenní vlivy: jaderné testy a fosilní paliva
6. Datování tkání chráněných živočichů
7. Dynamika tvorby lidských tkání

## 1. Úvod

Radiouhlík  $^{14}\text{C}$  je společně se stabilními izotopy  $^{12}\text{C}$  a  $^{13}\text{C}$  přirozenou součástí uhlíkové izotopické směsi v poměru zhruba 99:1:10<sup>-14</sup> ( $^{12}\text{C}$ : $^{13}\text{C}$ : $^{14}\text{C}$ ), a tedy i uhlíkového koloběhu v přírodě, tj. toků mezi atmosférou, hydrosférou a biosférou. Hlavním přirozeným zdrojem  $^{14}\text{C}$  je jaderná reakce tepelných neutronů sekundárního kosmického záření s jádry atmosférického dusíku  $^{14}\text{N}(\text{n,p})^{14}\text{C}$ . Rychlost vzniku  $^{14}\text{C}$  činí zhruba 2 atomy cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>. Vzniklý  $^{14}\text{C}$  je v atmosféře oxidován na oxid uhličitý ( $^{14}\text{CO}_2$ ), vstupuje do všech složek životního prostředí (ŽP) a stává se součástí uhlíkového koloběhu. Fyzikálně chemické vlastnosti uhlíkových izotopů jsou sice velmi podobné, přesto však při jejich přestupech mezi jednotlivými složkami ŽP, například při asimilaci fotosyntetizujícími rostlinami, dochází k izotopické frakcionaci, většinou zvýhodňující lehčí izotopy.

Radiouhlíkové datování patří mezi nejvýznamnější aplikace využívající  $^{14}\text{C}$ , radioaktivní izotop uhlíku, v archeologii, kvartérní geologii, klimatologii, paleoekolo-

gii a dalších disciplínách. Stanovením zbytkové aktivity  $^{14}\text{C}$  lze určit dobu, kdy byl daný artefakt (organismus) vyloučen z uhlíkového koloběhu (např. okamžikem smrti). Tato doba odpovídá poklesu původní aktivity  $^{14}\text{C}$  v důsledku radioaktivní přeměny s poločasem přeměny 5730 let (cit.<sup>1</sup>). Současný dosah metody je 55 tisíc let (cit.<sup>2</sup>).

## 2. Objev radiouhlíkového datování

Myšlenka radiouhlíkového datování, za kterou Frank Willard Libby obdržel v roce 1960 Nobelovu cenu za chemii, je vyvrcholením řady souvisejících dedukcí učiněných při zkoumání kosmického záření a jeho působení v zemské atmosféře. V širším smyslu sem patří objev neutronů a jejich geneze v atmosféře (Serge Alexander Korff, Wade Danforth, 1939–1941), návrh cyklotronu (Ernest Orlando Lawrence, Nobelova cena v roce 1939) a mnoho dalšího. Existence  $^{14}\text{C}$  byla předpovězena už ve třicátých letech 20. století paralelně několika skupinami, které při ozařování vzduchu neutrony v mlžné komoře detegovali stopy protonů a neznámého beta zářiče s energií cca 170 keV (Franz Kurie, 1936). Vzhledem k podobné energii beta již známého zářiče  $^{35}\text{S}$  se mu chybně přisoudil pravděpodobný poločas přeměny pouhých několika měsíců. Po prvním experimentu, jenž selhal na chybném odhadu poločasu přeměny a vygeneroval  $^{14}\text{C}$  pod mezi detekce, se dvojicí mladých vědců Martinu Kamenovi a Samuelu Rubenovi v druhém pokusu o vytvoření detegovatelného množství  $^{14}\text{C}$  v roce 1940 podařilo dokázat existenci atomů  $^{14}\text{C}$ .

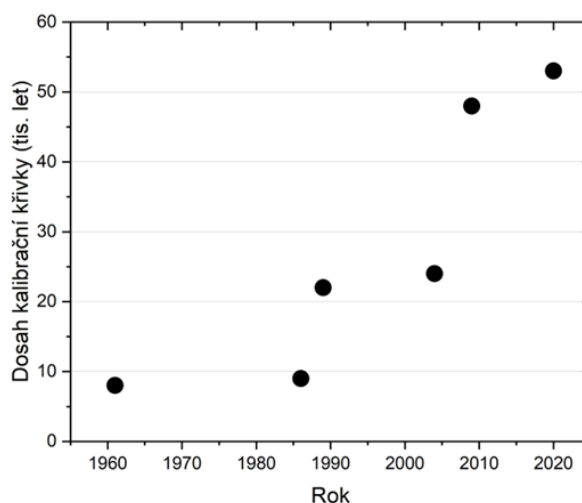
Libby, působící na University of Chicago, později tvrdil, že myšlenka radiouhlíkového datování ho napadla již v roce 1939 při čtení Korffova článku o neutronech kosmického záření, každopádně v roce 1946 publikoval základní teoretické principy<sup>3</sup> a zahájil rozsáhlou experimentální kampaň na jejich podporu. Spolu s kolegy Ernestem C. Andersonem a Jamesem R. Arnoldem postupně testovali, jestli je měřitelný rozdíl mezi obsahem  $^{14}\text{C}$  v živých a fosilních organismech, jestli je obsah radiouhlíku v živých organismech nezávislý na geografické poloze a jaká je jeho absolutní aktivita, a konečně jaké je porovnání  $^{14}\text{C}$ -odvozeného stáří se stářím stanoveným např. z historických dokumentů nebo dendrochronologických dat<sup>4</sup>. S tehdejšími dostupnými měřicími metodami se všechny výchozí předpoklady ukázaly jako správné, byla stanovena absolutní hodnota aktivity  $^{14}\text{C}$  v živých organismech (255 Bq/kg) a z poklesu aktivity v důsledku radioaktivní přeměny (s tzv. Libbyho poločasem přeměny 5558 let) byly úspěšně datovány historické předměty a dřevo známého stáří do cca 5000 let.

### 3. Revize základních principů

Hned na počátku rozvoje metody se začaly objevovat problémy v komunikaci s archeologickou a antropologickou komunitou. Libbyho tým fyziků a chemiků byl závislý na vzorcích poskytnutých archeology, přesto nebyl zejména v počátcích schopný komunikovat, že potřebuje spolehlivě datované vzorky a jaký je přesně stav vývoje výzkumu. Archeologická komunita proto z pochopitelných důvodů váhala poskytnout vzácné staré artefakty, v množství, které metoda tehdy vyžadovala a které byly navíc během analýzy zničeny. Libby svoje zklamání dokonce veřejně vyjádřil během přednášky při obdržení Nobelovy ceny, kdy v podstatě archeology obvinil ze lži ohledně odhadů stáří civilizací nad cca 5000 let (cit.<sup>5</sup>).

Až po udělení Nobelovy ceny se skokově vylepšila technologie měření radiouhlíku a v rámci menších nejistot se ukázal nesoulad  $^{14}\text{C}$ -odvozeného a dendrochronologického stáří u dřeva staršího cca 1000 let před naším letopočtem<sup>6</sup>. To vedlo k revizi původních předpokladů radiouhlíkového datování –  $^{14}\text{C}$  aktivita v přírodě není konstantní, přičemž variace jsou způsobeny změnami v kosmogenní produkci  $^{14}\text{C}$  (cit.<sup>7</sup>) a je nutné kompenzovat tyto změny použitím kalibrační křivky. Navíc byl revidován odhad poločasu přeměny a zavedeny nutné opravy na izotopickou frakcionaci<sup>8</sup>.

První kalibrační křivky převodu „radiouhlíkového“ na kalendářní stáří byly sestaveny z dat z letokruhů borovic získaných Wesleyem Fergusonem v šedesátých letech a měly dosah 8 tisíc let (cit.<sup>9</sup>). Od té doby je kalibrační sada postupně rozšiřována nejprve o letokruhy dalších stromů, zejména dubu, a postupně i o data například z jezerních ročních vrstev sedimentů (varv) a dalších, a křivky jsou dodnes zpřesňovány a prodlužovány (obr. 1). V roce 1970 se začala odlišovat kalibrační křivka pro severní a jižní polokouli<sup>9</sup>.



Obr. 1. Prodlužování dosahu radiouhlíkové kalibrační křivky v historii. Od roku 1970 jsou uvedeny údaje pro kalibrační křivku pro suchozemské vzorky severní polokoule<sup>2,9,11</sup>

V sedmdesátých letech byl také sjednocen způsob vyjadřování výsledků, aktivity a frakcionace  $^{14}\text{C}$ , která se vztahuje k definovanému radiouhlíkovému standardu<sup>10</sup>.

### 4. Měření radiouhlíku metodou urychlovačové hmotnostní spektrometrie

Zásadním mezníkem aplikovatelnosti radiouhlíkového datování byl vývoj urychlovačové hmotnostní spektrometrie (AMS, z angl. accelerator mass spectrometry) pro měření  $^{14}\text{C}$  atomů<sup>12,13</sup>. Do té doby využívané radiometrické metody detegující radioaktivní přeměny vyžadovaly minimálně desítky gramů a desítky hodin měření jednoho vzorku, zatímco AMS dramaticky snížila nároky na hmotnost vzorku na sub-miligramová množství a zároveň zkrátila dobu měření na jednotky hodin. To významně rozšířilo portfolio datovatelných vzorků z klasického dřeva, zuhelnatělého dřeva a kostí na semena, papír, chitin, textilie, vlasy, velmi vzácné umělecké nebo historické artefakty a vůbec prakticky jakýkoliv materiál organického nebo anorganického původu obsahující  $^{14}\text{C}$  a splňující podmínku uzavřeného systému.

### 5. Antropogenní vlivy: jaderné testy a fosilní paliva

Vlivem atmosférických testů jaderných zbraní došlo během 50. a 60. let 20. století k prudkému, téměř dvojnásobnému, zvýšení aktivity  $^{14}\text{C}$  v porovnání s přírodní hodnotou před testováním. Výsledkem bylo vytvoření tzv. bombových píků na kalibračních křivkách, s maximem v roce 1963 na severní polokouli a o rok později na jižní polokouli. Poté, co byla podepsána Smlouva o částečném

zákazu zkoušek jaderných zbraní v roce 1963, začala aktivita  $^{14}\text{C}$  v atmosféře opět klesat, a to rychlostí větší, než by odpovídalo pouhé radioaktivní přeměně, především přesunem  $^{14}\text{C}$  do oceánských vod. V roce 2004 byly sestaveny oficiální radiouhlíkové bombové kalibrační křivky pro čtyři světové zóny odrážející rozdíly v atmosférické cirkulaci<sup>14</sup> a v roce 2013 bylo toto rozdělení revidováno na pět světových zón<sup>15</sup>. Strmé části kalibrační křivky znamenají pro radiouhlíkové datování příslušných vzorků možnost velkého časového rozlišení, někdy i menší než jeden kalendářní rok. Na druhou stranu datování takových vzorků poskytuje téměř vždy dvojnásobný výsledek, neboť dojde k průmětu výsledku stanovení  $^{14}\text{C}$  na rostoucí i klesající část kalibračního bombového píku.

Došlo-li v důsledku antropogenní jaderné činnosti k navýšení aktivity  $^{14}\text{C}$ , spalování fosilních paliv má právě opačný efekt. Fosilní paliva již neobsahují  $^{14}\text{C}$ , neboť ten zcela podlehl radioaktivní přeměně, a proto  $\text{CO}_2$  uvolněný jejich spálením ředí přirozený obsah radiouhlíku v uhlíkové izotopické směsi. Tento efekt a dohoda o zastavení atmosférických jaderných testů z 50. let způsobuje od šedesátých let 20. století setrvalý pokles  $^{14}\text{C}$ , a to až na současné hodnoty odpovídající hodnotám před začátkem testů jaderných zbraní. Pokud bude pokračovat současné masivní spalování fosilních paliv, klesnou měřené aktivity  $^{14}\text{C}$  postupně až na středověké hodnoty, přičemž období středověku je z hlediska datování mimořádně nepříznivé, neboť aktivita  $^{14}\text{C}$  masivně kolísala od roku cca 1650 až po antropogenní jaderné testy. Důsledkem pro radiouhlíkové datování vzorků z blízké budoucnosti bude mnohonásobný výsledek pokrývající kromě blízké budoucnosti také celé období 1650–1955 (cit.<sup>16</sup>).

Datování pomocí bombového píku je využíváno v mnoha aplikacích – k určení stáří moderních lidských pozůstatků a tkání ohrožených druhů, v biomedicině k určování rychlosti obnovy nebo nárůstu jednotlivých tkání, k vyloučení falšování biopaliv fosilními palivy, k potvrzení přírodního původu kosmetických a potravinových výrobků nebo k odhalení moderních uměleckých padělků<sup>17</sup>.

V případě zkoumání lidských pozůstatků i tkání zvláště chráněných druhů je možným řešením prvního problému datování pomocí bombového píku, tedy nevyhnutelné dvojnásobnosti výsledku, analyzovat alespoň dva vzorky ve známém relativním chronologickém vztahu (mladší/starší). To většinou umožní vyloučit jeden z průmětových intervalů a zúžit výsledek datování.

Řešením druhého problému, víceznačnosti výsledku, je podobný princip, avšak vstupem musí být více vzorků se známou absolutní chronologií, která umožní sekvenci výsledků ukotvit na kalibrační křivku.

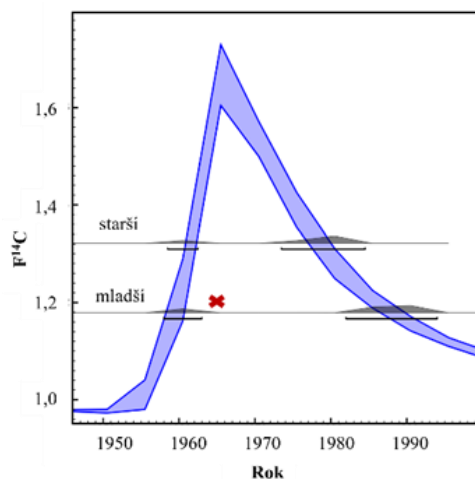
## 6. Datování tkání chráněných živočichů

Pytláctví a nelegální obchod s ohroženými živočichy a rostlinami je závažný trestný čin, který nahrává riziku přenosu zoonóz, má ničivé dopady na legální ekonomiku

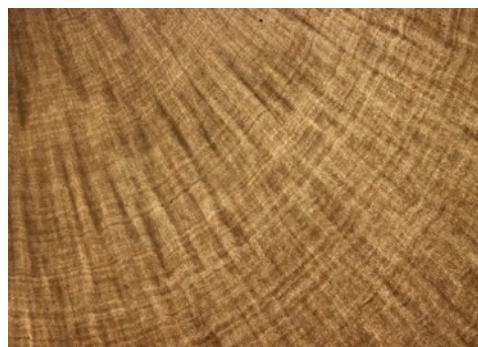
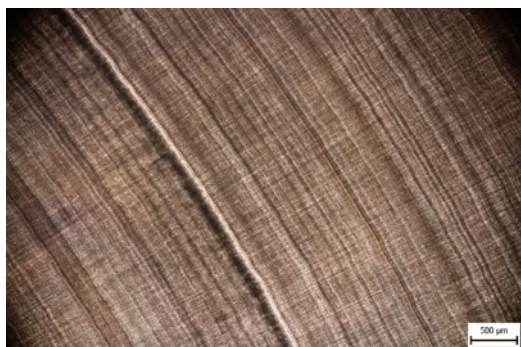
států a v krajním případě je hlavní příčinou vymírání některých druhů<sup>18–20</sup>.

K nejvíce pytlacným savcům patří sloni, luskouni a nosorožci. V případě slonů se jedná téměř výhradně o lovení za účelem získání klu a obchodu se slonovinou, ať už v původním stavu nebo upravené do nejrůznějších artefaktů, kterým je přisuzována buď estetická nebo magická hodnota. Jenom malý podíl představuje obchod s kůží, žíněmi a živými slony. Luskouni se loví za účelem zisku masa, kůže a pak také šupin, které pokrývají jejich tělo a z nichž se připravují různé artefakty a také produkty tradiční medicíny. U nosorožců se pytláci zajímají zejména o jejich rohy, kterým jsou přisuzovány léčebné účinky, a také o maso. Odhaduje se, že v tomto tisíciletí je každý den uloveno 7000 luskounů, 55 slonů a 3 nosorožci, což přivedlo tyto živočichy na pokraj vyhynutí a v současné době jsou dle tzv. Červeného seznamu ohrožených druhů klasifikovány jako ohrožení nebo kriticky ohrožení<sup>21</sup>.

V roce 1973 byla sjednána úmluva o regulaci mezinárodního obchodu s ohroženými druhy volně žijících živočichů a planě rostoucích rostlin, známá jako CITES (Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora). Česká republika tuto úmluvu ratifikovala v roce 1997. Na základě stupně ohrožení rozlišuje CITES tři základní skupiny, které korelují s mírou regulace mezinárodního obchodu: CITES I – druhy přímo ohrožené vyhynutím, mezinárodní obchod s nimi je v principu zakázán, CITES II – druhy, jejichž situace není kritická, ale bez regulace mezinárodního obchodu by mohly být ohrožené a CITES III – druhy, u nichž na regulaci mezinárodního obchodu mají primárně zájem jen některé konkrétní státy<sup>22</sup>.



Obr. 2. Dvojnásobnost výsledku radiouhlíkového datování slonoviny pomocí bombové křivky: naměřená aktivita, zde v bezrozměrných jednotkách  $F^{14}\text{C}$  – tzv. fraction modern<sup>24</sup>, se promítá na rostoucí i klesající část bombového píku kalibrační křivky a její nejistoty. Jelikož jsou vzorky odebrány z různých částí klu, musí být zachována jejich chronologie (mladší/starší). Lze tedy vyloučit část výsledného intervalu u vzorku pocházejícího z mladší části klu



Obr. 3. Výbrus slonoviny zobrazený optickou mikroskopií – tmavé a světlé čáry pravděpodobně odpovídají až denním přírůstkovým liniím. Vlevo kel divoce žijícího slona, vpravo kel slonice Sally žijící v Zoologické zahradě ve Dvoře Králové

Radiouhlíkové datování je v boji proti nelegálnímu obchodu užitečným nástrojem, který pomáhá rozhodnout, jestli je artefakt legálně obchodovatelný, či ne. Jak už bylo řečeno, v důsledku bombového píku na radiouhlíkové kalibrační křivce vzniká při datování moderních vzorků často dvojnásobný výsledek. Ten se v případě známé relativní chronologie dá zpřesnit. Například sloní kel si lze představit jako vnořené různě staré kužely slonoviny, stárnoucí směrem ke špičce klu a zevnitř ven, s rychlostí klesající se stářím slona<sup>23</sup>. Odběrem a analýzou dvou vzorků v různé délce klu, případně různé hloubce, lze pak často zpřesnit výsledek, tak jako v případě situace ilustrované na obr. 2, kdy lze vyloučit starší výsledný interval.

V případě ještě nepříznivějších výsledků je výhodou podrobná znalost přírůstání zájmové tkáně. Je zřejmé, že mnoho tkání obsahuje podrobný chronologický záznam, který by mohl být využitý ke zpřesnění výsledku forenzního datování. Na obr. 3 jsou příklady pravděpodobného chronologického záznamu slonoviny.

## 7. Dynamika tvorby lidských tkání

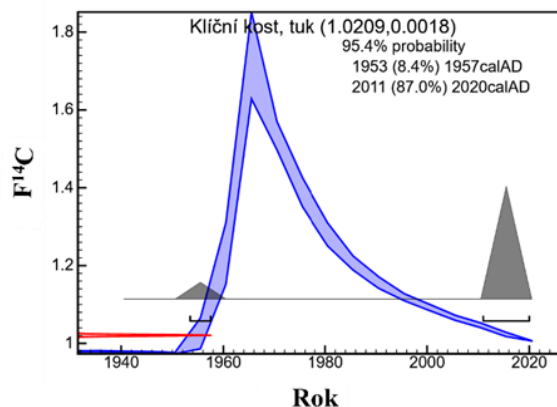
Určení stáří lidských pozůstatků pomocí radiouhlíkového datování, ať už ve službách forenzních věd či archeologie, se potýká s problémem dynamiky tvorby tkání a jejich remodelace<sup>25</sup>, neboť jednotlivé tkáně lidského těla vykazují rozdíl mezi aktivitami  $^{14}\text{C}$  v atmosféře v době úmrtí a aktivitami  $^{14}\text{C}$  v jednotlivých tkáních. Tento rozdíl, označovaný jako doba zdržení, hraje klíčovou roli při odhadu doby úmrtí nebo narození datovaného jedince<sup>26</sup>.

V rámci unikátní experimentální studie<sup>27</sup> byla analyzována série vzorků vybraných tkání ze dvou jedinců narozených v letech 1964 a 1977, u kterých byly k dispozici informace o roku narození, úmrtí, náleзовých okolnostech a přibližných životních podmínkách. K analýze byly vybrány tkáně s předpokládanou dobou rychlosti remodelace – od velmi rychlé (vlasy, ochlupení, nehty, kostní tuk) přes střední (kostní kolagen) až po nulovou (zuby). Ze vzorků byl chemickým postupem izolován keratin, kolagen nebo tuk, které byly vysušeny a spáleny na oxid uhlí-

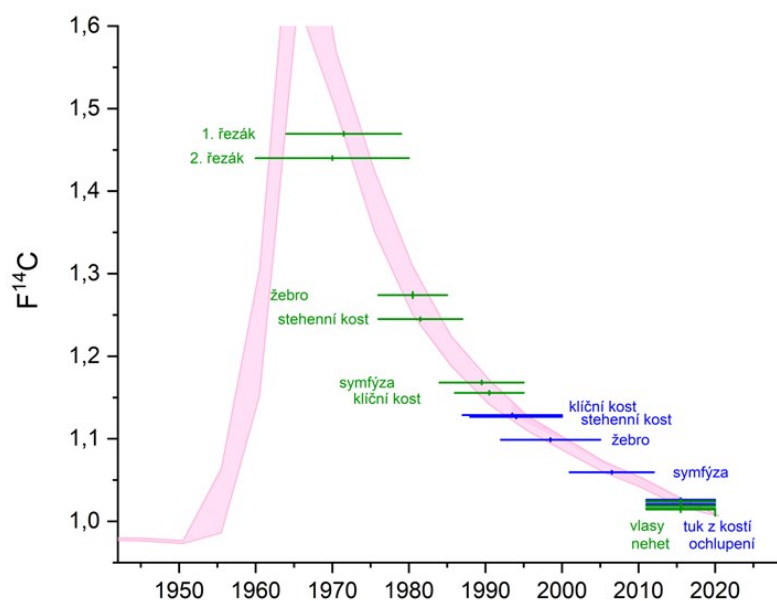
čitý<sup>28</sup>. Ten se zinkem zredukoval na čistý grafit, který byl zalisovaný v hliníkových katodách měřen na AMS systému.

Výsledkem radiouhlíkového datování byly vždy minimálně dva intervaly, v důsledku násobných průmětů aktivity  $^{14}\text{C}$  na bombovou kalibrační křivku a její nejistotu (obr. 4). Tato dvojnásobnost byla vzhledem ke známému roku narození obou jedinců potlačena a výsledný interval spadající do vzrůstající části bombového píku byl vyloučen.

Ve většině aplikací ovšem potřebné doplňující informace nejsou známy. V takovém případě lze dvojnásobnost výsledku potlačit analýzou tkání s různou rychlostí remodelace, pokud jsou k dispozici<sup>28</sup>. Na obr. 5 lze pozorovat, že nejrychlejší remodelaci podléhají vlasy a ochlupení, nehty a také tuk z kostí, jejich stáří tedy nejvíce odpovídá době úmrtí jedince. Rychlost obnovy v zubním dentinu je minimální a se znalostí tvorby zubu během vývoje lze zjistit přibližný interval narození jedince. U kostního kola-



Obr. 4. Dvojnásobnost výsledku radiouhlíkového datování pomocí bombové křivky – naměřená aktivita se promítá na rostoucí i klesající část bombového píku kalibrační křivky. Vzhledem k dalším informacím o zesnulém jedinci (rok narození 1977) lze v tomto případě vyloučit starší výsledek<sup>27</sup>.



Obr. 5. Intervaly stáří různých tkání odebraných dvěma jedincům, ročníky narození 1964 (zeleně) a 1977 (modře). Růžově je vyznačena bombová radiouhlíková křivka NH1 pro část severní hemisféry, do které spadá i Česká republika. Obrázek je barevně dostupný v online podobě.

genu je doba zadržení  $^{14}\text{C}$  delší a pravděpodobně závisí i na biologickém věku, tedy u starších jedinců se prodlužuje. Dle dostupné literatury<sup>29</sup> dochází v období od 20 do 80 let k poklesu rychlosti obměny kolagenu o 1,5–3 % za každý rok. Dobu zdržení  $^{14}\text{C}$  může také ovlivňovat strava jedince či užívání léků<sup>30</sup>. Na základě výsledků analýz  $^{14}\text{C}$  ve formě kostního kolagenu izolovaného z jednotlivých typů kostí nelze jednoznačně určit typ kosti, která by se vyznačovala nejkratší dobou zdržení  $^{14}\text{C}$ . Tyto závěry potvrzují i ostatní dostupné studie<sup>25,26,31</sup>.

*Autorský kolektiv děkuje za finanční podporu Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy České republiky, v projektu OP VVV č. CZ.02.1.01/0.0/0.0/16\_019/0000728 – Výzkum ultrastopových izotopů a jejich využití v sociálních a environmentálních vědách urychlovačovou hmotnostní spektrometrií (RAMSES) a Ministerstvu vnitra České republiky, v projektu VJ01010026 – Efektivní využívání forenzních metod v dokazování v oblasti boje proti wildlife crime.*

## LITERATURA

1. Godwin H.: *Nature* 195, 984 (1962).
2. Reimer P. J. a 41 spoluautorů: *Radiocarbon* 62, 725 (2020).
3. Libby W. F.: *Phys. Rev.* 69, 681 (1946).
4. Taylor R. W.: *Radiocarbon* 56, 913 (2014).
5. Libby W. F.: Nobel lecture, Les Prix Nobel En 1960, 95, Nobel Foundation, Stockholm. <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/1960/libby/lecture/>. Staženo 31. 12. 2022.

6. Currie L. A.: *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.* 109, 185 (2004).
7. De Vries H.: *Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Akademie Van Wetenschappen Series B-Palaeontology Geology Physics Chemistry Anthropology* B61, 94 (1958).
8. Olsson I. U.: *Radiocarbon* 51, 1 (2009).
9. Reimer P. J.: *Radiocarbon* 64, 523 (2022).
10. Stuvier M., Polach H. A.: *Radiocarbon* 19, 255 (1977).
11. Oxcal online, dostupné na <https://c14.arch.ox.ac.uk/oxcal/OxCal.html>. Staženo 31. 12. 2022.
12. Muller E. A.: *Science* 196, 489 (1977).
13. Němec M.: *Chem. Listy* 117, 86 (2023).
14. Hua Q., Barbetti M.: *Radiocarbon* 46, 1273 (2004).
15. Hua Q., Barbetti M., Rakowski A. Z.: *Radiocarbon* 55, 2059 (2013).
16. Graven H. D.: *Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.A.* 112, 9542 (2015).
17. Hajdas I.: *Radiocarbon* 51, 79 (2009).
18. Singh R. R., Goyal S. P., Khanna P. P., Mukherjee P. K., Sukumar R.: *Forensic Sci. Int.* 162, 144 (2006).
19. Wasser S. K., Brown L., Mailand C., Mondol S., Clark W., Laurie C., Weir B.: *Science* 349, 84 (2015).
20. Roe D., Dickman A., Kock R., Milner-Gullnad E. J., Rihoy E., Sasrolfes M.: *World Dev.* 136, 105121 (2020).
21. The IUCN Red List of threatened species (2017). <https://www.iucnredlist.org/>. Staženo 31. 12. 2022.

22. CITES, Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora, signed at Washington, D.C., USA (1973). <https://cites.org/eng/disc/text.php>. Staženo 31. 12. 2022.
23. Valášek V., Pachnerová Brabcová K., Kufnerová J., Molnár M., Světlík I.: *Radiat. Prot. Dosim.* 198, 675 (2022).
24. Reimer P. J., Brown T. A., Reimer R. W.: *Radiocarbon* 46, 129 (2004).
25. Ubelaker D. H.: *J. Forensic Sci.* 59, 1466 (2014).
26. Ubelaker D. H., Thomas C., Olson J. E.: *Forensic Sci. Int.* 251, 56 (2015).
27. Petrová M.: *Radiouhlíkové datování kostí pro forenzní účely. Diplomová práce.* Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha 2019.
28. Handlos P. a 11 spoluautorů.: *Radiocarbon* 60, 1017 (2018).
29. Hedges R. E.: *Am. J. Phys. Anthropology* 133, 808 (2007).
30. Geyh M. A.: *Radiocarbon* 43, 723 (2001).
31. Wild E.-M., Arlamovsky K. A., Golser R., Kutschera W., Priller A., Puchegger S., Rom W., Steier P., Vycudilik W.: *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* 172, 944 (2000).

**V. Valášek<sup>a,b</sup>, M. Petrová<sup>a,c</sup>, I. Světlík<sup>a</sup>, V. Brychová<sup>a</sup>, J. Kubančák<sup>d</sup>, and K. Pachnerová Brabcová<sup>a</sup>** (<sup>a</sup>*Nuclear Physics Institute of the Academy of Sciences of the Czech Republic, Prague*, <sup>b</sup>*Institute for Environmental Studies, Faculty of Science, Charles University, Prague*, <sup>c</sup>*Faculty of Nuclear Sciences and Physical Engineering, Czech Technical University in Prague, Prague, Czech Republic*, <sup>d</sup>*Institute of Experimental Physics, Slovak Academy of Sciences, Košice, Slovakia*): **Milestones and Selected Applications of Radiocarbon Dating**

The history of radiocarbon dating is defined by several major milestones – its own discovery, the forced revision of basic principles, the discovery of accelerator mass spectrometry and anthropogenic influences. The current capabilities of the method are demonstrated through two forensic applications in the field of crime against humans and endangered species.

**Keywords:** radiocarbon dating, accelerator mass spectrometry, forensic applications, ivory

#### *Acknowledgements*

*This work was supported by Ministry of Education, Youth and Sport of the Czech Republic (Grant number: CZ.02.1.01/0.0/0.0/16\_019/0000728), and by Ministry of Interior of the Czech Republic (Grant number: No. VJ01010026).*