

FORUM / 2021 / ROČ. XI / Č. 1

PRO KONZERVÁTORY-RESTAURÁTORY FORUM FOR CONSERVATORS-RESTORERS

2021 / Vol. XI / No. 1
Peer-reviewed open access journal

Chief editor: Ing. Alena Selucká
Editors: Mgr. Pavla Stöhrová, Mgr. Jana Fricová

Editorial Board:

Ing. Ivo Štěpánek (Head of Editorial Board)
doc. Dr. Ing. Michal Ďurovič
akad. mal. Igor Fogaš
Ing. Pavel Jirásek
Ing. Jan Josef
doc. akad. soch. Petr Kuthan
prof. RNDr. Jiří Příhoda, CSc.
Ing. Radka Šefců
Mgr. Pavla Stöhrová (Secretary)

Open access since 2019 available for free
on <https://mck.technicalmuseum.cz/casopis-fkr/>
The journal is indexed and abstracted in EBSCO.

Published by:

Technické muzeum v Brně
Purkyňova 105, 612 00 Brno, Czech Republic

Contact for communication:

fricova@tmbrno.cz / stohrova@tmbrno.cz / selucka@tmbrno.cz

© Technické muzeum v Brně, 2021
ISSN (Online) 2571-4384
ISSN (Print) 1805-0050



IZOTOPY PRO DATOVÁNÍ A JEJICH DALŠÍ VYUŽITÍ

Jiří Příhoda¹ • Gabriela Vyskočilová¹ • Věra Klontza-Jaklová²

1 Ústav chemie, Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity

2 Ústav archeologie a muzeologie, Filozofická fakulta MU

Tento přehledový článek pojednává o využití vybraných izotopů v oblasti archeologie a péče o předměty kulturního dědictví. Pro datování vzorků s obsahem uhlíku je vhodná radiokarbonová metoda, nacházející použití v archeologické a konzervátorsko-restaurátorské praxi. Pokud je toto datování doplněno izotopovou analýzou uhlíku a dusíku, lze získat další užitečné informace, jako jsou například stravovací návyky zkoumaných jedinců, lokální původ vzorku apod. Izotopová analýza kyslíku pak vypovídá o mobilitě těchto jedinců v průběhu života. Příspěvek stručně popisuje princip izotopových metod s důrazem na radiokarbonovou metodu datování a uvádí přehled metod méně obvyklé jaderné chronologie (geochronologie), což je metoda vhodná pro určení stáří mineralogických a geologických vzorků, které se rovněž běžně nacházejí v muzeích. Dále jsou uváděny příklady použití izotopových datovacích metod při výzkumech Ústavu archeologie a muzeologie FF MU.

Klíčová slova: metody datování, radiokarbonová metoda, AMS, izotopová analýza v archeologii

ISOTOPES FOR DATING AND THEIR FURTHER USE

This review article deals with the use of selected isotopes in conservation-restoration or archaeological practice. The radiocarbon method, which is used in archaeological and conservation-restoration practice, is suitable for dating carbon-bearing samples. If this dating is complemented with an isotopic analysis of carbon and nitrogen, additional useful information can be obtained, such as the eating habits of the subjects studied, the local origin of the sample, etc. Isotopic oxygen analysis then indicates the mobility of these subjects over the course of their lives, etc. The paper briefly describes the principle of isotopic methods with emphasis on the radiocarbon dating method and gives a brief overview of the less common nuclear chronology (geochronology), a method for determining the age of mineralogical and geological samples, which are also commonly found in museums. Examples of the use of isotopic dating methods in the research of the Department of Archaeology and Museology at the Faculty of Arts of Masaryk University are also given.

Keywords: methods of dating, radiocarbon method, AMS, isotope analysis in archaeology

prof. RNDr. Jiří Příhoda, CSc., vystudoval obor fyzikální chemie, specializace radiochemie. V současné době je profesorem anorganické chemie na Ústavu chemie PFF MU Brno. Je garantem bakalářského i magisterského studijního programu Chemie a technologie materiálů pro konzervování-restaurování. (jiriprihoda@seznam.cz)

KOSMOGENNÍ RADIONUKLIDY

Pod pojmem kosmogenní radionuklidy rozumíme takové přírodní radionuklidy, které vznikají při průchodu vysokoenergetického kosmického záření svrchními vrstvami atmosféry. Patří sem především uhlík ¹⁴C, který se následně po svém vzniku vyskytuje ve stopových množstvích všude tam, kde najdeme i ostatní přirozené izotopy uhlíku, tj. ¹²C a ¹³C. Dále se v atmosféře mohou vyskytovat ve velmi malých množstvích tritium ³H, příp. ^{7,10}Be, ²²Na, ³²P, ³⁵S, ³⁶Cl a další. Pro účely datování vzorků s obsahem uhlíku, majícího biologický původ, se užívá radioizotop uhlíku ¹⁴C, což je nízkenergetický β⁻ zářič s relativně dlouhým poločasem přeměny (5 730 let) [Hála, 1998]. Obecné charakteristiky izotopů uhlíku a některých vybraných izotopů, které jsou předmětem toho sdělení, uvádí Tab. 1.

Tab. 1 Charakteristiky izotopů vybraných prvků pro datování / *Isotope characteristics of selected elements for dating*

| Izotop | Charakteristika | Přírodní zastoupení (%) | Rozmezí přirozeného složení (%) | Využití |
|-----------------|--|-------------------------------------|---------------------------------|--|
| ¹² C | stabilní | 98,892 | 98,853–99,037 | |
| ¹³ C | stabilní | 1,108 | 0,963–1,147 | zjišťování poměru ¹² C a ¹³ C se používá ke stanovení biologické aktivity v minulosti a k měření různých typů fotosyntézy [Ivlev, 2001] ¹³ C NMR spektroskopie izotopická analýza s cílem určit zdroj bílkovin ve vzorku organického původu (viz text dále) |
| ¹⁴ C | β ⁻ zářič T _{1/2} = 5 730 let λ = 3,84 · 10 ⁻¹² s ⁻¹ E _{max} = 156 keV | přeměna na ¹⁴ N stopy | <10 ⁻¹² | datování radiokarbonovou metodou |
| ¹⁵ N | stabilní | 0,365 | - | izotopická analýza s cílem určit zdroj bílkovin ve vzorku organického původu (viz text dále) |
| ¹⁸ O | stabilní | 0,204 | - | z poměru počtu atomů ¹⁶ O/ ¹⁸ O lze stanovit například klimatické pásmo původu vzorku [Gray – Thomson 1977, Pellegrini et al. 2016] |

Legenda: T_{1/2} – poločas přeměny; λ – přeměnová konstanta; E_{max} – maximální energie beta záření [Kolektiv, 1964].

Principy radiokarbonové metody datování

Tato metoda je určena především pro datování veškerého organického materiálu. V přírodě připadá na 10^{12} atomů ^{12}C jeden atom radionuklidu ^{14}C . Pokud jde o jeho radioaktivitu, pak na 1 g uhlíku v živé hmotě připadá 15,3 radioaktivní přeměny ^{14}C za minutu (tzv. rovnovážná měrná aktivita A_0) [Hála, 1998; L'Annunziata, 2007].

Radiokarbonová metoda byla poprvé popsána roku 1947¹ [Libby 1946; 1955; Anderson et al. 1947] a používá se především v archeologii a dalších vědách (biologie, pedologie, geologie aj.). Konkrétně lze datovat různé typy vzorků, jako jsou kosti, uhlíky z pravěkých ohnišť a žárovišť, dřeva a jiné zbytky rostlin, dále pak zuby (dentin), textilie, kůže, vlasy a chlupy, půda, rašelina, látky organického původu nacházející se v keramických nádobách a dalších anorganických artefaktech (například železná struska) či karbonátové uloženiny (vápenaté schránky mlžů) [Hunt, 2017; Rink, 2015]. O historii této metody, teorii, úskalích a praktickém využití radiokarbonové metody pro datování uhlíkatých vzorků pojednává velmi obsírně i publikace Světlíka a kol. z Ústavu jaderné fyziky ČAV [Světlík, 2007].

Uhlík ^{14}C vzniká ve vyšších vrstvách atmosféry z elementárního dusíku ^{14}N jadernou reakcí $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$. Jádra dusíku jsou ostřelována tokem neutronů, které přicházejí z vesmíru, příp. vznikají jinými jadernými reakcemi. Neutron vniká do jádra ^{14}N , následně se z takto aktivovaného jádra ^{14}N uvolní proton a vzniká tak dceřiný produkt této jaderné reakce, a to jádro ^{14}C ve vysoce vzbuzeném stavu. V přítomnosti atmosférického kyslíku pak vzniká $^{14}\text{CO}_2$, který v důsledku své vyšší měrné hmotnosti, v porovnání s měrnou hmotností ostatních složek vzduchu, klesá do nižších vrstev atmosféry. Zde se účastní tzv. koloběhu uhlíku v přírodě. Tento koloběh začíná fotosyntézou v rostlinách obsahujících chlorofyl. Produkty fotosyntézy buď zůstanou v těchto rostlinách, nebo se stanou po jejich konzumaci součástí potravinového řetězce dalších živých organismů. Po dobu života organismu se v jeho těle udržuje konstantní poměr počtu atomů $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$. Tato situace trvá do doby, kdy organismus odumře. Pak už další uhlík, včetně ^{14}C , do mrtvého těla nevstupuje a od okamžiku smrti organismu se v něm přítomný ^{14}C pouze přeměňuje v důsledku β^- procesu na dusík ^{14}N , jeho obsah tedy klesá. Tento pokles aktivity se řídí exponenciální křivkou, která je grafickým vyjádřením základního zákona radioaktivní přeměny [Hála, 1998; L'Annunziata, 2007]. Pokles aktivity ^{14}C s časem je patrný z Tab. 2.

Tab. 2 Obsah ^{14}C v závislosti na stáří vzorku / Content of ^{14}C depending on sample age

| Doba přeměny v letech (= stáří vzorku) | Procento přeměněného uhlíku ^{14}C | Doba přeměny v letech (= stáří vzorku) | Procento přeměněného uhlíku ^{14}C |
|--|---|--|---|
| 5 730 | 50 % | 34 380 | 98,4375 % |
| 11 460 | 75 % | 40 110 | 99,21875 % |
| 17 190 | 87,5 % | 45 840 | 99,609375 % |
| 22 920 | 93,75 % | 51 570 | 99,8046875 % |
| 28 650 | 96,875 % | | |

Ze zbytkové aktivity ^{14}C ve vzorku, jehož stáří stanovujeme, je pak možné vypočítat dobu, kdy byl vzorek vyřazen z koloběhu uhlíku v přírodě, tedy kdy organismus odumřel.

Pro aktivitu vzorku A_t , resp. pro počty částic N_t , platí následující vztahy:

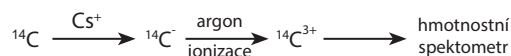
$$A_t = A_0 \cdot e^{-\lambda t}, \quad \text{resp.} \quad N_t = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

kde A_t , resp. N_t , je aktivita (počty částic) v okamžiku měření, tj. po uplynutí času t (odpovídá stáří vzorku), λ je přeměnová konstanta pro jadernou přeměnu ^{14}C na dusík ^{14}N , e je základ přirozených logaritmu. Za A_0 lze vzít hodnotu 15,3 přeměny min^{-1} , příp. aktivita standardu [Hála, 1998].

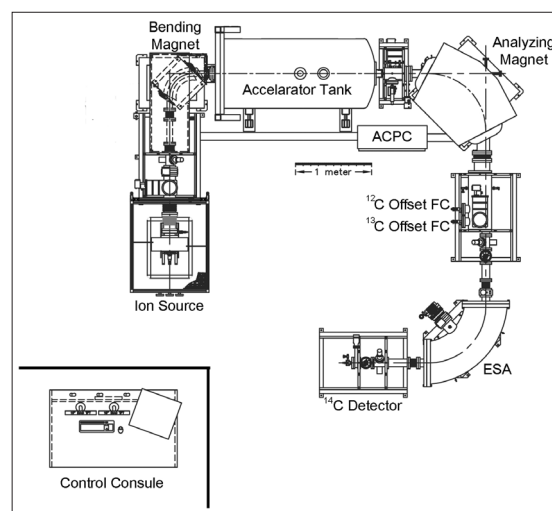
Ze zbytkové aktivity ^{14}C ve vzorku, jehož stáří stanovujeme, je pak možné vypočítat dobu, kdy byl vzorek vyřazen z koloběhu uhlíku v přírodě, tedy kdy organismus odumřel:

$$t = -1/\lambda \ln A_t/A_0 \quad \text{resp.} \quad t = -1/\lambda \ln N_t/N_0$$

Radiokarbonovou metodou, kdy se měří aktivita ^{14}C klasickými radiometrickými metodami (například proporčním počítačem, kapalinovou scintilací) lze teoreticky datovat předměty cca do 40 000–50 000 let tedy do uplynutí cca 10 poločasů přeměny, kdy se vzorek s obsahem ^{14}C považuje prakticky za vymřelý (Tab. 2). Takto staré vzorky však mají obecně velmi nízkou aktivitu ^{14}C , a klasická radiometrická měření jsou proto zatížena značnou chybou. Datování na základě měření zbytkové aktivity ^{14}C je proto velmi zdoluhavé a často vyžaduje proměřovat velké hmotnosti vzorků, což může činit instrumentální potíže. Proto se od této klasické metody datování, kdy se využívá radiometrických metod, upouští. Navíc, obsah ^{14}C může být ovlivněn například sluneční aktivitou, jak bylo zjištěno proměřením aktivity letokruhů borovice osinaté¹. Zpětně lze vystopovat léta zvýšené sluneční aktivity a obsah ^{14}C pak lze korigovat. Radiokarbonovou metodou stanovení stáří nelze použít ani pro artefakty z posledních dvou století. V té době se kvůli spalování uhlí a ropy dostalo do ovzduší velké množství uhlíku pocházejícího z pozůstatků prastarých organismů přeměněných v ropu a uhlí, které již neobsahují radioaktivní izotop ^{14}C . Dále vlivem jaderných pokusů v atmosféře v druhé polovině minulého století se naopak množství radioaktivního uhlíku v ovzduší zvýšilo¹. Proto je zapotřebí různých korekcí, příp. se aktivity zkoumaných vzorků porovnávají se standardem, který se přechovává v the National Institute for Standards and Technology (USA). Podrobně o úskalích použití radiokarbonové metody pojednává přehledný článek Světlíka a kol. [Světlík, 2007]. Stáří vzorku lze vedle stanovení zbytkové aktivity ^{14}C určit také na základě stanovení poměru počtu atomů $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$. Tento poměr lze stanovit metodou urychlovačové hmotnostní spektrometrie (AMS – Accelerated Mass Spectrometry³). Citlivost hmotnostní spektrometrie dává možnost datovat i starší vzorky [Hála, 1998]. Podobné zařízení bude od r. 2021 k dispozici v Radiouhlíkové laboratoři provozované společně ÚJF AV ČR v.v.i. a ARÚ AV ČR, Praha, v.v.i.² Metoda AMS je založena na ionizaci vzorku přeměněného na elementární uhlík pomocí iontů cesia.



Ze zjištěného poměru počtu atomů $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ lze dopočítat stáří vzorku. Blokové schéma přístroje pro AMS je znázorněno na Obr. 1, konkrétní přístroj na Obr. 2.



Obr. 1 Blokové schéma zařízení pro AMS (D-REAMS Radiocarbon Laboratory, Weizmann Institute of Science, Rehovot, Israel). Foto: J. Přihoda / Block diagram of the AMS device (D-REAMS Radiocarbon Laboratory, Weizmann Institute of Science, Rehovot, Israel). Photo: J. Přihoda



Obr. 2 Pohled na zařízení pro datování metodou AMS (D-REAMS Radiocarbon Laboratory, Weizmann Institute of Science, Rehovot, Israel). Foto: J. Příhoda / View of the AMS device used for dating (D-REAMS Radiocarbon Laboratory, Weizmann Institute of Science, Rehovot, Israel). Photo: J. Příhoda

Jaderná chronologie – určování stáří nerostů

Metoda jaderné chronologie (také geochronologie) vychází z faktu, že ve zkoumaném minerálu je v době jeho krystalizace přítomen některý, zpravidla velmi dlouhodobý, přírodní radionuklid **X**, který se s časem přeměňuje na stabilní produkt **Y** [Hála, 1998; Rink, 2015].

X (radioaktivní) → **Y** (stabilní)

Pro počet částic stabilního dceřiného produktu **Y**, který vznikl jadernou přeměnou radionuklidu **X**, platí vztah [Hála, 1998]:

$$N_y = N_x(e^{\lambda t} - 1)$$

Pro stáří vzorku pak platí vztah:

$$t = 1/\lambda (N_y/N_x + 1)$$

kde N jsou počty částic dceřiného (N_y) a mateřského (N_x) nuklidu v době t , což je doba, která uplynula od krystalizace nerostu do současnosti.

Tato metoda určení stáří vychází z několika předpokladů:

- v době krystalizace nerostu je v něm obsažen pouze dlouhodobý radioaktivní nuklid **X**,
- ten se přeměňuje na stabilní produkt **Y**, který se v nerostu pouze hromadí,
- nepředpokládají se ztráty stabilního produktu **Y** do okolí (například difuzí).

Nezbytnou podmínkou ke stanovení stáří je tedy nalezení separační metody, která stanoví zbytkové množství **X** a množství vzniklého **Y**. Známe-li obsah obou nuklidů (**X** i **Y**) v době stanovování stáří, lze se na základě těchto výsledků dopočítat stáří vzorku. Je tedy zřejmé, že určení stáří těchto geologických a mineralogických vzorků je dáno kombinací radiometrické a chemické analýzy. Podmínkou úspěchu je umění najít vhodné analytické metody a úspěšně je aplikovat.

Tab. 3 poskytuje přehled některých užívaných metod, pouze draslík-argonové metody a metody uranové je stručně naznačen, pro lepší představu, postup stanovení.

Tab. 3 Přehled metod jaderné chronologie / Overview of nuclear chronology methods

| Metoda | Popis jaderného děje X (radioaktivní) → Y (stabilní) | Obsah mateřského nuklidu v přírodní směsi (%) |
|--|--|--|
| Metoda draslík-argonová | ^{40}K ($T_{1/2} = 1,27 \cdot 10^{10}$ roků) → ^{40}Ar | 0,012 |
| Metoda rubidium-stronciová | ^{87}Rb ($T_{1/2} = 4,7 \cdot 10^{10}$ roků) → ^{87}Sr | 27,85 |
| Metoda rhenium-osmiová | ^{187}Re ($T_{1/2} = 6 \cdot 10^{10}$ roků) → ^{187}Os | 62,93 |
| Metoda lutecium-hafniová | ^{176}Lu ($T_{1/2} = 2,1 \cdot 10^{10}$ roků) → ^{176}Hf | 2,6 |
| Metoda samarium-neodymová | ^{147}Sm ($T_{1/2} = 1,1 \cdot 10^{10}$ roků) → ^{147}Nd | 14,97 |
| Metoda uranová (využívá se samovolného štěpení) | ^{238}U ($T_{1/2} = 1 \cdot 10^{16}$ roků, pro samovolné štěpení) → nuklidy Xe a štěpné trosky | 99,3 |

- Obsah ^{40}K se zjistí z celkového obsahu draslíku a jeho zastoupení v přírodní směsi, což je 0,012 %. ^{40}Ar se stanoví po zahřátí vzorku v křemenné aparatuře na 2 000 °C – uvolněný argon se stanoví hmotnostní spektrometrií. Takto bylo zjištěno, že stáří pozemských hornin je cca $2,3 \cdot 10^9$ let a stáří měsíčních hornin a kamenných meteoritů kolem $4,5 \cdot 10^9$ roků.
- Nuklidy Xe se stanoví hmotnostní spektrometrií. Štěpné trosky opouštějí místo svého vzniku s celkovou energií cca 170 MeV a při brzdění vyvolávají v minerálu poruchy krystalové mřížky, které se studují pod mikroskopem a které jsou schopny vypovídat o stáří horniny.

ODEBRÁNÍ A PŘÍPRAVA VZORKŮ PRO MĚŘENÍ

Odběr muzeologických a jiných vzorků pro radiokarbonovou metodu

Pro účely datování a případné izotopové analýzy je nutno počítat s tím, že odebrání vzorku pro stanovení je destruktivním zásahem do artefaktu. Množství odebraného vzorku je však malé, například u neztouchnivého dřeva je vhodné množství 50 mg, u uhlíkatých vzorků kolem 150 mg a uhlíků postačuje kolem 20 mg [Rink, 2015].³ Způsob odebrání vzorku velmi závisí na tom, jak bude vzorek dále zpracováván pro vlastní měření. Vždy je potřebné konzultovat způsob odebrání, případně další zpracování vzorku s pracovištěm, které bude měření provádět. Jednoduchou přípravu vzorku lze po dohodě provádět i vlastním silami. Složitější úpravy se však doporučuje provést ve spolupráci s institucemi, které na potřebné operace mají dostatečné laboratorní a instrumentální vybavení.

Při odběru vzorku z předmětu kulturního dědictví je potřeba vždy dodržovat obecná pravidla pro jeho odběr. Odebíraný vzorek by měl být pokud možno co nejmenší. V ideálním případě lze použít drobné úlomky či odpadlé části artefaktu. Pokud se jedná o analýzu kompaktního materiálu, měl by být vzorek odebrán tak, aby nedošlo k poškození předmětu samotného, k narušení jeho integrity nebo estetické hodnoty. Vhodné je odebírat vzorek například z některé nepohledové části předmětu. Je však nezbytné vždy vybrat reprezentativní místo odběru, aby nedošlo ke zkreslení výsledků. V případě, že je artefakt intaktní a nemohla by být zachována výše uvedená kritéria, dáváme přednost intaktnosti předmětu před vzorkováním.

Příprava archeologických vzorků

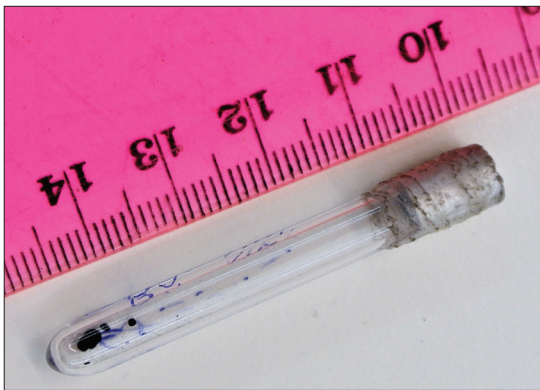
Již v počáteční fázi terénní akce je potřeba počítat s případným odběrem vzorků z archeologického materiálu. Sterilní balicí materiál (alobal, nebo igelitový sáček, nejlépe zip-lock), rukavice a zamezení manipulace s látkami, které by mohly vzorek i nezáměrně kontaminovat (cigarety, potraviny, kosmetické přípravky) jsou dnes již standardem i u záchranných archeologických akcí. Archeologický materiál může být následně vzorkován na základě prvního předběžného vyhodnocení materiálu nebo v dalších analytických fázích. Zde je nutná komunikace archeologa nejen s konzervátorem, ale i s pracovníky laboratoří, kde se bude měření obsahu uhlíku potenciálně provádět. Jde především o to, aby v případě chemické úpravy vzorků byly použity takové postupy, které by zabránily kontaminaci vzorku jiným než sledovaným uhlíkem (organická rozpouštědla, apod).

Důležitým krokem pro úspěšné stanovení stáří vzorku je výběr laboratoře. Dnes máme k dispozici velký výběr těchto pracovišť po celém světě. Rozhodujícím kritériem by neměla být cena služby nebo rychlost. První indicií dobré laboratoře je aplikační formulář, ve kterém si laboratoř žádá informace o vzorku. Konkrétní upřesňující informace

jí pak dávají lepší možnost odhalit potenciální chybné měření a měření zopakovat nebo eliminovat případ jiného ovlivnění vzorku (například tzv. fosilním CO_2 , jak bude vysvětleno dále). Dalším kritériem je, že laboratoř kromě nekalibrovaného data (v BP, viz dále) poskytuje i naměřené výsledky uhlíkové analýzy, které by také měly být součástí každé publikace. V případě specifického materiálu je dobré zjistit, zda má vybraná laboratoř již zkušenosti s konkrétním materiálem (například kosti ze žárových hrobů, materiál z východního Středomoří apod.). V ideálním případě se doporučuje odeslat zkoumaný materiál do dvou nezávislých laboratoří.

Zpracování vzorků pro AMS

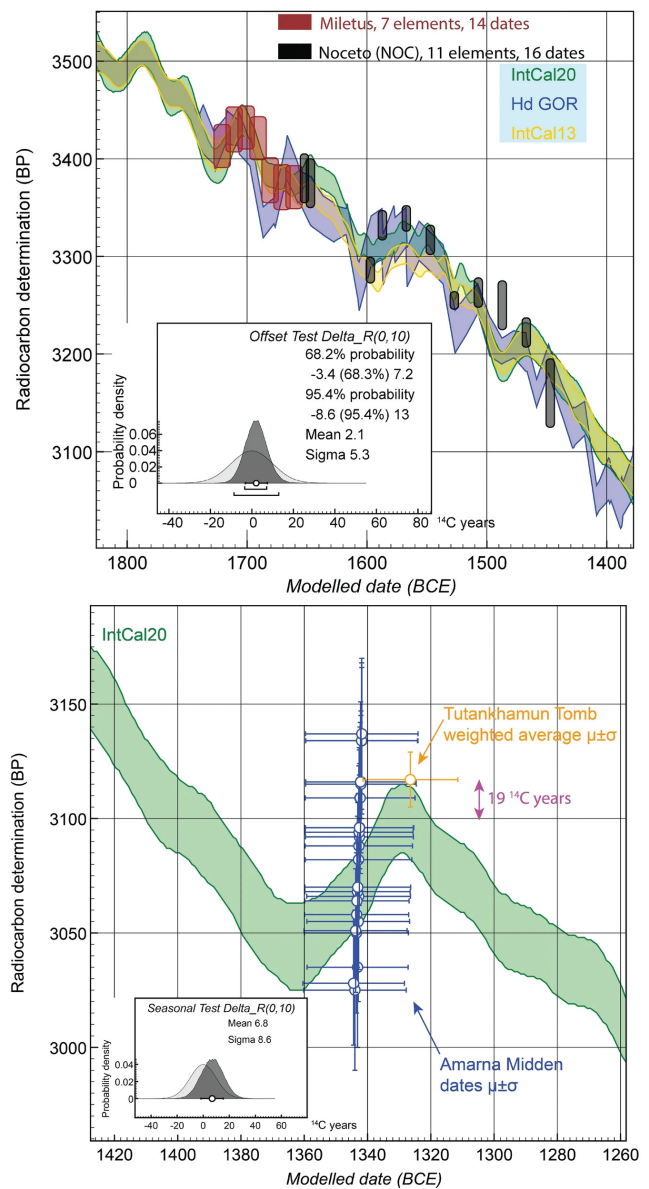
Konkrétní postupy se liší v závislosti na typu vzorku, použité metodě datování a možnostech vybrané laboratoře. Zpravidla se patříčně očistěné vzorky s obsahem uhlíku nejprve v reakčních nádobkách autoklávového typu katalyticky přemění na plynný CO_2 . Tento oxid uhlíčitý se v dalším zařízení opět katalyticky zredukuje na čistý uhlík, který se pak ve skleněné ampulce (Obr. 3) vkládá do přístroje (Obr. 2).



Obr. 3 Vzorek uhlíku připravený pro měření AMS. Foto: J. Příhoda
A carbon sample prepared for AMS measurement.
Photo: J. Příhoda

Izotopy a archeologie

Objevení metody radiokarbonového datování mělo v archeologii 50. a 60. let 20. století velmi pozitivní ohlas. S nadšením se očekávalo, že budou stanovena data prehistorických epoch, kdy se archeologie opírala pouze o odhady vyplývající z terénních situací, typologického a stylového vývoje různých typů artefaktů, případně budou ověřena data historických událostí. První pokusy vedly k testování metody na vzorcích z kontextů, které měly více či méně dobře historicky stanovené datum [Klontza-Jaklová, 2016]. Již první výsledky ukázaly, že to není tak jednoduché a že poločas přeměny radioaktivního uhlíku není v reálných podmínkách lineární funkcí přímé úměry. Část archeologů nad metodou mávla rukou, ale vědecký problém už byl na světě a od té doby došlo k mnohočetnému zpřesnění metody. První „revolucí“ pro využití radiokarbonové metody k dataci archeologických artefaktů byla možnost porovnání stáří stromu datovaného pomocí letokruhů (dendrochronologie)⁴ s výsledky získanými radiokarbonovou metodou. Podstatou dendrochronologie je, že každý rok naroste specifické množství cévnatiny – letokruhu, a to v závislosti na růstových podmínkách v čase a prostoru. Pořadí specifických letokruhů představuje jakýsi „čárový kód“ (barcode). Každá taková charakteristická sekvence specifických letokruhů se opakuje na všech stromech stejného druhu jednoho regionu a shodného období [Kyncl, 2017]. Vzorky jednotlivých letokruhů jsou podrobovány radiokarbonovému měření. Výsledky jsou vynášeny do souřadnic, kde osu y tvoří laboratorní datum (označované BP = Before Present, kdy současnost byla stanovena na rok 1950) a osu x kalendářní datum (označované calBC = calibrated Before Christ – calAD = calibrated Anno Domini). Jednomu laboratornímu datu tak může odpovídat více dat kalendářních nebo dokonce jejich pásmo (Obr. 4). První kalibrační křivka byla prezentována v roce 1967 [Suess, 1970] a od roku 1998 je pravidelně aktualizovaná. Poslední aktualizace, která doznala mnohá zjemnění právě v některých obdobích (například období kolem poloviny 2. tisíciletí před n. l.), byla publikována v roce 2020 [Reimer 2020].⁵



Obr. 4 Příklad úseku radiokarbonové kalibrační křivky IntCal20: a) radiokarbonové odchylky a chronologie Starého světa ve vztahu k Anatólii, Mezopotámii, Egyptu a Thěře (Santorini) v časovém úseku 1820 calBC – 1380 calBC. b) radiokarbonová data tzv. Amarnského horizontu vynesena do kalibrační křivky [Manning, 2020]. / Example of the IntCal20 radiocarbon calibration curve: a) radiocarbon variations and the chronology of the Old World in relation to Anatolia, Mesopotamia, Egypt, and Thera (Santorini) – in the time span 1820 calBC – 1380 calBC. b) radiocarbon data of the so-called Amarna horizon projected into the calibration curve [Manning, 2020].

Postupně byla identifikována řada faktorů ovlivňujících rychlost přeměny radioaktivního uhlíku a následně i poměr zastoupení izotopů $^{14}\text{C}/^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ v závislosti například na intenzitě kosmického záření, nebo na vlivu stravovacích zvyklostí zkoumaného jedince, jak bude vysvětleno dále. Laboratorně naměřená data je možné kalibrovat například v programu OxCal,⁵ který je volně přístupný na stránkách laboratoře Univerzity v Oxfordu.

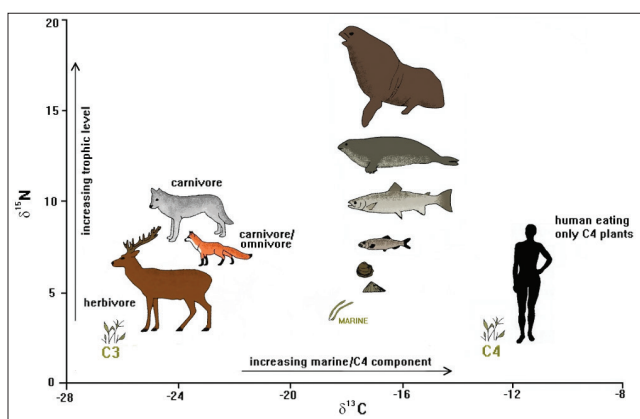
Historická skutečnost je obvykle složitější než grafický výstup, proto je často třeba domodelovat pravděpodobnost chronologické škály. K tomu se využívají různé statistické metody, které jsou také dostupné online třeba například právě na OxCalu.⁵ Tyto metody vycházejí z možnosti uplatnit některé známé historické nebo archeologické limity.⁶ Taková ohraničení jsou zahrnuta do modelu zpřesňujícího datum historické události. Proto se v archeologické literatuře obvykle setkáváme s uváděním chronologických údajů v pravděpodobnostních pásmech.

Ještě před 20 lety byla možnost radiokarbonového datování spíše výjimkou pro dobře financované výzkumy, dnes je poměrně běžnou záležitostí. Změnil se i otázkový aparát archeologie. Zatímco dříve převládaly primární otázky typu: Jak je to staré? Dnes jsou radiokarbonová data součástí komplexních kauzálních problémů.

Problémy radiokarbonového datování: případ Santorini

Pokud vyslovíme v archeologických kruzích slovo radiokarbonová metoda, většinou se okamžitě vybaví případ datování výbuchu santorinského vulkánu v době bronzové, ke kterému mělo dojít v polovině 15. století před n. l. Právě z minojského města na Santorini, zcela zničeného gigantickým výbuchem tamního vulkánu, byly odebrány vzorky na první testování metody. Radiokarbonová data, až o 200 let starší než původně očekávaná, byla šokem pro všechny zúčastněné – fyziky, chemiky i archeology. Okamžitě bylo zahájeno intenzivní vzorkování kontextů jak na samotném Santorini, tak v okolních regionech jako je Kréta, egejské ostrovy, Kypr či Přední východ. Dnes máme k dispozici na desítky tisíc dat z chronologicky analogických souvrství východního Středomoří a jedná se o nejintenzivněji datovaný problém egejské prehistorie. Všechna data získaná radiokarbonovou metodou se původně shluchovala v druhé polovině 17. století před n. l. S touto datací však nesouhlasili egyptologové. Ti se v této době (pozdní doba bronzová) již pohybují v historických datovacích škálách postavených na písemných pramenech a astronomických pozorováních starých Egypťanů. Naprosto tak vylučovali možnost takového datování a navrhovali (a stále navrhuji) datování do doby vlády faraona Ahmose I. tedy kolem roku 1500 před n. l. I oni postupně zpřesňovali svoje datovací škály a mírně se posunuli hlouběji v čas. Vystala otázka, čím je tento významný rozpor způsoben a případně, které datum je správné: egyptské historické, nebo radiokarbonové? Paradoxní je, že radiokarbonová a historická data přibližně od roku 1450 před n. l. jsou v naprosté shodě. Po naprosto bezvýhodné situaci, kdy se opakoval stále stejný vzorec rozporu mezi radiokarbonovým a historickým datem, převládla teorie, že data pocházející ze Santorini jsou ovlivněna tzv. fosilním CO_2 . Vliv fosilního CO_2 na obsah jednotlivých izotopů uhlíku byl experimentálně měřen například v Německu. Zde byly analyzovány rostliny vyskytující se v bažinách produkujících CO_2 a v jejich těsném okolí. V těchto rostlinách byl zjištěn rozdíl mezi počty částic ^{12}C a ^{14}C odpovídající stáří mnoha staletí. Stejný jev se v různých míře uplatňuje i pro fosilní CO_2 ve světovém oceánu a označuje se jako „marine reservoir effect“. Právě tento jev je jedním z důvodů, proč radiokarbonová data na jižní poloce, „vypadají starší“ a používají se tam specifické kalibrační křivky. Stejně tak jedinci, jejichž jídelníček tvoří z velké části ryby, mohou být takto ovlivněni a následné datování jejich pozůstatků může opět vykazovat nižší hodnoty (časově méně). Proto doporučujeme v případě datování lidských kostí doplnit radiokarbonové datování izotopickou analýzou dusíku a uhlíku. Diference počtu atomů nuklidů N a C ($\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{13}\text{C}$) dovolují rekonstruovat hlavní zdroj bílkovin v organismu (například právě ryb, Obr. 5). Každý typ organismu má ve svém těle jistý poměr počtů atomů nuklidů $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ a $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$. Ty se liší podle toho, čím se živí konkrétní organismus. $\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{13}\text{C}$ jsou pak difference těchto poměrů vztahované ke konvenční nule stanovené na základě geologie (pro C) a atmosférického normálu (pro N). Jednotkou je promile (‰). Pokud tedy porovnáme obsah uvedených nuklidů a jejich poměr u různých typů organismů, pak z grafu na Obr. 5 můžeme odečíst, jaký zdroj bílkovin převládá ve výživě zkoumaného jedince. Jinými slovy, kde se zkoumaný jedinec nachází v potravní pyramidě [DeNiro – Epstein, 1978].

Reservoir effect na Santorini byl vyvrácen prostřednictvím velmi prosté úvahy: podrobení analýze současných rostlin. V roce 2016 proběhlo na Santorini intenzivní vzorkování, jehož cílem bylo získat sezónní rostliny. Referenční vzorky byly nasbírány na Krétě a v Německu. Konkrétně na Santorini byl vytvořen systém vzorkování, který kombinoval různá geologická prostředí a vzdálenost od kráteru vulkánu. Všechny vzorky byly podrobeny měření, aby mohlo být stanoveno poměrné zastoupení všech izotopů uhlíku ($^{12}\text{C}/^{13}\text{C}/^{14}\text{C}$). Pouze vzorek pocházející ze samotného kráteru vykazoval množství a poměr izotopů odpovídající polovině 17. století před n. l. Vzorky nasbírané na úpatí kráteru pár metrů od jícnu (Obr. 6) již vykazovaly hodnoty



Obr. 5 Závislost difference obsahu $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ ($\delta^{15}\text{N}$) na diferenci obsahu $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ($\delta^{13}\text{C}$) pro některé živočišné druhy. Jednotkou na obou osách je ‰. [Kanzenberg, 2011] / Dependence of the $^{15}\text{N}:^{14}\text{N}$ content ratio ($\delta^{15}\text{N}$) on the same parameter regarding $^{13}\text{C}:^{12}\text{C}$ ($\delta^{13}\text{C}$) for some animal species. The unit on both axes is ‰. [Kanzenberg, 2011]



Obr. 6 Kráter vulkánu na ostrůvku Nea Kameni, Santorini. Foto: V. Klontza-Jaklová / Crater of Santorini volcano on the islet of Nea Kameni, Santorini. Photo: V. Klontza-Jaklová

odpovídající současnému stavu. Výsledky byly srovnatelné s hodnotami referenčních vzorků z Kréty a Německa. Bylo tak vyvráceno, že by vzorky z archeologických kontextů mohly být ovlivněny tzv. „starým“ (fosilním) CO_2 , jak navrhovali někteří v souvislosti s příliš hlubokými radiokarbonovými daty, vzdalujícími se od historického předpokladu [Klontza-Jaklová, 2016].

Dnes se ukazuje jako nejpravděpodobnější, že problém datování této geologické události, která byla patrně největší za posledních 10 000 let, je právě v kalibrační křivce. Napovídá tomu nová křivka IntCal20 (Obr. 4), do níž byly zabudovány i nejnovější dendrochronologické škály z Balkánu. Také do ní byly zahrnuty nové statistické modely, které datum výbuchu posouvají do druhé poloviny 16. století, tedy vlády faraona Ahmose I. [Manning, 2020].

Sice by mohlo připadat jako malicherné dohadovat se o 150 let v době nám tak vzdálené, ale je třeba si uvědomit, že bez pevného časoprostorového rámce není možné řešit žádné kauzální problémy historické ani environmentální. Na datování egejské doby bronzové stojí celý datovací a interpretační systém severnějších oblastí včetně našich území.

Využití izotopového datování výzkumů Ústavu archeologie a muzeologie FF MU

Aplikace radiokarbonové metody na chronologické i kontextuální otázky archeologického charakteru je na Ústavu archeologie a muzeologie FF MU běžným postupem. Principy metody, její využití v archeologii i pokročilé modelování dat je součástí již bakalářského kurzu oborů archeologie a klasická archeologie. Pro účely této studie byly vybrány příklady, kdy si výzkumníci nekladli pouze chronologickou otázku, ale sledovali historické prostředí zkoumaného problému.



Obr. 7 Drnholec, hrob bojovníka (H 803). Foto: F. Trampota / Drnholec, warrior grave (H 803). Photo: F. Trampota

Takovým příkladem využití datování radiokarbonovou metodou je například pohřebiště v Drnholci (okr. Břeclav), kde bylo nalezeno 7 kostrových hrobů (Obr. 7). Bohužel pouze dva z nich obsahovaly artefakty kulturně zařaditelné do období stěhování národů, a to do jeho mladší fáze, cca druhé poloviny 5. – počátku 6. století n. l., kdy na základě tradičního bádání sídlil na našem území kmen tzv. Langobardů. Proto byl z každého hrobu (tedy každého pohřbeného jedince) odebrán vzorek.⁷ Získaná data se na kalibrační křivce právě „strefila“ do tzv. plateau, kdy naměřené hodnotě odpovídá poměrně dlouhé kalendářní rozpětí. Datum bylo domodelováno na základě historických údajů (například odchod Langobardů do Panonie v r. 540) a dalších archeologických dat z okolních regionů. Celá skupina byla datována jako pohřbená přibližně současně okolo roku 510. Bez radiokarbonové metody bychom museli toto pohřebiště zařadit mezi nedatovatelné nálezy celky proto, že některé hroby neobsahovaly žádný materiál datovatelný stylisticky a typologicky.

V souvislosti s pohřebištěm v Drnholci bychom chtěli doplnit, že moderní archeologie nepracuje pouze s izotopy uhlíku, ale i s izotopy dusíku a kyslíku. Vzájemné poměry mezi obsahy výše uvedených nuklidů mohou vypovídat o stravovacích návycích. Metoda je založena na analýze izotopového složení kostního kolagenu, které je dáno tím, jaký zdroj bílkovin převládá v našem jídelníčku. Tedy doslova jsme to, co jíme.

V souvislosti s radiokarbonovým datováním bylo u jedinců pohřbených na katastru Drnholce přeměřeno i zastoupení počtu atomu nuklidů dusíku ¹⁵N a kyslíku ¹⁸O, které ukázalo zásadní fakta. Určením vzájemného poměru obsahu nuklidů dusíku, uhlíku a kyslíku bylo zjištěno, že pohřbení jedinci se živili hlavně prosem, plodinou, která se k nám šířila právě během 5. století, a to z jihovýchodní Evropy. Hodnoty obsahu – zastoupení nuklidu ¹⁸O v různých částech těl 7 daných jedinců potvrdily, že tito jedinci vyrostli v regionech opět jihovýchodně od nás, například u Černého moře. Podle písemných pramenů⁸ měli však Langobardé přijít ze severního Německa a postupovat dál po Labi do České kotliny a následně na jižní Moravu. Zjištění původu zkoumané skupiny z jihovýchodní Evropy otevřelo cestu řadě dalších projektů a aktualizovalo debatu o původu osídlení našich zemí v polovině prvního tisíciletí n. l., ale také zásadní problém věrohodnosti písemných pramenů, definice langobardské identity z historického, archeologického nebo tehdejšího úhlu pohledu [Trampota et al., 2021; Melicherová, 2019].

V poslední době vzbudil mediální pozornost nález, který prakticky náhodně učinil tým Ústavu archeologie a muzeologie FF MU, vedený prof. Macháčkem, zkoumající dlouhodobě lokalitu Pohansko. Při standardním mytí zvířecích kostí byl pozornou laborantkou nalezen zlomek s ryhami, které se jí jeví jako záměrně vytvořené. Po dokonalejším vyčištění se ukázalo, že se ryhy podobají raným germánským runám (Obr. 8).



Obr. 8 Pohansko: zlomek kosti s runovým nápisem. Foto: J. Macháček
Pohansko: bone fragment with runic inscription
(Photo: J. Macháček)

Epigrafické a trasologické analýzy prokázaly, že se skutečně jedná o germánské runy, konkrétně o začátek germánské abecedy. Není to tedy nějaké náhodné čmárání, jak by mohl laik namítnout. Tento artefakt byl nalezen v kontextu raného slovanského sídliště. Kost byla okamžitě zaslána k radiokarbonovému datování. Mohlo se totiž jednat o intruzi staršího artefaktu do slovanského objektu. Pomocí radiokarbonového datování bylo určeno stáří artefaktu kolem roku 600 n. l. (konkrétně: kalibrované datum 604–646 n. l., pravděpodobnost 68,2 %, modelované datum 578–614 n. l.). Ani v tomto případě nešlo pouze o otázku pouhého stáří artefaktu. V souvislosti s datováním i slovanským (z archeologického úhlu pohledu) kontextem se otevřela otázka kontaktů, jejich intenzity a forem mezi germánským a slovanským obyvatelstvem [Macháček, 2021].

Posledním citovaným příkladem je užití radiokarbonové metody pro zjišťování časové posloupnosti jednotlivých prehistorických sídelních entit označovaných jako tzv. archeologické kultury. Tradiční archeologie obvykle chápe osídlení na nějakém území jako lineární proces, který je možné si zjednodušeně představit jako odchod jedné kulturní skupiny a příchod druhé. Počítá s minimálními překryvy. Podle toho, jak se mění hmotná kultura, tedy vzhled používaných artefaktů, tak se mění i tzv. kulturní příslušnost osídlení dané oblasti. Radikální změna ve stylu (například keramických nádob) pro archeology automaticky znamenala výměnu obyvatel. Proto některé kultury například 5. tisíciletí před n. l., konkrétně kultura s vypíchanou keramikou a kultura s moravskou malovanou keramikou, se jeví jako po sobě jdoucí, tedy jako sekvence jednotlivých kultur.⁹ Radiokarbonovou metodou bylo datováno přes 400 vzorků obou kultur z oblasti Severní poloviny Čech, Moravy a Dolního Rakouska severně od Dunaje. Vzájemným porovnáním získaných dat a jejich detailní modelací bylo prokázáno, že po poměrně dlouhou dobu žili lidé mající různý projev v hmotné a archeologické kultuře současně. Obě kultury tedy po dlouhou dobu své existence existovaly paralelně a časově se překrývaly. Tento významný objev opět znamená nutnost revidovat archeologické a historické interpretace daného období, tedy historicko-interpretací závěr, který vyplynul z aplikace radiokarbonové metody [Trampota – Květina, 2020].

ZÁVĚR

Cílem tohoto příspěvku bylo seznámení s principem radiokarbonového datování a využití izotopových analýz především pro datování archeologických nálezů. Pro účely datování mineralogických a geologických vzorků byla zmíněna metodika geochronologie. Silné i slabé stránky radiokarbonové metody byly demonstrovány na vybraných příkladech projektů Ústavu archeologie a muzeologie FF MU. Na příkladech bylo ukázáno, že radiokarbonová metoda v kombinaci s izotopovou analýzou uhlíku, dusíku, příp. kyslíku, se dnes nevyužívá pouze k datování, ale má mnohem širší využití a následně i dopad na revizi dosavadních znalostí naší minulosti.

Pomocí těchto metod byly zjištěny nové informace, které do značné míry přepisují naši historii. Například dosud běžně přijímaná skutečnost, že v době stěhování národů bylo naše území osídlováno od severu Langobardy, doznalo značné trhliny. Z výsledků výzkumů v Drnholci totiž bylo zjištěno, že tato oblast byla osídlena obyvateli přicházejícími z jihovýchodní Evropy. Zcela průlomové je vyvrácení teorie o lineárním osídlování, kdy jedna kultura následovala druhou. Z nejnovějších výsledků radiokarbonového datování je jisté, že různé kultury existovaly na našem území současně. Nejaktuálnější je nález kosti s runovým nápisem. Tento artefakt byl datován do 6. století, a jedná se tak o nejstarší doklad písma nalezený u Slovanů. Také byl prezentován příklad datování vulkanické exploze sopky Santorini/Théra v době bronzové, na jejímž příkladu bylo demonstrováno, jak zásadní je kalibrační křivka pro přesné stanovení kalendářního data. Bylo by možné uvést nespočet dalších příkladů, ale z již předložených je zřejmé, že využití izotopových analýz je velmi přínosné v procesu poznání naší minulosti.

POZNÁMKY

- 1 ATOMINFO.CZ, Radiouhlíkové datování: jak funguje nejrozšířenější datovací metoda, 2012, <https://atominfo.cz/2012/11/radiouhlikove-datovani-jak-funguje-nejrozsirenejsi-datovaci-metoda/crl.odz.ujf.cas.cz/home/>.
- 2 CRL – Radiouhlíková laboratoř společně provozovaná ÚJF AV ČR v.v.i. a ARÚ AV ČR, Radiouhlíkové datování a sledování ¹⁴C v životním prostředí, dostupné z: Více k metodě: <https://crl.odz.ujf.cas.cz/home/o-nas>
- 3 <https://www.radiocarbon.com/accelerator-mass-spectrometry.htm>
- 4 Více k metodě: <http://dendrochronologie.cz/en/main-page/> [18. 3. 2021]
- 5 Aktuální informace na: <https://c14.arch.ox.ac.uk/oxcal.html> [18. 3. 2021]
- 6 Například v datovaném objektu se najde mince, která představuje terminus *post quem* pro daný kontext, tedy nejstarší možné datum hrobu, naopak nejmladší předmět v hrobu zase terminus *ante quem*, tedy nejzazší možné datování.
- 7 Obvykle se odebírá žebro, protože je to naposledy osifikovaná kost v lidském těle a je tedy nejbližší momentu úmrtí.
- 8 Hlavním pramenem pro historii Langobardů je Historia Langobardorum, lombardského mnicha Paula Deacona (ca 720–799).
- 9 Takovou informaci najdete v klasických učebnicích o Moravském pravěku, například Podborský 1993.

LITERATURA

- ALLÈGRE, C. *Isotope geology*. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. ISBN 978-0-521-86228-8.
- L'ANNUNZIATA, M. F. *Radioactivity: introduction and history*. Amsterdam: Elsevier, 2007. ISBN 978-0-444-52715-8.
- ANDERSON, E. C.; LIBBY, W. F.; WEINHOUSE, S.; REID, A. F.; KIRSHENBAUM, A. D.; GROSSE, A. V. (May 30, 1947). „Radiocarbon From Cosmic radiation“. *Science*. 105 (2735): 576–577. doi:10.1126/science.105.2735.576. PMID 17746224.
- DENIRO, M. J. EPSTEIN, S. Influence of diet on the distribution of carbon isotopes in animals, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Volume 42, Issue 5, 1978, 495–506. ISSN 0016-7037, [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(78\)90199-0](https://doi.org/10.1016/0016-7037(78)90199-0).
- GRAY, J., THOMPSON, P. Climatic information from ¹⁸O/¹⁶O analysis of cellulose, lignin and whole wood from tree rings. *Nature* 270, 708–709 (1977). <https://doi.org/10.1038/270708a0>

- HÁLA, J. *Radioaktivita, ionizující záření, jaderná energie*. Brno, Konvoj, 1998. ISBN 80-85615-56-8.
- HUNT, A. M. W., ed. *The Oxford handbook of archaeological ceramic analysis*. Oxford: Oxford University Press, 2017. Oxford handbooks. ISBN 978-0-19-968153-2.
- KATZENBERG, M. Stable isotope analysis: a tool for studying past diet, demography, and life history, Chapter 13. In: *Biological Anthropology of the Human Skeleton*, John Wiley & Sons, 2011, ISBN 9780470245842
- KLONTZA-JAKLOVÁ, V. What's wrong?: hard science and humanities – tackling the question of the absolute chronology of the Santorini eruption. *Opera Facultatis Philosophicae Universitatis Masarykianae* 459, 2016, DOI: 10.5817/CZ.MUNI.M210-8472-2016
- Kolektiv autorů: *Jaderně-chemické tabulky*, SNTL, Praha, 1964
- KYNCL, J. *Letokruhy jako kalendář i záznamník: zajímavosti z dendrochronologie*. Praha: Grada Publishing, 2017. ISBN 978-80-271-0198-6.
- LIBBY, W. F. Atmospheric Helium Three and Radiocarbon from Cosmic Radiation. *Physical Review*. 69 (11–12), 1946, 671–672. doi:10.1103/PhysRev.69.671.2.
- LIBBY, W. F., *Radiocarbon dating*, 2nd ed., University of Chicago Press, 1955.
- MACHÁČEK, J. et al. Runes from Lány (Czech Republic) – The oldest inscription among Slavs. A new standard for multidisciplinary analysis of runic bones, *Journal of Archaeological Science*, 2021, vol. 127, <https://doi.org/10.1016/j.jas.2021.105333>.
- MANNING, S.W. et al. Radiocarbon offsets and Old world chronology as relevant to Mesopotamia, Egypt, Anatolia and Thera (Santorini). *Sci Rep*, 2020 vol. 10, <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69287-2>
- MELICHEROVÁ, L. 2019: *Langobardské pohřebiště z perspektivy přírodních věd. Případová štúdia: Pohřebisko v Drnholci (okr. Břeclav)*. Lombards' burials from the perspective of natural sciences. Case study: Drnholec (dis. Břeclav) cemetery. Master thesis FF MU Brno: <https://is.muni.cz/auth/th/gttjk/>
- PELLEGRINI, M., POUNCETT, J., JAY, M., PEARSON, M. P., RICHARDS, M.P. Tooth enamel oxygen „isoscapes“ show a high degree of human mobility in prehistoric Britain. *Sci Rep*. 2016 Oct 7;6:34986. doi: 10.1038/srep34986. PMID: 27713538; PMCID: PMC5054518.
- PODBORSKÝ, V. *Pravěké dějiny Moravy. Vlastivěda moravská 3*. Muzejní vlastivědná společnost, Brno. 1993
- REIMER, P., et al. The IntCal20 Northern Hemisphere Radiocarbon Age Calibration Curve (0–55 cal kBP). *Radiocarbon*, 2020, vol. 62, no. 4, s. 725–757. doi:10.1017/RDC.2020.41
- RINK, W. J., ed. *Encyclopedia of scientific dating methods*. Dordrecht: Springer, [2015]. Encyclopedia of earth sciences series. ISBN 978-94-007-6303-6.
- SUESS, H. E. Bristlecone-pine calibration of the radiocarbon time-scale 5200 B.C. to the present. In: Olsson, Ingrid U. (ed.) *Radiocarbon Variations and Absolute Chronology*. New York: John Wiley & Sons. 1970, s. 303–311.
- SVĚTLÍK, I., DRESLEROVÁ, D., LIMBURSKÝ, P., TOMÁŠKOVÁ, L. Radiouhlík v přírodě a jeho využití pro datovací účely, *Archeologické rozhledy* LIX, 2007, s. 80–94.
- TRAMPOTA, F., KVĚTINA, P. How do they fit together? A case study of Neolithic pottery typology and radiocarbon chronology. *Archeologické rozhledy* LXXII, 2020, s. 163–193.
- TRAMPOTA, F., et al. 2021 The Late Migration Period Cemetery at Drnholec (Břeclav district, Czech Republic), *Památky Archeologické*.
- WAGNER, V. *Jaderná fyzika a kulturní dědictví*, Objective Source E-learning OSEL, 2008, <https://www.osel.cz/3406-jaderna-fyzika-a-kulturni-dedictvi.html>