

TOPICAL REVIEW – TEMATICKÁ SYNTÉZA

**Možnosti a limity radiouhlíkového datování
se zaměřením na netypické archeologické vzorky****Capabilities and limits of radiocarbon dating with a focus
on untypical archaeological samples**

Jarmila Bíšková – Veronika Brychová – Peter Demján –
Dagmar Dreslerová – Alžběta Frank Danielisová – Kristýna Hošková –
David John – Nikola Košťová – Petr Limburský – Mihály Molnár –
Alice Moravcová – Kateřina Pachnerová Brabcová – Markéta Petrová –
Ivo Světlík – Jiří Šneberger – Josef Tecl – Vojtěch Valášek

Radiocarbon dating is an established method that helps to determine the absolute age of archaeological finds. This topical review presents the basic principles of the radiocarbon method, conventions for selecting samples from archaeological contexts, how to handle samples before sending them to the radiocarbon laboratory, laboratory methods for sample preparation, the AMS measurement procedure, and the calibration of results. Factors that limit the results of radiocarbon dating, particularly radiocarbon plateaux and the reservoir effect, are explained along with the ways how to recognise and eliminate their influence. The main aim of the paper is to critically evaluate the application of radiocarbon dating to less common archaeological samples (lipids preserved in the pores of pottery, charred bone, dental calculus, iron objects and iron slags, mortar, pollen and phytolith concentrates extracted from sediments or soils). Their dating opens new possibilities for the chronological determination of past natural and cultural processes or events.

radiocarbon dating – lipids – charred bones – dental calculus – iron – mortar – pollen and phytolith concentrates

Radiouhlíkové datování je etablovanou metodou, která pomáhá určit absolutní stáří archeologických nálezů. Tento tematický přehled prezentuje základní principy radiouhlíkové metody, předpoklady pro výběr vzorků z archeologických situací, způsob zacházení se vzorky před zasláním do radiouhlíkové laboratoře, laboratorní postupy úpravy vzorků, průběh AMS měření a kalibraci výsledků. Dále jsou vysvětleny faktory, které omezují výsledky radiouhlíkového datování, zejména radiouhlíková plata a rezervoárový efekt, a jak lze jejich vliv rozpoznat a případně eliminovat. Hlavním cílem článku je kriticky zhodnotit aplikaci radiouhlíkové metody na méně obvyklé archeologické vzorky (lipidy uchované v pórech keramiky, spálené kosti, zubní kámen, železné předměty a železné strusky, malta, pylové a fytolitové koncentráty vyextrahované ze sedimentů či půd), jejichž datace otevírá nové možnosti pro chronologické ukotvení přírodních i kulturních procesů a událostí v minulosti.

radiouhlíkové datování – lipidy – spálené kosti – zubní kámen – železo – malta – pylové a fytolitové koncentráty

Úvod

Radiouhlíkové datování je základní metodou, která pomáhá určit absolutní stáří archeologických nálezů, a to až 55 tisíc let starých. S její pomocí lze analyzovat kterýkoliv organický i anorganický materiál obsahující uhlík. Metoda se řadí mezi destruktivní, jelikož část vzorku, ze které je izolována datovatelná chemická forma uhlíku, je zničena.

Měření aktivity radiouhlíku je dnes realizováno prakticky výhradně pomocí AMS (*accelerator mass spectrometry*). Proti dříve používaným radiometrickým metodám jsou AMS systémy rychlejší, s mnohem nižšími nároky na hmotnost vzorku. Radiouhlíkové datování se tak stává stále běžnější součástí archeologického výzkumu a úměrně s tím roste také celkový počet změřených dat (Tkáč – Kolář 2021; Vondrovský et al. 2023). V archeologické komunitě prozatím nedošlo k plošnému osvojení všech principů, které vedou ke zhodnocení potenciálu radiouhlíkového datování, vyplývají z jeho aktuálních možností a zároveň respektují jeho omezení. To často vede k podceňování nebo naopak přeceňování této metody.

Předkládaný přehled navazuje na dříve publikovaný článek (Světlík et al. 2007) a má sloužit archeologům k orientaci v poměrně rychle se rozvíjející problematice a zlepšit jejich práci při aplikaci radiouhlíkového datování. Stěžejní částí článku je kritické zhodnocení netypických archeologických vzorků, které lze při použití moderních AMS systémů analyzovat. Jedná se o lipidy, zubní kámen, železné předměty a strusky, spálené kosti a koncentráty pylů či fytoolitů.

Základní principy

Uhlík 14 (^{14}C , radiouhlík) je globálně se vyskytujícím radionuklidem částečně přirozeného původu s poločasem přeměny 5730 let. Radiouhlíkové datování vychází z předpokladu známé výchozí aktivity (koncentrace) ^{14}C ve složkách životního prostředí. V průběhu formování vzorku, konkrétně během růstu organismů, ukládání sedimentu, srážení uhlíčitanů nebo například rozpouštění oxidu uhličitého ve vodě, dochází k příjmu uhlíku (a tím i ^{14}C) z okolního prostředí. Od okamžiku přerušení příjmu z okolí (např. smrt organismu) klesá aktivita ^{14}C ve vzorku pouze vlivem radioaktivní přeměny, a proto stanovená zbytková aktivita ^{14}C ve vzorku odpovídá době, která od tohoto okamžiku uplynula (Libby et al. 1949; Stuiver – Polach 1977). Pro úspěšné datování je nutné splnit podmínku uzavřenosti datovatelné chemické formy uhlíku ve vzorku vůči přirozenému uhlíkovému koloběhu. Nesmí tedy docházet k dodatečně výměně dané chemické formy uhlíku s okolním prostředím. Výsledkem analýzy je tzv. konvenční radiouhlíkové stáří (*conventional radiocarbon age*) udávané v letech BP (*before present*) spolu s nejistotou měření (\pm), vztažené k referenčnímu roku 1950. Vzhledem k tomu, že aktivita radiouhlíku v prostředí není konstantní, musí být konvenční radiouhlíkové stáří převedeno na kalibrované (kalendářní, reálné) stáří pomocí kalibrační křivky.

Ve srovnání s jinými datovacími metodami v archeologii představuje aktivita ^{14}C specifický typ chronologické informace, což je dáno jejím vyjádřením ve formě distribuce pravděpodobnosti a ve vlastním nosiči informace o stáří – předmětu, který ji zprostředkovává. Přímé ztotožnění předmětů s nálezovým kontextem nemusí být vždy správný počáteční předpoklad, jak ukazují provedené analýzy velkých souborů ^{14}C dat. Při porovnání výsledků z archeologicky identického kontextu lze v některých případech sledovat rozptyl výsledných hodnot vysoce převyšující nepřesnosti vlastního stanovení ^{14}C stáří. Tato skutečnost byla prokázána například při datování výplní zahloubených kruhových objektů z neolitu na Britských ostrovech (Bayliss et al. 2011; Obr. 1), v Čechách při analýze výplní rondelů z období kultury s vypíchanou keramikou (Limburský et al. 2018) nebo uhlíků ze středověké hradní malty (Pachnerová Brabcová et al. 2022a; 2022b). Snížit

riziko chyby při ztotožnění výsledků datování s nálezovým kontextem může některý z těchto tří postupů:

1) *Radiouhlíkové datování ve stratigrafii* představuje jednu z efektivních metod, jak ověřit správnost předpokladaných chronologických vztahů. Ve spojení s bayesovskými postupy tvorby chronologických modelů navíc může chronologii nálezové situace upřesnit. Podstatou této metody je odběr vzorků, u kterých lze na základě stratigrafie či v terénu identifikované následnosti vzniku archeologických situací vyjádřit očekávanou chronologickou posloupnost a tu následně promítnout do modelu. Lze tak diskutovat jednoduché vztahy, ale i složité posloupnosti chronologických sekvencí. Předpokladem použití tohoto postupu je přesné rozpoznání těchto stratigrafických vztahů v terénu, jejich neporušenost a přizpůsobení odběru vzorků.

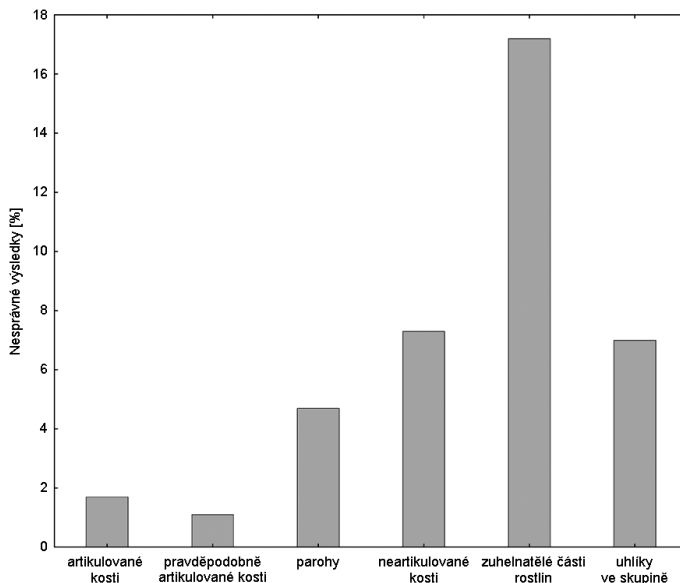
2) *Opakované měření shodného kontextu*, které však lze úspěšně použít jen na archeologické situace, jejichž doba vzniku, resp. doba do ukončení jejich tvorby, je srovnatelná s přesností radiouhlíkového datování s ohledem na celkové stáří datovaných situací. Při splnění tohoto předpokladu by stáří vzorků určené radiouhlíkovým datováním mělo vykazovat srovnatelné hodnoty. S rostoucím počtem vzorků roste důvěryhodnost propojení ^{14}C datování s archeologickým kontextem. Požadavkem na výběr nálezů pro datování je, aby tyto nálezy byly na sobě způsobem vzniku nezávislé (např. kosti prokazatelně ze dvou různých jedinců, kombinace datovaných vzorků odlišných materiálů). Při aktuálně dosahované nejistotě měření, která se pro období zemědělského pravěku obvykle pohybuje okolo 20 konvenčních let (1σ), není rozpětí intervalu přípustného trvání ^{14}C data po kalibraci obvykle menší než 90 let. Tento postup je tak použitelný pro analýzu většiny pravěkých archeologických objektů, u kterých se obvykle předpokládá kratší doba zániku. Individuální posouzení vyžadují specifické situace či rozměrnější objekty (např. příkopy, hliníky), u kterých nelze vyloučit i dlouhodobou tvorbu výplní (cf. *Bell et al. 1996; Řídký et al. 2018, 100–101*).

3) *Klasifikovat věrohodnost přenosu ^{14}C stáří na nálezový kontext*, kdy je daná nálezová situace ohodnocena s cílem minimalizovat z hlediska chronologie nesprávné spojení datovaného předmětu a kontextu. Vlastní klasifikace vychází z terénních pozorování a zohledňuje velikost datovaných předmětů, jejich možnou pohyblivost v archeologických vrstvách či pravděpodobnost kontaminací a porušení situací. Toto hodnocení provedli *Bayliss et al. (2011)* při datování výplní příkopů a následně bylo rozšířeno o další nálezové situace, se kterými se lze v průběhu archeologického výzkumu a odběru vzorků pro ^{14}C datování setkat. Jednotlivé kontexty, resp. způsob uložení předmětů v nich, byly seřazeny od pro ^{14}C datování nejdůvěryhodnějších až po nejméně důvěryhodné (*Tab. 1*). Radiouhlíkové datování stanoví stáří nezávisle na původu, kvalitě a typu dodaného vzorku. Proto musíme věnovat značné úsilí výběru těchto vzorků a vždy zvážit vztah mezi vzorkem a událostí, kterou chceme datovat.

Zásady vyzvednutí a uložení vzorku

Po vyzvednutí z půdy či sedimentu je třeba vzorek nechat vyschnout nebo jej zmrazit tak, aby se zamezilo kontaminaci. Teplota sušení vzorku by neměla přesahovat 40 °C. Vzorky by před sušením měly být pokládány na podložku z hliníkové nebo plastové fólie, nesmí přijít do kontaktu s papírovými ubrusky či novinami. Zbytky celulózových vláken na uhlících a dalších typech vzorků především rostlinného původu totiž představují riziko kon-

Obr. 1. Podíl radiouhlíkových měření z neolitických ohrazení (n=816) a různých typů materiálů, které jsou na základě archeologických informací o kontextu považována za nepřesná (upraveno podle Bayliss et al. 2011, Fig. 2.32).



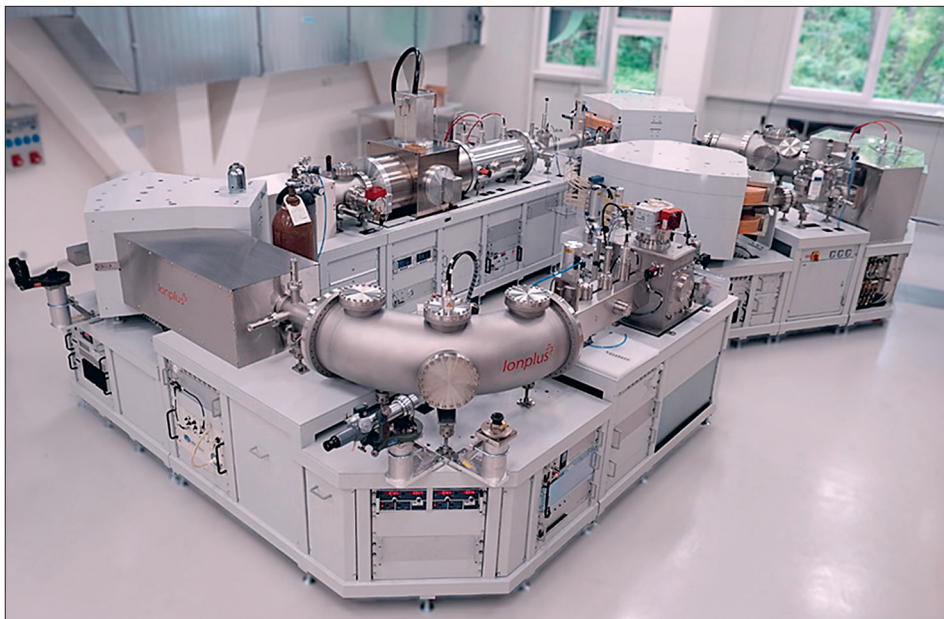
taminace. Ačkoliv se laboratoře snaží z povrchu vzorků odstraňovat cizorodé materiály, nebyl dosud nalezen postup, který by zajistil úplné odstranění vláken papíroviny z povrchu vzorků. Z tohoto důvodu se vzorky pro radiouhlíkové datování neskladují v papírových sáčcích a do sáčku se vzorkem se nevkládají papírové cedulky. Pro skladování většiny typů vzorků jsou vyhovující plastové sáčky se zipem. Zejména malé a křehké vzorky by měly být skladovány v pevných plastových tubách. Vzorky keramiky pro datování lipidů musí být ukládány po vysušení do alobalu chráněného dalším sáčkem.

Při použití konzervačních činidel může docházet ke kontaminaci datovatelné chemické formy cizorodým uhlíkem, který je stejné chemické formy, ale pochází z jiné doby. Aby bylo dosaženo spolehlivého datování, musí být v procesu předúpravy odstraněny všechny potenciálně rušivé chemické formy uhlíku. Zvláštní opatrnost je na místě v případech vzorků ošetřených konzervačními nebo impregnačními činidly. Jedná se o nálezy lepené, ošetřené šelakem, akrylátovými polymery jako Paraloid B-67 a B-72, vinylacetátové polymery (Brock et al. 2018; Bruhn et al. 2001; Yuan et al. 2007) nebo klihem, který způsobuje nejzávažnější ovlivnění, protože obsahuje stejné bílkoviny jako datovatelný kolagen izolovaný ze vzorků kostí, rohoviny, parohů a kůže. Některé vzorky mohou být konzervovány nepolárnými organickými látkami, jako jsou tuky, vosky a pryskyřice. Ty lze ze vzorků odstraňovat pomocí organických rozpouštědel v Soxhletově extraktoru (Gupta – Polach 1985; Folch et al. 1957; Jim et al. 2004). Pro datování by tedy měly být upřednostňovány kosti s co nejmenší mírou degradace, bez popisků, laku nebo zbytků lipidů.

V některých případech však není ani standardně využívané loužení dostatečným nástrojem pro odstranění kontaminantů. Zejména to platí pro výrazněji degradované a staré kosti, ve kterých již došlo k pevnému navázání huminových kyselin z půdy na kolagen. Z toho důvodu stále více laboratoří zpracovává želatinizovaný kolagen pomocí ultrafiltrace, při níž dochází k izolaci bílkovin s hmotností nad přibližně 30 kDa. Předpokládá se přitom, že se huminové kyseliny vážou ochotněji na více degradované kratší řetězce bílkovin

Popis nálezové situace	Pořadí
Kosti jsou uloženy v anatomickém sledu s navazujícím kloubním spojením či kloubní spojení je lehce posunuto. Lze se domnívat, že kosti byly pohřbeny současně jako část jedince. Artikulace kostí byla pozorována přímo v terénu.	1
U skupiny kostí bylo zjištěno, že jsou součástí jednoho jedince, až při anatomickém/osteologickém zpracování. Kosti představují část/části těla s vzájemně spolu souvisejícími a navazujícími kostmi. Lze předpokládat, že se jedná o kosti z jednoho jedince nebo částí jedince, které byly uloženy v jeden časový horizont, avšak jejich souvislost nebyla při prvotním výzkumu rozpoznána.	2
Jednotlivé kosti, které nesou zjevnou významovou souvislost s očekávaným funkčním určením daného kontextu (např. jednotlivé lidské kosti na dně hrobu uložené v místě, které by odpovídalo anatomii předpokládaného uložení pohřbu).	3
Jednotlivé kosti, které mají předpokládanou významovou souvislost s očekávaným funkčním určením daného kontextu (např. kosti potravinových milodarů v hrobě atp.).	4
Součásti kostěných nástrojů, které nesou zjevnou souvislost s úmyslným budováním především zahloubených objektů a jako ztrátový nebo část poškozeného předmětu se nacházejí v daném objektu (např. zlomený hrot parohového kopáče ve dnu příkopu, zvířecí kosti využitě jako lopatky se stopami po použití atp.).	5
Zuhelnatělé či jinak zachované části krátce žijících rostlin, u kterých lze předpokládat dochování v neporušeném kontextu, který vznikl bez přispění činnosti člověka a který nebyl lidskou činností ani pozorovanými změnami podmínek vzniku podstatně ovlivněn (např. vrstvy v rašeliništi, povodňové vrstvy při vyloučení redepozice atp.).	6
Krátce žijící části dřevin dochované uložení v anaerobním prostředí nebo ve vodě (např. listy a koncové části větví listnatých keřů a stromů uložené v objektech pod úrovní spodní vody, studnách či obsažené v jílových vrstvách atp.). Předpokládá se, že v případě druhotného uložení či redepozice by díky změně okolního prostředí došlo k rychlému rozkladu a zkáze organického materiálu tlením atp.	7
Zuhelnatělé či spálené části krátce žijících rostlin, které se nacházejí v kontextech funkčně odpovídajících jejich interpretaci (např. zbytky zuhelnatělých plev přidávaných do keramiky jako ostřivo, zbytky většího množství semen v nádobě nebo zásobní jámě atp.).	8
Párové kosti či kosti, u kterých lze usuzovat na společný původ v jednom jedinci (např. dle robusticity, velikosti, podobných deformací), případně kosti, u kterých lze původ v jednom jedinci důvodně předpokládat.	9
Zuhelnatělé či jinak zachované části rostlin s krátkou dobou vzniku, které jsou s ohledem na svoji velikost fixovány v nálezovém kontextu se sníženým rizikem pohybu či pozdější intruzí (např. velká zuhelnatělá semena, skořápky atp. ve výplních, případně pylová zrna v uzavřených vrstvách atp.).	10
Skupina kostí, u kterých lze předpokládat uložení do kontextu v jeden okamžik (např. shluk žeber, kosti shodně rozlámané, vykazující podobnost v opálení atp.).	11
Pylová zrna ve výplních objektů případně jako součást korozních produktů kovových předmětů.	12
Zuhelnatělé zbytky krátkověkých rostlin, u kterých lze předpokládat společný původ ze společného uložení (např. primární odpad, sklad jednodruhového topiva).	13
Zuhelnatělé nebo spálené dřevo, které je součástí konstrukcí.	14
Dobře zachované jednotlivé zvířecí kosti, u kterých lze stanovit nějaký vztah k datovanému kontextu.	15
Zuhelnatělé či jinak zachované jednotlivé části rostlin, semena a různé drobné makrozbytky.	16
Schránky měkkýšů. Zuhelnatělé či spálené dřevo jako výsledek aktivit v daném kontextu – např. náhodně sebrané vícedruhové palivové dříví, zbytky ohnišť, hatě atp.	17

Tab. 1. Klasifikace věrohodnosti přenosu ^{14}C stáří na nálezový kontext. Seřazeno od nejdůvěryhodnějších až po nejméně důvěryhodné nálezové situace (upraveno podle *Bayliss et al. 2011*).



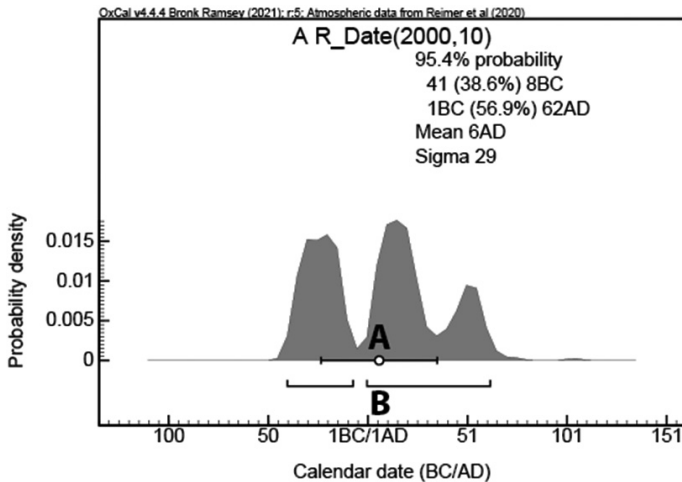
Obr. 2. AMS systém MILEA provozovaný Ústavem jaderné fyziky AV ČR, Archeologickým ústavem AV ČR a Fakultou jadernou a fyzikálně inženýrskou ČVUT v Praze (foto R. Garba).

(Bronk Ramsey et al. 2000; Piotrowska – Goslar 2002; Higham et al. 2006; Brock et al. 2007; Hajdas et al. 2009; Beaumont et al. 2010; Fülöp et al. 2013; Wood 2015). Nejúčinnější dnes známá metoda potlačení vlivu cizorodých forem uhlíku v kolagenu je založena na rozkladu kolagenu na jednotlivé aminokyseliny, ze kterých je k datování pomocí preparativní vysokoúčinné kapalinové chromatografie (HPLC, *high performance liquid chromatography*) izolován 4-hydroxyprolin (Stafford et al. 1991; van Klinken et al. 1994; Tripp et al. 2006; McCullagh et al. 2010; Marom et al. 2012; Devière et al. 2018; Hopkins et al. 2022), který je třetí nejzastoupenější aminokyselinou v kolagenu.¹ Oproti více zastoupeným aminokyselinám se 4-hydroxyprolin vyznačuje kratším retenčním časem a nižšími hodnotami pozadí při izolaci, což snižuje riziko zkesleného výsledku.

Měření a kalibrace aktivity radiouhlíku

Proti dřívějším radiometrickým metodám jsou dnes používané AMS systémy rychlejší a s mnohem nižšími nároky na hmotnost vzorku. Během 48 hodin lze změřit až desítky vzorků s hmotností menší než 1 mg. Kýženým výsledkem AMS měření uhlíkového vzorku jsou poměry izotopů $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ a $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$. Hodnoty $\delta^{13}\text{C}$ stanovené pomocí AMS jsou vhodné pouze pro korekce aktivity ^{14}C a v žádném případě je nelze použít například pro studium

¹ Pořizovací náklady vhodného přístroje jsou vysoké a v průběhu jednoho pracovního dne je možné zpracovat maximálně dva vzorky. Tímto přístrojem je zatím vybaveno pouze několik radiouhlíkových laboratoří např. radiouhlíková laboratoř v Oxfordu používá metodu HPLC pouze na vzorky kostí starší než 20 tisíc let.



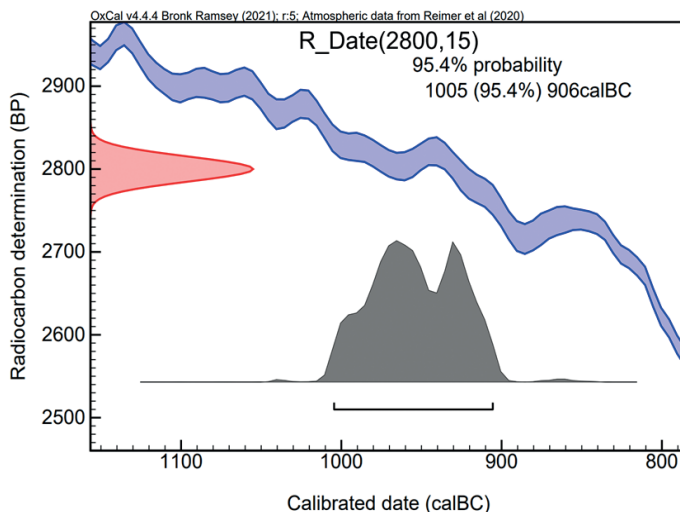
Obr. 3. Ukázka dvou možností, jak interpretovat distribuci kalibrovaného ^{14}C data. A) nesprávně: průměr a standardní odchylka; B) správně: 95% interval spolehlivosti.

stravy, jelikož jsou funkcí doby trvání AMS měření a vyznačují se velkými nejistotami. V ČR je dostupný pouze jediný systém pro AMS měření, a to typ MILEA (*Multi Isotope Low Energy AMS*; Obr. 2; Kučera et al. 2022).

Výsledek měření, tj. konvenční radiouhlíkové stáří, nepředstavuje kalendářní stáří vzorku. To lze získat kalibrací pomocí křivek ustanovených na základě jiných absolutních datovacích metod. Až tyto kalibrační křivky umožňují konvenčnímu radiouhlíkovému stáří přiřadit stáří kalibrované, jenž představuje časový interval, kdy s danou pravděpodobností došlo k přerušení příjmu uhlíku. Pro datování suchozemských vzorků severní polokoule se nyní používají především kalibrační křivky IntCal20 (Reimer et al. 2020), pro mořské vzorky je třeba použít křivku Marine20 (Heaton et al. 2020) a pro vzorky vzniklé po roce 1950 jsou používány křivky bombového píku (Hua et al. 2021).

Výsledky kalibrace většinou nemají tzv. normální distribuci, ale bývají multimodální, tedy s několika vrcholy v různých časových obdobích. Proto má využití běžných statistických metod při jejich interpretaci jen omezenou hodnotu. Technicky je sice možné vypočítat pro takovou distribuci průměr a standardní odchylku, ale z hlediska interpretace tím dojde k neakceptovatelné ztrátě informace, protože skutečné datum sledované události může ležet mimo takto stanovený interval. Z tohoto důvodu nabízí kalibrační softwary ^{14}C dat výpočet intervalu, v němž se s určitou pravděpodobností (zpravidla 68,3, 95,4 a 99,7 %) nachází skutečné datum události (Obr. 3). Aby se zamezilo ztrátě informací, či dezinterpretaci výsledků ^{14}C datování, je třeba při analýze vztahů jednotlivých kalibrovaných dat (současnost, překryv apod.) pracovat vždy s kompletními distribucemi za využití vhodných statistických metod. K redukci na intervaly v kalendářních letech je vhodné přistoupit až v závěrečné fázi interpretace dat. Doporučuje se přitom používat 95,4% interval spolehlivosti (viz Světlík et al. 2019). Při posuzování vzájemných chronologických vztahů je nutné použít sofistikovanější techniky vyvinuté pro tento účel. V příloze (*Online příloha 1*) tohoto článku jsou uvedeny typické příklady postupů ve volně přístupném programu OxCal 4.4 (Bronk Ramsey 2009) při kalibraci dat, určování posloupnosti/současnosti a práce se skupinami kalibrovaných dat, jež jsou založeny na tzv. Bayesovském modelování (Buck – Juarez 2017).

Obr. 4. Typologie části kalibrační křivky: relativně monotónní části, jejíž kalibrace vedou k jednomu hlavnímu časovému intervalu.



Omezující faktory radiouhlíkové metody

Do výše popsaného principu radiouhlíkové metody zasahují další faktory, které vyhodnocení dat činí složitější. Změna aktivity atmosférického $^{14}\text{CO}_2$ způsobuje, že průběh radiouhlíkové kalibrační křivky není lineární, ale kolísá a výsledné kalibrované časové intervaly se liší v délce trvání od desítek až po stovky let. Části kalibračních křivek lze rozlišit do čtyř hlavních typů (Světlik *et al.* 2019):

- Relativně monotónní části křivky vedoucí k jednomu hlavnímu časovému intervalu (Obr. 4).
- Kolísavé části křivky s několika samostatnými intervaly se srovnatelnými pravděpodobnostmi. V tomto ohledu je velmi nepříznivé především období 1640–1950 n. l. (Obr. 5).
- Plata na kalibrační křivce, která dávají vzniknout velmi dlouhým časovým intervalům o době trvání několika století. V době trvání takového plató aktivita atmosférického $^{14}\text{CO}_2$ zvolna klesala rychlostí blízkou poklesu aktivity ^{14}C následkem jeho radioaktivní přeměny. I když většina odborné veřejnosti zná pouze tzv. halštatské plató (800–400 př. n. l.), na kalibrační křivce se plata vyskytují ve více obdobích, především v průběhu holocénu (Tab. 2; Obr. 6; pro starší období viz např. Sarnthein *et al.* 2020).
- Strmé části křivky odpovídající relativně rychlému nárůstu aktivity atmosférického $^{14}\text{CO}_2$, které umožňují velmi úzké vymezení intervalů doby původu vzorků (Obr. 7). Taková období jsou však poměrně krátká, z čehož vyplývá i vzácný výskyt relevantních vzorků, které připadnou právě do takového časového intervalu (Tab. 2).

Před zadáním vzorků k datování je proto vždy potřeba pečlivě zvážit, zda dosažený interval přesnosti bude stačit k zodpovězení kladených otázek (Obr. 8). Vnitřní chronologické vztahy na pohřebišti nebo jemnější periodizaci archeologických kultur lze v rámci radiouhlíkových plat řešit datováním dostatečného množství analyzovaných vzorků a použitím pokročilých funkcí kalibračního software při modelování dat, čímž může dojít k zúžení výsledného intervalu.

Platů			Strmé úseky	
od	do	trvání	od	do
9220 BC	8750 BC	530	9294 BC	9240 BC
8550 BC	8350 BC	200	8300 BC	8245 BC
8230 BC	7730 BC	400	7595 BC	7530 BC
7050 BC	6700 BC	350	6475 BC	6415 BC
4240 BC	4042 BC	200	2913 BC	2886 BC
3365 BC	3025 BC	340	856 BC	790 BC
2870 BC	2570 BC	300	407 BC	376 BC
786 BC	407 BC	379	AD 600	AD 666
*AD 1645	AD 1955	310	AD 1230	AD 1280
*období kolísavé aktivity ¹⁴ C			AD 1390	AD 1450

Tab. 2. Přibližný výskyt holocenních platů delších než 200 let a strmých úseků radiouhlíkové kalibrační křivky s délkou trvání pod cca 70 let.

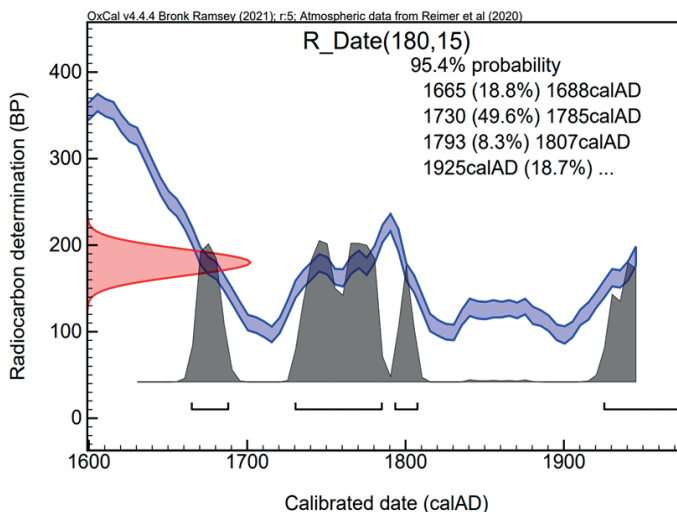
Dalším omezujícím faktorem radiouhlíkové datovací metody jsou tzv. rezervoáry, tedy místa v přírodním koloběhu uhlíku, v nichž je uhlík zadržován a hodnoty ¹⁴C tak nekorespondují s hodnotami v atmosféře, které se běžně používají pro kalibrace. Tento rušivý efekt způsobuje snížení aktivity ¹⁴C a vede ke zdánlivému zvýšení stáří vzorku např. příměsí fosilního uhlíku původem z uhlíčanů rozpuštěných ve vodě. Fosilní uhlík je asimilován vodními organismy a dále přenášen v rámci potravního řetězce. Rezervoárový efekt se tak může projevovat i při datování kostí lidských jedinců, kteří přijímali vysoký podíl potravy pocházející z vodních zdrojů (Olsen et al. 2010).

Rozlišujeme dva typy rezervoárového efektu: sladkovodní rezervoárový efekt (*fresh-water reservoir effect*, FRE; někdy také *hard water effect*) a mořský rezervoárový efekt (*marine reservoir effect*, MRE). FRE je geograficky velmi variabilní a může se lišit v rámci jednoho vodního zdroje, druhu organismu i jeho biologického stáří. U vzorků se známým datem vyloučení z uhlíkového koloběhu se rozpětí FRE pohybovalo od 0–2700 let (např. Fernandes et al. 2012; Philippsen 2013; Meadows et al. 2014; Gauthier 2022). Zvýšené zastoupení ryb, a tím i možné ovlivnění výsledků datování následkem FRE lze indikovat na základě poměru stabilních izotopů ¹³C a ¹⁵N (Fernandes et al. 2014). Lokální vliv FRE pro archeologické vzorky je možné vypočítat jako rozdíl ¹⁴C aktivit pozůstatků býložravců se vzorky, které i v rámci potravního řetězce mohly fosilní uhlíčitany do svých tkání zabudovat. V mnoha lokalitách není vliv FRE statisticky významný, a lze ho proto zanedbat. Na druhou stranu, z doposud provedených analýz archeologických vzorků na území ČR vyplývá, že kategorií živočichů nejvíce ovlivněnou FRE jsou měkkýši. Běžně je zaznamenáván rozdíl mezi aktivitou ¹⁴C u velevrubů a současných býložravců mezi 500–1500 lety, avšak ani u měkkýšů se nemusí vliv FRE projevit. FRE byl rovněž pozorován při srovnání aktivit ¹⁴C u ryb a želv vůči býložravcům ze shodných archeologických vrstev (Fernandes et al. 2012; Kyselý et al. 2016).

Příčinou vzniku MRE je snížená aktivita ¹⁴C v mořské vodě, protože dochází k výměně CO₂/¹⁴CO₂ mezi povrchovou oceánskou vrstvou a hlubinnými vodami.² Současné hodnoty

² V hlubinných oceánských vodách dochází k poklesu aktivity následkem doby zdržení, která je zde srovnatelná s poločasem přeměny ¹⁴C.

Obr. 5. Typologie části kalibrační křivky: kolísavé části křivky s několika samostatnými časovými intervaly srovnatelné pravděpodobnosti. V tomto směru je velmi nepříznivé především období 1640–1950 n. l.



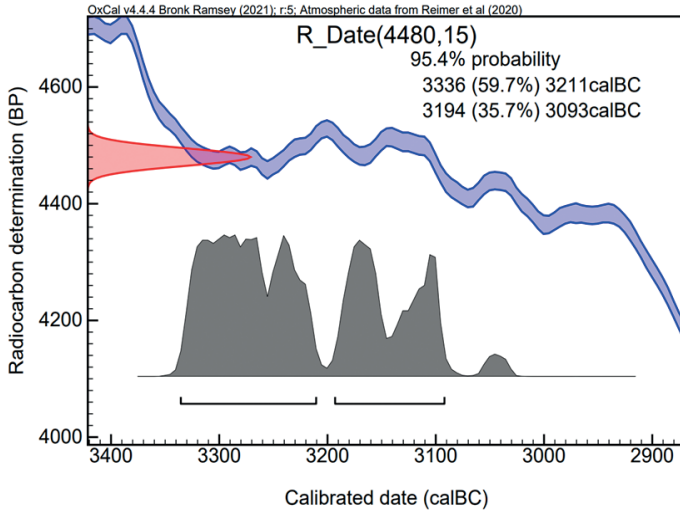
MRE povrchových vod se pohybují průměrně okolo 400 let, avšak směrem k pólům narůstají až na 1200 let. Taktéž v tomto případě lze vliv významného zastoupení mořských ryb ve stravě jedince indikovat a částečně korigovat pomocí stabilních izotopů $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ a $\delta^{34}\text{S}$. Pro datování čistě oceánských vzorků byly sestaveny speciální kalibrační křivky. Kalibrační programy pak umožňují kombinovat suchozemskou a oceánskou křivku pomocí odhadu zastoupení mořských zdrojů ve stravě daného jedince.

Netypické archeologické vzorky pro radiouhlíkové datování

Nejběžnějším typem vzorků zpracovávaných pro datovací účely jsou kosti, zuby a částečně až zcela zuhelnatělé materiály rostlinného původu (kousky dřev, listů, semen, kořinky, stonky, saze atd.). Vzácněji se vyskytují připečené zbytky poživatin na keramice, tuky, kůže, rohovina, vlasy, nehty, nezuhelnatělé materiály rostlinného původu a jiné typy vzorků jako textil, uhlíčitany, chitin, pergamen nebo papír. Technologický vývoj poslední let umožnil datovat i nové, dříve nedatované druhy materiálů. V následujícím textu uvádíme příklady datování netypických vzorků, s nimiž autoři článku úspěšně pracují (lipidy, zubní kámen, pylové koncentráty, fytolity), ale také těch, jejichž datování dosud přináší řadu metodologických výzev. Jedná se o vzorky spálených kostí, malt, železných předmětů a strusek, u kterých může dojít ke kontaminaci cizorodým uhlíkem a tím pádem i zkreslenému výsledku aktivity ^{14}C .

Lipidy

Lipidy jsou širokou skupinou chemických látek přírodního původu. Řadíme k nim tuky, oleje, vosky, ale i další látky lipofilní povahy, např. lipofilní vitaminy, barviva, hormony, či přírodní antioxidanty (Velíšek – Hajšlová 2009). V souvislosti s archeologickými nálezy jsou nejčastěji zmiňovány degradační produkty tuků, olejů či vosků. Jde o mastné kyseliny



Obr. 6. Typologie částí kalibrační křivky: plata na kalibrační křivce, která dávají vzniknout velmi dlouhým časovým intervalům o době trvání několika století. Na kalibrační křivce se plata vyskytují ve více obdobích především v průběhu holocénu.

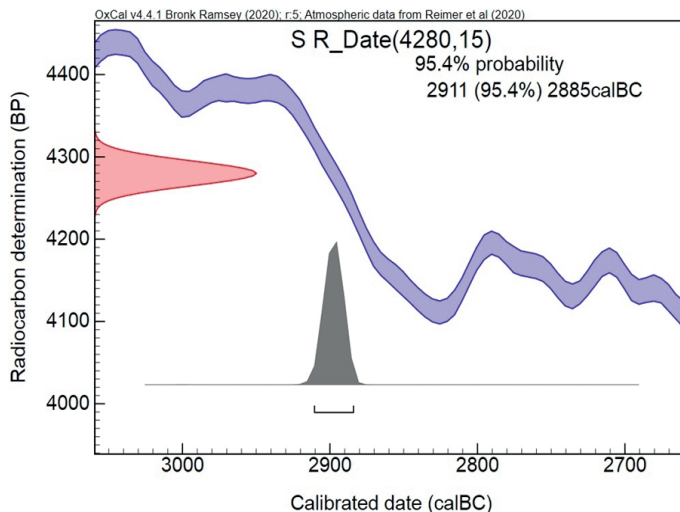
či mastné alkoholy, ale i zbytky pryskyřic, což jsou látky terpenoidní a také lipofilní povahy, díky čemuž jsou extrahovatelné nepolárními organickými rozpouštědly (Evershed 2008). Všechny tyto látky jsou v rámci archeologického kontextu řazeny mezi archeologické lipofilní biomarkery a mohou pomoci objasnit původní funkci archeologického artefaktu i jeho stáří.

Lipofilní biomarkery jsou extrahovány z různých typů archeologických vzorků, ať už z neglazované keramiky, z půd a sedimentů (Bull *et al.* 2003), lidských ostatků (Corr *et al.* 2008), rostlinného materiálu (Tchapla *et al.* 2004) či přírodních barviv a pigmentů (Cardon 2007). Možnost analyzovat v archeologickém kontextu tuk jako původní artefakt je velmi vzácná, nicméně existují příklady v podobě nálezů tzv. *bog butters* v rašeliništích (Thornton *et al.* 1970; Berstan *et al.* 2008).

Při datování lipidů z artefaktů ve většině případů nelze použít celkový lipidický extrakt, jelikož jednotlivé lipidy ve vzorku pocházejí z různých přírodních zdrojů a rezervoárů (Mollenhauer – Rethemeyer 2009) a nikdy nelze zcela vyloučit kontaminaci vzorku cizorodým zdrojem uhlíku (Yates *et al.* 2015). Z tohoto důvodu se používá molekulárně-specifická radiouhlíková analýza (*compound specific radiocarbon analysis*, CSRA), během níž se z heterogenní matrice izoluje jedna látka či skupina specifických látek. Tato frakce je potom dále zpracována a datována pomocí AMS (Eglinton *et al.* 1996; Stott *et al.* 2003; Casanova *et al.* 2017; 2018).

Mezi příklady užití CSRA patří datování lipidů uchovaných ve fragmentech neglazované keramiky, kam se adsorbovaly během aktivního používání nádoby. Nejčastěji přítomnými lipidickými markery jsou volné mastné kyseliny a deriváty triacylglycerolů živočišných tuků, z rostlinných zdrojů pak vosky, mastné alkoholy a terpenoidní látky (Evershed 2008; Roffet-Salque 2017; Brychová 2021). Látky bílkovinové nebo sacharidové povahy většinou kvůli jejich chemické nestálosti v čase a náchylnosti k mikrobiální degradaci nelze v keramice očekávat. Nejvíce zastoupenými mastnými kyselinami v lipidickém extraktu keramiky jsou kyseliny palmitová a stearová (vyskytují se například v živočišných i rostlinných tucích a olejích). Izolovat tyto dvě mastné kyseliny v dostatečném množství a čistotě

Obr. 7. Typologie částí kalibrační křivky: strmé části křivky odpovídající relativně rychlému nárůstu aktivity atmosférického ^{14}C . Výsledky datování umožňují velmi úzké vymezení intervalů doby původu vzorků.

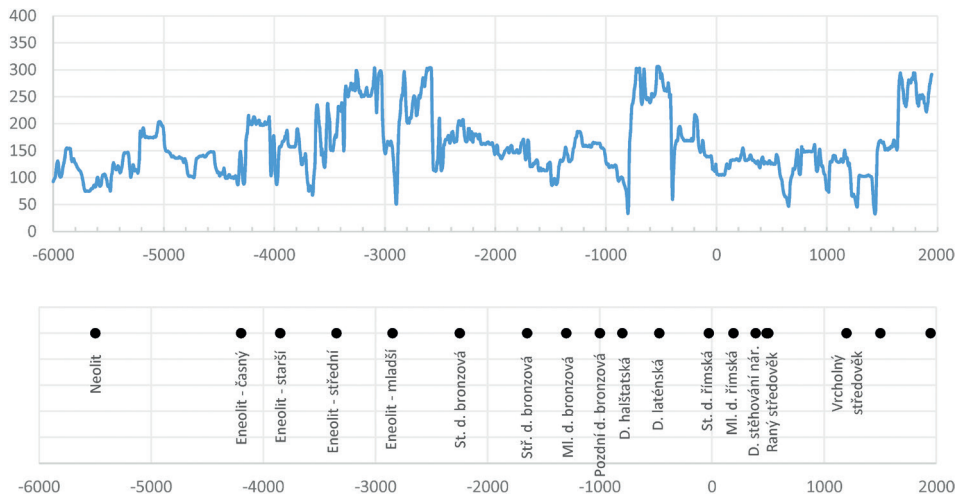


za účelem následného radiouhlíkového datování je náročné jak na potřebné laboratorní vybavení, tak i na samotnou metodiku izolace. Klíčové je odstranění jakékoli externí uhlíkaté kontaminace a minimalizace jakéhokoli dalšího možného vstupu cizorodého uhlíku během finálního zpracování vzorku (Casanova *et al.* 2017; 2018). Současné studie však ukázaly, že dodržением všech kroků separačního postupu lze získat spolehlivé výsledky analýzy ^{14}C i z velmi nízkých koncentrací izolovaných mastných kyselin (Casanova *et al.* 2020a; 2020b). Dalším příkladem molekulárně-specifického radiouhlíkového datování látek lipofilní povahy je datování n-alkanů či n-alkoholů, původem z vosků listů vyšších rostlin, či specifických bakteriálních a archebakteriálních markerů, které se mohou dochovat v půdách, spraších nebo mořských sedimentech (Eglinton *et al.* 1997; Pancost *et al.* 2000; Ingalls – Pearson 2005; Haas *et al.* 2017).

Stejně jako u klasických způsobů zpracování vzorků za účelem radiouhlíkového datování je i u molekulárně-specifického přístupu vhodné při výsledné interpretaci výsledků zohlednit možný vliv různých frakcionačních a rezervoárových efektů na aktivitu ^{14}C ve vzorku, a to pomocí analýzy příslušných stabilních izotopů (Pancost *et al.* 2000; Casanova *et al.* 2020b).

Zubní kámen

Zubní kámen je mineralizovaný bakteriální povlak na povrchu zubů tvořený primárně ze zubního plaku (Jin – Yip 2002). Vyskytuje se ve všech známých lidských populacích (Lieverse 1999; White 1997) a v podobné formě byl zaznamenán i u šimpanzů (Hardy *et al.* 2009) a dalších zvířat jako jsou psi, prasata, krávy, ovce a sobi (Dobney – Brothwell 1987; Middleton – Rovner 1994; Ozga – Ottoni 2023), což rozšiřuje možnosti aplikace v archeologii i archeozoologii. Zubní kámen je tvořen organickou a minerální složkou, přičemž organická složka tvoří 15–20 % suché váhy a sestává z proteinů, glykoproteinů, peptidů, aminokyselin, sacharidů a lipidů (Hillson 1996). Minerální struktura je složením velmi podobná té v kostech, dentinu, nebo zubním cementu, a je tvořena vápníkem, fosfo-



Obr. 8. Možnosti časového rozlišení radiouhlíkové metody v závislosti na kalibrovaném stáří vzorku pro období zemědělského pravěku. Osa y značí 2σ nejistoty analýzy ^{14}C , intervaly odpovídají pravděpodobnosti přibližně 95 %.

rem, uhličitany, sodíkem, hořčíkem a fluorem (Mandel 1990). Mineralizace zubního plaku v zubní kámen je způsobena procesy, které nejsou doposud plně známy a pochopeny (White 1997; Lieverse 1999; Jin – Yip 2002).

Zubní kámen je z hlediska retrospektivních věd čím dál více vyhledávaným materiálem. Z etického hlediska se jedná o biologický materiál druhé třídy (Henry et al. 2011; Poulson et al. 2013), který je možné odebrat pro destruktivní analýzy bez přímého poškození kosterních ostatků. Dále má zubní kámen výrazný interpretační potenciál z hlediska hodnocení zdravotního stavu (Harkins – Stone 2015; Warinner et al. 2014a), složení stravy (Warinner et al. 2014b; Wesolowski et al. 2010), kulturních návyků (Adler et al. 2013), životního prostředí, migrace, mobility (Bentley 2012; King et al. 2013), složení mikrobiomu dutiny ústní a celého trávicího traktu (Warinner et al. 2014c), případně analýzy endogenní DNA minulých populací (De La Fuente et al. 2013). V poslední době se také ukazuje možnost jeho využití pro radiouhlíkové datování, které je prozatím v experimentální fázi, nicméně má slibné výsledky (Hofreiter et al. 2021).

Pro možnosti radiouhlíkového datování je zajímavé zmínit teoretický model srovnávacího datování v rámci jednoho zubu určitého jedince. U zubu by bylo možné datovat kolagen z dentinu, nejčastěji kořene zubu, aragonit (apatit) ze skloviny, nebo právě bílkoviny a uhličitany ze zubního kamene. Takto lze získat až čtyři na sobě nezávislé výsledky, zatímco použijeme pouze jediný zub. Následným porovnáním můžeme indikovat možné problematické faktory ovlivňující ^{14}C aktivitu jednotlivých použitých materiálů.

Pylové koncentráty

V případech, kdy potřebujeme radiouhlíkově datovat sedimentární záznamy, které jsou na terestrické makrozbytky rostlin chudé nebo v nich zcela chybí, lze využít pylové koncentráty. Uhlík v buněčných stěnách pylu je původem z atmosférického CO_2 , který se asi-

miluje během vývoje pylového zrna nebo ze zásobních látek rostliny starých maximálně několik let (např. *Davis – Sparks 1971*). Stavba pylového zrna tak přímo odpovídá množství uhlíku v atmosféře během jeho vzniku nebo krátce před ním.

První pokusy o radiouhlíkové datování pylových koncentrátů prokázaly shodu mezi výsledky získanými z koncentrátů a datováním rostlinných makrozbytků ze shodných sedimentárních vrstev (*Brown et al. 1989*). Další studie ovšem upozornily na potencionální kontaminace pylových koncentrátů organickými rezidui, moderním uhlíkem či v důsledku depozičních procesů a rezervoárového efektu (*Kilian et al. 2002; Neulib et al. 2013; Fletcher et al. 2017*). Ukázalo se, že rozdíl může činit stovky až tisíce let (např. *Neulib et al. 2013*).

Pro získání spolehlivých výsledků jsou proto nezbytné správné metody čištění vzorku. První fáze je do jisté míry shodná s postupy extrakce pylu pro mikroskopickou analýzu, kdy se za využití kyselin a louhů odstraní ze vzorku rozpuštěné karbonáty a huminové kyseliny. Během chemického zpracování je ovšem nezbytné vyhnout se činidlům na bázi uhlíku, například acetolyzační směsi, aby se předešlo kontaminaci vzorku moderním radiouhlíkem (např. *Tunno et al. 2021*). Další fáze zahrnuje hustotní separaci s využitím těžké kapaliny, během níž lze na základě rozdílné hmotnosti pylových zrn vyseparovat konkrétní druhy (*Vandergoes – Prior 2003; Fletcher et al. 2017*), u kterých lze vyloučit vliv rezervoárového efektu (např. zrna terestrických rostlin). Jako osvědčený nástroj separace se ukázala metoda průtokové cytometrie umožňující velmi rychlou extrakci téměř čistých koncentrátů (*Tennant et al. 2013; Tunno et al. 2021*).

Je doporučeno podrobit vzorky během extrakce mikroskopické analýze, a pokud to lze, porovnat výsledky datování pylových koncentrátů s datováním terestrických makrozbytků případně s jinými datovacími metodami (*Brown et al. 1989; Kilian et al. 2001; Newnham et al. 2007*). Podobně je při interpretaci výsledků vhodné zohlednit informace o kontextu lokality (geomorfologické, hydrologické), které jsou důležité pro detekci případných depozičních procesů nebo hiátů (*Carter et al. 2020*). Pokroky v metodice extrakce a třídění pylových zrn, k nimž došlo během posledních let, přináší nové možnosti v sestavování spolehlivých chronologií sedimentárních záznamů pro paleoenvironmentální i archeobotanické rekonstrukce.

Fytolity

Fytolity jsou mikroskopické částice biogenního opálu ($\text{SiO}_2, \text{nH}_2\text{O}$) vznikající v pletivech živých rostlin (*Piperno 2006*). Po rozložení organických částí rostliny se uvolní do půdy či sedimentu, kde mohou přetrvávat statisíce až miliony let (*Strömberg et al. 2018*). Díky své odolnosti vůči chemickému zvětrávání se fytolity nachází téměř ve všech typech sedimentárních archivů, což značně rozšiřuje možnosti paleobotanické, paleoekologické i archeobotanické rekonstrukce. Radiouhlíkové datování fytolitů pak nabízí vhodnou alternativu v případech, kdy jiný datovatelný organický materiál není k dispozici.

Fytolity se utváří z vysrážené kyseliny křemičité obsažené v půdním roztoku a v závislosti na umístění křemíku v buňce se liší ve svém chemismu a tím i obsahu uhlikatých sloučenin (*Hodson 2018*). Uhlík z fytolitů vzniklých uložením křemíku v buněčné stěně pochází spíše z celulózy, zatímco ve fytolitech, které vznikly vyplněním celé buňky (současně se zatlačením buněčného protoplastu), pochází uhlík z lipidů, nukleových kyselin či proteinů. Proporce čistého uhlíku ve fytolitech se odvíjí právě od tohoto dělení. Fytolity

s křemičitými stěnami mají uhlíku více (3,4–24,7 %) ve srovnání s fytolity s křemíkem vyplňujícím celou buňku (0,3–0,5 %; *Hodson 2019*).

Radiouhlíkové datování fytolitů přispělo mimo jiné k objasnění počátků kultivace významných plodin, jako je rýže nebo tykev (*Piperno – Stothert 2003; Zuo et al. 2017*). Spolehlivost byla ověřena jak shodou s popsanou stratigrafií, tak porovnáváním s datací jiného organického materiálu (*Piperno 2016*). Nicméně při srovnání datace fytolitů s jiným typem vzorků nelze očekávat naprostou shodu, jelikož fytolity datujeme v celém jejich spektru, které pochází z různých rostlin a je tedy zprůměrované v prostoru i čase. Zmínit musíme ale i pokusy s datováním fytolitů moderních rostlin, které ukázaly výsledky o stovky i tisíce let starší než samotná rostlina a otřásly tak důvěrou ve spolehlivost této metody (*Santos et al. 2012*).

Předmětem pochybností je původ uhlíku ve fytolitech. V ideálním případě by fytolitový uhlík měl pocházet jen z atmosférického CO₂ zabudovaného do rostlinných buněk při fotosyntéze. Reálně ale hrozí i kontaminace půdním uhlíkem, který může výsledné datum silně ovlivnit (*Santos et al. 2018*). Možný mechanismus zabudování půdního uhlíku do fytolitů ale nebyl dosud vědecky popsán (*Hodson 2018*). Není jasné, proč by se měl „starý“ uhlík preferenčně ukládat ve fytolitech, zatímco ve zbytku rostliny by převládal uhlík soudobý. Spor o spolehlivost radiouhlíkového datování fytolitů zatím nebyl uspokojivě vyřešen. Některé studie nicméně vyzývají ke zdokonalení laboratorní extrakce fytolitů, při níž by bylo dosaženo čistého vzorku (tj. bez kontaminace cizorodými chemickými formami uhlíku z půdy), ale nebyl poničen uhlík uvnitř fytolitů, na který radiouhlíkové datování primárně cílí (*Zuo et al. 2014; Asscher et al. 2017*).

Spálené kosti

Do relativně nedávné doby bylo datování spálených kostí mimo možnosti radiouhlíkové metody, protože kremace ničí kolagen, který je k datování kostí běžně využíván. Proto bylo přistoupeno k datování bioapatitu, jenž je obsažen v anorganické složce kosti a nezničí ho ani teploty na 650 °C (*Olsen et al. 2008; Van Strydonck 2016; Rose et al. 2019; Shiroukhov 2019; Capuzzo et al. 2020*).

Určitým metodologickým rizikem při datování bioapatitu je kontaminace kosti kalcitem, který obvykle bývá novějšího data. Bioapatit ze spálených kostí je vůči diagenetickým změnám odolnější než bioapatit fosilních kostí. Je proto vhodné předem zhodnotit strukturu a velikost krystalů uhličitanu dané kosti, aby mohlo být posouzeno riziko jeho diagenetické výměny s okolní půdou. Běžně se pro tento účel využíval stupeň krystalinity (*crystallinity index*, CI) rentgenové difrakční spektroskopie (XRD), který byl v posledních letech nahrazen metodou FTIR (*Fourier transform infrared spectroscopy*; *Van Strydonck 2016*, 76). Pokud má laborant s daným materiálem zkušenosti, do jisté míry stačí i vizuální zhodnocení vzorku.

Pohyb částic během žáru generovaného při spalování způsobuje nejen ztrátu uhlíku v apatitu (*Van Strydonck 2016*, 75), ale také jeho nahrazování oxidem uhličitým z prostředí žároviště. Izotopy uhlíku přítomné v uhličitanové frakci spáleného bioapatitu tak mohou mít celkem tři možné zdroje: endogenní uhlík v bioapatitu, endogenní uhlík v kolagenu a exogenní uhlík přítomný v atmosféře pohřební hranice. V praxi má na datování znatelný vliv pouze výměna uhlíku mezi bioapatitem a plynem uvolněným z paliva; výměna s atmosférickým CO₂ je zanedbatelná a organické součásti kremace podlehnou spalení v re-

lativně krátké době na to, aby ovlivnily chemické složení uhlíčitanové frakce bioapatitu. Kolagen podléhá degradaci pomaleji, takže má větší potenciál pro chemickou interakci s bioapatitem, ale vzhledem k tomu, že obě složky mají srovnatelné stáří, nedochází tím k ovlivnění datování.

Vzájemné propojení lidských ostatků a paliva ve sdílené atmosféře žároviště způsobuje, že radiouhlíkové datování kremací se potenciálně rovná datování dřeva použitého jako palivo. Teoretickým rizikem při datování archeologických kremací je tak tzv. efekt starého dřeva (*old wood effect*), který vzniká při výměně uhlíku paliv z výrazně staršího dřeva, než je pohřeb (Zazzo *et al.* 2009; Olsen *et al.* 2013). Tento efekt se stává významným, pokud je rozdíl mezi stářím lidských pozůstatků a palivem větší, než je nejistota analýzy ^{14}C . Experimenty prováděné s čerstvými zvířecími kostmi a fosilním dřevem (Hüls *et al.* 2010; Van Strydonck 2016) nebo naopak s fosilními kostmi a moderním dřevem (Zazzo *et al.* 2012) ukázaly znatelné posuny výsledků směrem k mladším i starším obdobím.

Při interpretaci ^{14}C dat z kremací je třeba zvážit, že lidské pozůstatky mohly být spáleny až určitou dobu po úmrtí jedince za použití „mladého“ (tj. mladšího než datum úmrtí) dřeva. Výsledkem je pak ^{14}C datum kremace, nikoliv úmrtí jedince. Dalším druhem ovlivnění mohlo být spálení ostatků za použití „starého“ dřeva, tj. paliva výrazně staršího, než je pohřeb. Výsledkem je pak ^{14}C datum vzniku paliva, nikoliv úmrtí, resp. kremace (Wolska 2020, 10).

Tyto interpretační možnosti mohou samozřejmě nastat pouze v případě, kdy je rozdíl mezi stářím pozůstatků, stářím paliva a datem kremace větší, než přesnost radiouhlíkové datace v konkrétním období a citlivost typochronologického datování pohřební výbavy (např. Rose *et al.* 2019, 1587).

Železné předměty a železné strusky

Podobně jako u ostatních materiálů, které prošly v určitém okamžiku své existence žárem, je datování železných předmětů založeno na určení stáří paliva, které během tohoto procesu bylo použito. Tento předpoklad však platí pouze tehdy, je-li pro výrobu železa užíváno dřevo nebo dřevěné uhlí (Cook *et al.* 2003, 22).

Datovatelný uhlík v železných materiálech lze rozdělit na dva základní typy. Prvním je hutnická struska, kde kromě uhlíku v železe samotném často nacházíme také větší či menší kusy dřevěného uhlí pocházející z paliva použitého při hutnění. Druhým případem jsou vlastní železářské produkty – kovářská struska, materiály a výrobky. Zde je uhlík z paliva obsažen přímo v železe a lze ho měřit, pokud je koncentrace dostatečně vysoká, aby bylo možné uhlík laboratorně extrahovat. Různé typy železných materiálů obsahují různé koncentrace uhlíku: kované železo (výkovky a kovářská struska) mají obvykle velmi nízký obsah uhlíku (méně než 0,05 %), oceli pak mívají více (do 2,1 %) a litiny nejvíce (zpravidla nad 2,1 %) (Cook *et al.* 2003, 15; Hüls *et al.* 2004, 709–710). Kromě toho železo může obsahovat i struskové inkluze, které se dají datovat s použitím AMS. Základní kritérium pro ^{14}C datování je potom srovnatelné stáří paliva a železného předmětu, neboť i v tomto případě může negativně působit efekt starého dřeva.

Stanovení původu uhlíku v datované směsi je problematické, neboť mohl pocházet z různých zdrojů velmi odlišného původu. Kromě fosilních paliv, jako je uhlí, rašelina a koks, jsou i jiné zdroje uhlíku, jako jsou geologické uhlíčitany (např. vápenec a siderit), skořápky nebo fosilní dřevo. Všechny tyto materiály mají výrazně nižší obsah ^{14}C a mohou

způsobit chybu datování v rozsahu až tisíců let směrem ke starším hodnotám. Vzhledem k tomu, že recyklování železa bylo v minulosti běžnou praxí, je pravděpodobné, že materiál byl vystaven pyrotechnologickým procesům opakovaně, během nichž žár, redukce, oxidace a nauhličování různými palivy a tavidly obsahujícími uhlík v různých formách, vneslo další problémy do interpretace výsledných ^{14}C dat (detailně *Craddock et al. 2002*, 726–727). Vzhledem k tomu není metoda v současné době příliš využívána. Děje se tak pouze v případě výjimečných nálezů bez archeologického kontextu (*Hüls et al. 2019*) nebo při ověřování pravosti artefaktů (*Craddock et al. 2002*).

Druhou skupinou ^{14}C datovaných železných materiálů jsou hutnické výrobní objekty a hutnická struska. V tomto případě není nutné přímo extrahovat uhlík ze železa, ale lze datovat kusy dřevěného uhlí zachycené během hutnickém procesu ve strusce. Ani tato jednodušší metoda se však neobejde bez rizik spojených s původem uhlíku v analyzovaném materiálu. Jednou z hlavních příčin kontaminace vzorku se zdá být použití vápence jako struskotvorného činidla (pomáhá při rozpouštění a tečení rud, např. struska, písek, jiný typ rudy, drcená keramika), neboť ve velkém množství obsahuje fosilní uhlík, který snižuje zastoupení ^{14}C ve výsledném produktu (*Oinonen et al. 2009*).

Kontaminace fosilním uhlíkem hrozí také, pokud se hutnická dílna nachází v prostředí s výskytem uhličitánu vápenatého v lokálních půdách, tedy v regionech s převahou vápenců a spráší (*Gassmann – Schäfer 2018*, 325). V takových případech může být zdrojem uhličitánu vápenatého stěna či vyzdívka pece nebo samotná vsázka. V některých regionech železná ruda sama obsahuje fosilní uhlík ve formě vápence, dolomitu ($\text{CaCO}_3\text{-MgCO}_3$) nebo sideritu (FeCO_3) (*Gassmann – Schäfer 2018*, 325). Tento jev se navíc z nevysvětlitelných důvodů vyskytuje selektivně – nenastává vždy, i když nastanou podmínky popsané výše. V každém případě může být výsledek datování až několik tisíc let rozdílný ve srovnání s kontrolním měřením jiných materiálů (*Cresswell et al. 1992; Hüls et al. 2004; Oinonen et al. 2009; Gassmann – Schäfer 2018; Hüls et al. 2019*).

Malty

Přímé datování karbonátového pojiva malt je velmi žádoucí a poptávané, bohužel z metodologického hlediska poměrně problematické. Prvním krokem ke vzniku malty je výroba nehašeného vápna tepelným rozkladem vápence, který je tvořen převážně uhličitánem vápenatým (CaCO_3). Po vyhašení vápna, tedy převedení na hydroxidovou formu, se ze vzduchu absorbuje oxid uhličitý a opět vzniká uhličitán vápenatý. Rozdíl mezi zaniklým a vzniklým uhličitánem je v izotopovém složení a aktivitě ^{14}C , neboť v geogenním vápenci už došlo k úplné radioaktivní přeměně, zatímco nově vzniklý obsahuje ^{14}C , ^{13}C a ^{18}O původem z molekul atmosférického oxidu uhličitého v době reakce.

Teoreticky tak datování maltového pojiva odpovídá době jeho vzniku. Reálně ovšem popsany proces ovlivňuje řada protichůdných a mnohdy současně působících faktorů, které mění aktivitu ^{14}C tak, že se vzorek jeví zdánlivě starší nebo mladší. Jedná se například o neúplný výpal vápence a kontaminaci geogenním uhličitánem, kontaminaci dalšími látkami, zpomalení karbonatace v závislosti na hloubce stavebního materiálu, rozpouštění a rekrystalizace vápence (*Addis et al. 2019; Urbanová et al. 2020*).

Aktuálně jsou vyvíjeny postupy a zařízení pro extrakci uhlíku z karbonátového pojiva historických malt. Rozvíjí se i datování biologických inkluzí v pojivech, jako jsou zuhelnatělá i nespálená dřeva, semena a další makrobiota. Dřívější datování zuhelnatělého dřeva

Lokalita	Odběrová plocha (m ²)	Uhlíky	Další	Vzorků k AMS měření
Pyšolec, věž, pilíř	114	32	5 dřívěk	33
Týřov, bergfried	60	14	3 dřívka	13
Rýzmburk, hlavní věž	40	10	–	9
Pražský hrad, románská chodba	7	36	1 kost	15

Tab. 3. Souhrn počtu odebraných uhlíků a dalších vzorků z historických poжив na čtyřech zkoumaných lokalitách.

z malt přineslo nejednoznačné výsledky. Část studií dospěla k výsledku shodnému s jiným způsobem stanovení stáří stavby (např. *Addis et al. 2019*), ale jiné dospěly k nesrovnalostem (např. *Michalska Nawrocka et al. 2007*). Mladší datace byly zřejmě způsobeny kontaminací vzorků uhlíků nalezených na povrchu malty plísněmi, houbami nebo lišejníky. Obvykle vzorkované makrobiotické inkluze jsou totiž velmi malé hmotnosti, a proto citlivé na i ty nejmenší stopy kontaminace. Starší datace jsou přičítány efektu starého dřeva. Uhlíky v maltách pocházejí velmi pravděpodobně z dřeva použitého k výpalu, a přestože se předpokládá, že středověcí paliči z praktických důvodů upřednostňovali mladé dřeviny a větve, teoreticky mohly být použity i kmeny vzrostlých stromů.

V rámci průzkumu tří českých středověkých hradů (Pyšolec, Rýzmburk a Týřov) a románské chodby, která se nachází pod třetím nádvořím Pražského hradu (*Pachnerová Brabcová et al. 2022a; 2022b*) byly v makrobiotických inkluzích poжив nalezeny zejména uhlíky (Tab. 3), což je ve srovnání se zahraničními lokalitami překvapivé, neboť zde je výskyt uhlíků vzácný (*Rutgers et al. 2002*). Vzbuzuje to otázku, jestli uhlíky nebyly v českém kontextu do poжив přidávány systematicky, například s cílem dosáhnout určitého technologického efektu. Radiouhlíkové datování bylo uskutečněno pouze u části odebraných uhlíků, ostatní byly z analýzy vyřazeny kvůli malé hmotnosti nebo kontaminaci, jiná část byla identifikována jako kameny a a ještě další se rozpustily během chemické předúpravy. Z celkem sedmdesáti analyzovaných vzorků se u žádného nepotvrdila obava z možné mladší biologické kontaminace. Naopak efekt starého dřeva se pravděpodobně projevil ve vzorcích ze všech lokalit, výsledky naznačují použití dřeva starého i více než 200 let.

Závěr

Příspěvek shrnuje principy radiouhlíkové datovací metody, její potenciál i omezení při aplikaci v archeologii a aktuální možnosti ve vývoji nových postupů. Nejpozději při zadávání vzorků laboratoři je nutné mít zvolenou jasnou strategii datování (jaké události mají být datovány) a zvážit možná ovlivnění plynoucí z povahy vzorků nebo nálezové situace (např. rezervoárový efekt, formační procesy v lokalitě). V kvalitních laboratořích je kladen důraz na individuální přístup ke každému vzorku a archeologům je nabízena pomoc s kritickým vyhodnocením výsledků a vyloučením faktorů, které mohou výsledky zkreslit. V případě vzorků s možným ovlivněním rezervoárovým efektem je provedeno měření stabilních izotopů, které prokáže, zda byl daný organismus závislý na vodních ekosystémech. Vzorky, u nichž existuje podezření na kontaminaci, jsou měřeny opakovaně, anebo jsou pro jejich přípravu využity speciální postupy.

Za posledních 15 let se radiouhlíková datovací metoda technologicky proměnila. S využíváním systému AMS se rapidně snížily nároky na množství analyzovaného materiálu a celý proces analýzy se urychlil, čímž se metoda stává pro archeology dostupnější a lépe využitelnou. Některé limity stále přetrvávají, ale lze je částečně překonat vyšším počtem a variabilitou analyzovaných vzorků, ultrafiltrací bílkovin z kolagenu, datováním izolované aminokyseliny z kolagenu a využitím statistických metod. Omezení metody spočívá také v nelineárním průběhu kalibrační křivky, který může značně rozšířit výsledný interval datování, a ovlivnění rezervoáry s neatmosférickými zdroji uhlíku. Další limity souvisejí s genezí vzorků spálených kostí, strusek, železných předmětů a strusek či malt. Výsledky totiž nemusí korespondovat s datovanou událostí, protože v těchto materiálech docházelo k dodatečnému příjmu uhlíku. Aktuální možnosti radiouhlíkového datování dovolují chronologicky zařadit dosud jen zřídka datované typy vzorků, jako jsou lipidy uchované v pórech keramiky, zubní kámen, fytolity a pyly ze sedimentů a půd. Tím se rozšiřuje aplikační spektrum radiouhlíkového datování jako základního nástroje pro chronologické ukotvení přírodních i kulturních procesů a událostí v minulosti.

Článek vznikl za podpory Operačního programu VVV, Výzva 19: Excelentní výzkum; projekt je financován ze zdrojů MŠMT a EU (reg. č. CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_019/0000728) s názvem „Výzkum ultrastropových izotopů a jejich využití v sociálních a environmentálních vědách urychlovačovou hmotnostní spektrometrií“ a projektu aplikovaného výzkumu a vývoje národní a kulturní identity (NAKI III, Ministerstvo kultury ČR) č. DH23P03OVV003 s názvem „Artefakt jako zdroj poznání: Záchrana a zachování výzkumných dat archeologických nálezů“.

Literatura

- Addis, A. – Secco, M. – Marzaioli, F. – Artioli, G. – Chavarría Arnau, A. – Passariello, I. – Terrasi, F. – Broglio, G. P. 2019: Selecting the most reliable ^{14}C dating material inside mortars: The origin of the Padua cathedral. *Radiocarbon* 61, 375–393. <https://doi.org/10.1017/RDC.2018.147>
- Adler, C. J. – Dobney, K. – Weyrich, L. S. – Kaidonis, J. – Walker, A. W. – Haak, W. – Bradshaw, C. J. – Townsend, G. – Soltysiak, A. – Alt, K. W. 2013: Sequencing ancient calcified dental plaque shows changes in oral microbiota with dietary shifts of the Neolithic and Industrial revolutions. *Nature Genetics* 45, 450–457. <https://doi.org/10.1038/ng.2536>
- Asscher, Y. – Weiner, S. – Boaretto, E. 2017: A new method for extracting the insoluble occluded carbon in archaeological and modern phytoliths: Detection of ^{14}C depleted carbon fraction and implications for radiocarbon dating. *Journal of Archaeological Science* 78, 57–65. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2016.11.005>
- Bayliss, A. – van der Plicht, J. – Bronk Ramsey, Ch. – McCormac, G. – Healy, F. – Whittle, A. 2011: Towards generational time scales: the quantitative interpretation of archaeological chronologies. In: A. Whittle – F. Healy – A. Bayliss (eds.), *Gathering time. Dating of Early Neolithic enclosures of southern Britain and Ireland*, Oxford, Oakville: Oxbow, 17–59.
- Baumont, W. – Beverly, R. – Southon, J. – Taylor, R. E. 2010: Bone preparation at the KCCAMS laboratory. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B* 268, 906–909. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2009.10.061>
- Bell, M. – Fowler, P. J. – Hillson, S. W. eds. 1996: *The experimental earthwork project 1960–1992*. (CBA Research report 100.) 1996. York: Council for British Archaeology.
- Bentley, R. A. 2012: Mobility and the diversity of early Neolithic lives: Isotopic evidence from skeletons. *Journal of Anthropological Archaeology* 32, 303–312. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaa.2012.01.009>
- Berstan, R. – Stott, A. W. – Minnitt, S. – Ramsey, C. B. – Hedges, R. E. M. – Evershed, R. P. 2008: Direct dating of pottery from its organic residues: new precision using compound-specific carbon isotopes. *Antiquity* 82, 702–713. <https://doi.org/10.1017/S0003598X00097325>

- Brock, F. – Bronk Ramsey, C. – Higham, T. 2007: Quality assurance of ultrafiltered bone dating. *Radiocarbon* 49, 187–192. <https://doi.org/10.1017/S0033822200042107>
- Brock, F. – Dee, M. – Hughes, A. – Snoeck, C. – Staff, R. – Ramsey, C. B. 2018: Testing the effectiveness of protocols for removal of common conservation treatments for radiocarbon dating. *Radiocarbon* 60, 35–50. <https://doi.org/10.1017/RDC.2017.68>
- Bronk Ramsey, C. 1995: Radiocarbon calibration and analysis of stratigraphy: The OxCal program. *Radiocarbon* 37, 425–430. <https://doi.org/10.1017/S0033822200030903>
- Bronk Ramsey, C. 2009: Bayesian Analysis of Radiocarbon Dates. *Radiocarbon* 51, 337–360. <https://doi.org/10.1017/S0033822200033865>
- Bronk Ramsey, C. – Pettitt, P. – Hedges, R. – Hodgins, G. – Owen, D. C. 2000: Radiocarbon dates from the Oxford AMS system: Archaeometry datelist 30. *Archaeometry* 42, 459–479. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4754.2000.tb00893.x>
- Brown, T. A. – Nelson, D. E. – Mathewes, R. W. – Vogel, J. S. – Southon, J. R. 1989: Radiocarbon Dating of Pollen by Accelerator Mass Spectrometry. *Quaternary Research* 32, 205–212.
- Bruhn, F. – Duhr, A. – Grootes, P. – Mintrop, A. – Nadeau, M. 2001: Chemical Removal of Conservation Substances by “Soxhlet”–Type Extraction. *Radiocarbon* 43, 229–237. <https://doi.org/10.1017/S0033822200038054>
- Brychova, V. – Roffet–Salque, M. – Pavlu, I. – Kyselka, J. – Kyjakova, P. – Filip, V. – Svetlik, I. – Evershed, R. P. 2021: Animal exploitation and pottery use during the early LBK phases of the Neolithic site of Bylany (Czech Republic) tracked through lipid residue analysis. *Quaternary International* 574, 91–101. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2020.10.045>
- Buck, C. E. – Juarez, M. 2017: Bayesian radiocarbon modelling for beginners (Version 1). arXiv. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.1704.07141>
- Bull, I. D. – Elhmmali, M. M. – Roberts, D. J. – Evershed, R. P. 2003: The application of steroidal biomarkers to track the abandonment of a Roman wastewater course at the Agora (Athens, Greece). *Archaeometry* 45, 149–161. <https://doi.org/10.1111/1475-4754.00101>
- Capuzzo, G. – Snoeck, C. – Boudin, M. – Dalle, S. – Annaert, R. et al. 2020: Cremation vs. Inhumation: modelling cultural changes in funerary practices from the mesolithic to the middle ages in Belgium using kernel density analysis on ¹⁴C data. *Radiocarbon* 62, 1809–1832. <https://doi.org/10.1017/RDC.2020.88>
- Cardon, D. 2007: Natural dyes: sources, tradition, technology and science. London: Archetype.
- Carter, V. A. – Bobek, P. – Moravcová, A. – Šolcová, A. – Chiverrell, R. C. et al. 2020: The role of climate–fuel feedbacks on Holocene biomass burning in upper–montane Carpathian forests. *Global and Planetary Change* 193, 103264. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2020.103264>
- Casanova, E. – Knowles, T. – Bayliss, A. – Dunne, J. – Barański, M. et al. 2020a: Accurate compound–specific ¹⁴C dating of archaeological pottery vessels. *Nature* 580, 506–510. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2178-z>
- Casanova, E. – Knowles, T. D. – Ford, C. – Cramp, L. J. – Sharples, N. – Evershed, R. P. 2020b: Compound–specific radiocarbon, stable carbon isotope and biomarker analysis of mixed marine/terrestrial lipids preserved in archaeological pottery vessels. *Radiocarbon* 62, 1679–1697. <https://doi.org/10.1017/RDC.2020.11>
- Casanova, E. – Knowles, T. – Williams, C. – Crump, M. – Evershed, R. 2017: Use of a 700 MHz NMR micro-cryoprobe for the identification and quantification of exogenous carbon in compounds purified by preparative capillary gas chromatography for radiocarbon determinations. *Analytical Chemistry* 89, 7090–7098. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.7b00987>
- Casanova, E. – Knowles, T. D. J. – Williams, C. – Crump, M. P. – Evershed, R. P. 2018: Practical considerations in high–precision compound–specific radiocarbon analyses: Eliminating the effects of solvent and sample cross–contamination on accuracy and precision. *Analytical Chemistry* 90, 11025–11032. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.8b02713>
- Cook, A. C. – Southon, J. R. – Wadsworth, J. 2003: Using radiocarbon dating to establish the age of iron–based artifacts. *The Journal of The Minerals, Metals and Materials Society* 55, 15–22. <https://doi.org/10.1007/s11837-003-0239-z>
- Corr, L. T. – Richards, M. P. – Jim, S. – Ambrose, S. H. – Mackie, A. – Beattie, O. – Evershed, R. P. 2008: Probing dietary change of the Kwāday Dān Ts’inchj individual, an ancient glacier body from British Columbia: I. Complementary use of marine lipid biomarker and carbon isotope signatures as novel indicators of a marine diet. *Journal of Archaeological Science* 35, 2102–2110. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2008.06.027>

- Craddock, P. T. – Wayman, M. L. – Jull, A. J. T. 2002: The Radiocarbon Dating and Authentication of Iron Artifacts. *Radiocarbon* 44, 717–732. <https://doi.org/10.1017/S0033822200032173>
- Cresswell, R. G. 1992: Radiocarbon dating of iron artifacts. *Radiocarbon* 34, 898–905. <https://doi.org/10.1017/S0033822200064225>
- Davis, J. T. – Sparks, D. 1971: Assimilation of $^{14}\text{CO}_2$ by Catkins of *Carya illinoensis* and Apparent Translocation to the Pollen. *American Journal of Botany* 58, 932–938.
- De La Fuente, C. – Flores, S. – Moraga, M. 2013: DNA from human ancient bacteria: a novel source of genetic evidence from archaeological dental calculus. *Archaeometry* 55, 767–778. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4754.2012.00707.x>
- Deviese, T. – Comeskey, D. – McCullagh, J. – Bronk Ramsey, C. – Higham, T. 2018: New protocol for compound-specific radiocarbon analysis of archaeological bones. *Rapid Communications in Mass Spectrometry* 32, 373–379. <https://doi.org/10.1002/rcm.8047>
- Dobney, K. – Brothwell, D. 1987: A method for evaluating the amount of dental calculus on teeth from archaeological sites. *Journal of Archaeological Science* 14, 343–351. [https://doi.org/10.1016/0305-4403\(87\)90024-0](https://doi.org/10.1016/0305-4403(87)90024-0)
- Eglinton, T. I. – Aluwihare, L. I. – Bauer, J. E. – Druffel, E. R. M. – McNichol, A. P. 1996: Gas chromatographic isolation of individual compounds from complex matrices for radiocarbon dating. *Analytical Chemistry* 68, 904–912. <https://doi.org/10.1021/ac9508513>
- Eglinton, T. I. – Benitez-Nelson, B. C. – Pearson, A. – McNichol, A. P. – Bauer, J. E. – Druffel, E. R. 1997: Variability in radiocarbon ages of individual organic compounds from marine sediments. *Science* 277, 796–799. <https://doi.org/10.1126/science.277.5327.796>
- Evershed, R. P. 2008: Organic residue analysis in archaeology: The archaeological biomarker revolution. *Archaeometry* 50, 895–924. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4754.2008.00446.x>
- Fernandes, R. – Bergemann, S. – Hartz, S. – Grootes, P. M. – Nadeau, M. – Melzner, F. – Rakowski, A. – Hüls, H. 2012: Mussels with Meat: Bivalve Tissue–Shell Radiocarbon Age Differences and Archaeological Implications. *Radiocarbon* 54, 953–965. <https://doi.org/10.1017/S0033822200047597>
- Fernandes, R. – Rinne, C. – Nadeau, M. – Grootes, P. M. 2014: Towards the use of radiocarbon as a dietary proxy: Establishing a first wide-ranging radiocarbon reservoir effects baseline for Germany. *Environmental Archaeology*, 21, 285–294. <https://doi.org/10.1179/1749631414Y.0000000034>
- Fletcher, W. J. – Zielhofer, C. – Mischke, S. – Bryant, C. – Xu, X. – Fink, D. 2017: AMS radiocarbon dating of pollen concentrates in a karstic lake system. *Quaternary Geochronology* 39, 112–123. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2017.02.006>
- Folch, J. – Lees, M. – Sloane Stanley, G. H. 1957: A simple method for the isolation and purification of total lipids from animal tissues. *Journal of biological Chemistry* 226, 497–509.
- Fülöp, R. H. – Heinze, S. – John, S. – Rethemeyer, J. 2013: Ultrafiltration of bone samples is neither the problem nor the solution. *Radiocarbon* 55, 491–500. <https://doi.org/10.1017/S0033822200057623>
- Gassmann, G. – Schäfer, A. 2018: Doubting radiocarbon dating from in-slag charcoal: five thousand years of iron production at Wetzlar–Dalheim?. *Archeologické rozhledy* 70, 309–327. <https://doi.org/10.35686/AR.2018.14>
- Gauthier, M. 2022: Using Radiocarbon Ages on Organics Affected by Freshwater – A Geologic and Archaeologic Update on the Freshwater Reservoir Ages and Freshwater Diet Effect in Manitoba, Canada. *Radiocarbon* 64, 253–264. <https://doi.org/10.1017/RDC.2022.30>
- Gupta, S. K. – Polach, H. A. 1985: Radiocarbon dating practises at ANU. Canberra: Australian National University.
- Haas, M. – Bliedner, M. – Borodynkin, I. – Salazar, G. – Szidat, S. – Eglinton, T. I. – Zech, R. 2017: Radiocarbon dating of leaf waxes in the loess–paleosol sequence kurtak, central siberia. *Radiocarbon* 59, 165–176. <https://doi.org/10.1017/RDC.2017.1>
- Hajdas, I. – Michczynski, A. – Bonani, G. – Wacker, L. – Furrer, H. 2009: Dating bones near the limit of the radiocarbon dating method: study case mammoth from Niederweningen, Zh Switzerland. *Radiocarbon* 51, 675–680. <https://doi.org/10.1017/S0033822200056010>
- Hardy, K. – Blakeney, T. – Copeland, L. – Kirkham, J. – Wrangham, R. – Collins, M. 2009: Starch granules, dental calculus and new perspectives on ancient diet. *Journal of Archaeological Science* 36, 248–255. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2008.09.015>
- Harkins, K. M. – Stone, A. C. 2015: Ancient pathogen genomics: insights into timing and adaptation. *Journal of Human Evolution* 79, 137–149. <https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2014.11.002>

- Heaton, T. J. – Köhler, P. – Butzin, M. – Bard, E. – Reimer, R. W. et al. 2020: MARINE20 – the marine radiocarbon age calibration curve (0–55,000 cal BP). *Radiocarbon* 62, 779–820. <https://doi.org/10.1017/RDC.2020.68>
- Henry, A. G. – Brooks, A. S. – Piperno, D. R. 2011: Microfossils in calculus demonstrate consumption of plants and cooked foods in Neanderthal diets (Shanidar III, Iraq; Spy I and II, Belgium). *PNAS* 108, 486–491. <https://doi.org/10.1073/pnas.1016868108>
- Higham, T. – Ramsey, C. B. – Karavanic, I. – Smith, F. H. – Trinkaus, E. 2006: Revised direct radiocarbon dating of the Vindija G1 Upper Paleolithic Neandertals. *PNAS* 103, 553–557. <https://doi.org/10.1073/pnas.0510005103>
- Hillson, S. W. 1996: *Dental Anthropology*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Hodson, J. 2018: Phytoliths in archaeology: chemical aspects. In: C. Smith (ed.), *Encyclopedia of Global Archaeology*. Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51726-1_3250-1
- Hodson, M. J. 2019: The relative importance of cell wall and lumen phytoliths in carbon sequestration in soil: a hypothesis. *Frontiers in Earth Science* 7, 167. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00167>
- Hofreiter, M. – Snieberger, J. – Pospíšek, M. – Vanek, D. 2021: Progress in forensic bone DNA analysis: Lessons learned from ancient DNA. *Forensic Science International: Genetics* 54, 102538. <https://doi.org/10.1016/j.fsigen.2021.102538>
- Hopkins, R. J. A. – Hajdinjak, M. – Šefčáková, A. – Comeskey, D. – Deviese, T. – Higham, T. F. G. 2022: Single amino acid radiocarbon dating of two Neanderthals found at Šaľa (Slovakia). *Radiocarbon* 64, 87–100. <https://doi.org/10.1017/RDC.2021.113>
- Hua, Q. – Turnbull, J. C. – Santos, G. M. – Rakowski, A. Z. – Ancapichún, S. – De Pol-Holz, R. – Hammer, S. – Lehman, S. – Levin, I. – Biller, J. B. 2021: Atmospheric radiocarbon for the period 1950–2019. *Radiocarbon* 64, 723–745. <https://doi.org/10.1017/RDC.2021.95>
- Hüls, C. M. – Petri, I. – Föll, H. 2019: Absolute Dating of Early Iron Objects from the Ancient Orient: Radiocarbon Dating of Luristan Iron Mask Swords. *Radiocarbon* 61, 1229–1238. <https://doi.org/10.1017/RDC.2019.13>
- Hüls, C. M. – Erlenkeuser, H. – Nadeau, M. J. – Grootes, P. M. – Andersen, N. 2010: Experimental Study on the Origin of Cremated Bone Apatite Carbon. *Radiocarbon* 52, 587–599. <https://doi.org/10.1017/S0033822200045628>
- Hüls, C. M. – Grootes, P. M. – Nadeau, M.-J. – Bruhn, F. – Hasselberg, P. – Erlenkeuser, H. 2004: AMS radiocarbon dating of iron artefacts. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 223, 709–715. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2004.04.132>
- Ingalls, A. E. – Pearson, A. 2005: Compound-specific radiocarbon analysis. *Oceanography* 18, 19–31.
- Jim, S. – Ambrose, S. H. – Evershed, R. P. 2004: Stable carbon isotopic evidence for differences in the dietary origin of bone cholesterol, collagen and apatite: implications for their use in palaeodietary reconstruction. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 68, 61–72. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(03\)00216-3](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(03)00216-3)
- Jin, Y. – Yip, H. K. 2002: Supragingival calculus: formation and control. *Critical Reviews in Oral Biology and Medicine* 13, 426–441. <https://doi.org/10.1177/154411130201300506>
- Kilian, M. R. – van der Plicht, J. – van Geel, B. – Goslar, T. 2002: Problematic ¹⁴C–AMS dates of pollen concentrates from Lake Gosiaz (Poland). *Quaternary International* 88, 21–26. [https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(01\)00070-2](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(01)00070-2)
- King, C. L. – Bentley, R. A. – Tayles, N. – Vidarsdóttir, U. S. – Nowell, G. – Macpherson, C. G. 2013: Moving peoples, changing diets: isotopic differences highlight migration and subsistence changes in the Upper Mun River Valley, Thailand. *Journal of Archaeological Science* 40, 1681–1688. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2012.11.013>
- Kučera, J. – Maxeiner, S. – Muller, A. – Němec, M. – John, J. et al. 2022: A new AMS facility MILEA at the Nuclear Physics Institute in Řež, Czech Republic. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 527, 29–33. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2022.07.012>
- Kyselý, R. – Čuláková, K. – Pecinová, M. – Šíroky, P. 2016: European Pond Turtles from Obříví (Bohemia, Czech Republic). *International Journal of Osteoarchaeology* 26, 732–739. <https://doi.org/10.1002/oa.2466>
- Libby, W. F. – Anderson, E. C. – Arnold, J. R. 1949: Age Determination by Radiocarbon Content: World-Wide Assay of Natural Radiocarbon. *Science* 109, 227–228.
- Lieverse, A. R. 1999: Diet and the Aetiology of Dental Calculus. *International Journal of Osteoarchaeology* 9, 219–232. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1212\(199907/08\)9:4<219::AID-OA475>3.0.CO;2-V](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1212(199907/08)9:4<219::AID-OA475>3.0.CO;2-V)

- Limburgský, P. – Řídký, J. – Šumberová, R. – Končelová, M. 2018: Radiocarbon dating in action. In: J. Řídký – P. Květina – P. Limburgský – M. Končelová – P. Burgert – R. Šumberová, Big men or chiefs? Rondel builders of Neolithic Europe. Oxford – Philadelphia: Oxbow Books, 103–135.
- Mandel, I. D. 1990: Calculus formation and prevention: an overview. *Compendium for Continuing Education in Dentistry, Supplemental 8*, 235–241.
- Marom, A. – McCullagh, J. S. – Higham, T. F. – Sinitysyn, A. A. – Hedges, R. E. 2012: Single amino acid radiocarbon dating of Upper Paleolithic modern humans. *PNAS* 109, 6878–6881. <https://doi.org/10.1073/pnas.1116328109>
- McCullagh, J. S. O. – Marom, A. – Hedges, R. E. M. 2010: Radiocarbon dating of individual amino acids from archaeological bone collagen. *Radiocarbon* 52, 620–634. <https://doi.org/10.1017/S0033822200045653>
- Meadows, J. – Lübke, H. – Zagorska, I. – Berziņš, V. – Ceriņa, A. – Ozola, I. 2014: Potential Freshwater Reservoir Effects in a Neolithic Shell Midden at Rīņņkalns, Latvia. *Radiocarbon* 56, 823–832. <https://doi.org/10.2458/56.16950>
- Middleton, W. D. – Rovner, I. 1994: Extraction of opal phytoliths from herbivore dental calculus. *Journal of Archaeological Science* 21, 469–473. <https://doi.org/10.1006/jasc.1994.1046>
- Michalska Nawrocka, D. – Michczyńska, D. J. – Pazdur, A. – Czernik, J. 2007: Radiocarbon chronology of the ancient settlement in the Golan heights area, Israel. *Radiocarbon* 49, 625–637. <https://doi.org/10.1017/S0033822200042521>
- Mollenhauer, G. – Rethemeyer, J. 2009: Compound-specific radiocarbon analysis—analytical challenges and applications. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 5, 12006. <https://doi.org/10.1088/1755-1307/5/1/012006>
- Neulieb, T. – Levac, E. – Southon, J. – Lewis, M. – Pendea, I. F. – Chmura, G. L. 2013: Potential Pitfalls of Pollen Dating. *Radiocarbon* 55, 1142–1155. <https://doi.org/10.1017/S0033822200048050>
- Newnham, R. M. – Vandergoes, M. J. – Garnett, M. H. – Lowe, D. J. – Prior, C. – Almond, P. C. 2007: Test of AMS ¹⁴C dating of pollen concentrates using tephrochronology. *Journal of Quaternary Science* 22, 37–51. <https://doi.org/10.1002/jqs.1016>
- Oinonen, M. – Haggren, G. – Kaskela, A. – Lavento, M. – Palonen, V. – Tikkanen, P. 2009: Radiocarbon Dating of Iron: A Northern Contribution. *Radiocarbon* 51, 873–881. <https://doi.org/10.1017/S0033822200056186>
- Olsen, J. – Heinemeier, J. – Bennike, P. – Krause, C. – Hornstrup, K. M. – Thrane, H. 2008: Characterisation and blind testing of radiocarbon dating of cremated bone. *Journal of Archaeological Science* 35, 791–800. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2007.06.011>
- Olsen, J. – Heinemeier, J. – Hornstrup, K. M. – Bennike, P. – Thrane, H. 2013: ‘Old wood’ effect in radiocarbon dating of prehistoric cremated bones?. *Journal of Archaeological Science* 40, 30–34. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2012.05.034>
- Olsen, J. – Heinemeier, J. – Lübke, H. – Lüth, F. – Terberger, T. 2010: Dietary habits and freshwater reservoir effects in bones from a Neolithic Northern German cemetery. *Radiocarbon* 52, 635–644. <https://doi.org/10.1017/S0033822200045665>
- Ozga, A. T. – Ottoni, C. 2023: Dental calculus as a proxy for animal microbiomes. *Quaternary International* 653/654, 47–52. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2021.06.012>
- Pachnerová Brabcová, K. – Krofta, T. – Valášek, V. – Suchý, V. – Kundrát, P. et al. 2022a: Radiocarbon dating charcoals from historical mortars from Týřov and Pyšolec castles. *Radiation Protection Dosimetry* 198, 681–686. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncac119>
- Pachnerová Brabcová, K. – Kundrát, P. – Petrová, M. – Krofta, T. – Suchý, V. et al. 2022b: Charcoals as indicators of historical mortar age of medieval Czech castle Pyšolec. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 528, 8–14. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2022.07.015>
- Pancost, R. D. – van Geel, B. – Baas, M. – Damsté, J. S. S. 2000: $\delta^{14}\text{C}$ values and radiocarbon dates of microbial biomarkers as tracers for carbon recycling in peat deposits. *Geology* 28, 663–666. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2000\)28<663:CVARDO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2000)28<663:CVARDO>2.0.CO;2)
- Philippsen, B. 2013: The freshwater reservoir effect in radiocarbon dating. *Heritage Science* 1, 1–19. <https://doi.org/10.1186/2050-7445-1-24>
- Piotrowska, N. – Goslar, T. 2002: Preparation of bone samples in the Gliwice radiocarbon laboratory for AMS radiocarbon dating. *Izotopes in Environmental and Health Studies* 38, 267–275. <https://doi.org/10.1080/10256010208033272>
- Piperno, D. R. – Stothert, K. E. 2003: Phytolith evidence for early Holocene Cucurbita domestication in southwest Ecuador. *Science* 299, 1054–1057. <https://doi.org/10.1126/science.1080365>

- Piperno, D. R. 2006: Phytoliths: a comprehensive guide for archaeologists and paleoecologists. Rowman: Altamira.
- Piperno, D. R. 2016: Phytolith radiocarbon dating in archaeological and paleoecological research: a case study of phytoliths from modern Neotropical plants and a review of the previous dating evidence. *Journal of Archaeological Science*, 68, 54–61. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2015.06.002>
- Poulson, S. R. – Kuzminsky, S. C. – Scott, G. R. – Standen, V. G. – Arriaza, B. – Munoz, I. – Dorio, L. 2013: Paleodiet in northern Chile through the Holocene: extremely heavy $\delta^{15}\text{N}$ values in dental calculus suggest a guano-derived signature?. *Journal of Archaeological Science* 40, 4579–4585. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2013.07.009>
- Reimer, P. – Austin, W. – Bard, E. – Bayliss, A. – Blackwell, P. et al. 2020: The IntCal20 Northern Hemisphere Radiocarbon Age Calibration Curve (0–55 cal kBP). *Radiocarbon* 62, 725–757. <https://doi.org/10.1017/RDC.2020.41>
- Roffet-Salque, M. – Dunne, J. – Altoft, T. D. – Casanova, E. – Cramp, J. E. L. – Smyth, J. – Whelton, H. – Evershed, R. P. 2017: From the inside out: Upscaling organic residue analyses of archaeological ceramics. *Journal of Archaeological Science: Reports* 16, 627–640. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2016.04.005>
- Rose, H. A. – Meadows, J. – Palstra, S. W. L. – Hamann, C. – Boudin, M. – Huels, M. 2019: Radiocarbon Dating Cremated Bone: A Case Study Comparing Laboratory Methods. *Radiocarbon* 61, 1581–1591. <https://doi.org/10.1017/RDC.2019.70>
- Rutgers, L. V. – De Jong, A. F. M. – van der Borg, K. 2002: Radiocarbon dates from the Jewish catacombs of Rome. *Radiocarbon* 44, 541–547. <https://doi.org/10.1017/S0033822200031891>
- Řídký, J. – Květina, P. – Limburský, P. – Končelová, M. – Burgert, P. – Šumberová, R. 2018: Big men or chiefs? Rondel builders of Neolithic Europe. Oxford: Oxbow Books.
- Santos, G. M. – Alexandre, A. – Southon, J. R. – Treseder, K. K. – Corbinau, R. – Reyerson, P. E. 2012: Possible source of ancient carbon in phytolith concentrates from harvested grasses. *Biogeosciences* 9, 1873–1884. <https://doi.org/10.5194/bg-9-1873-2012>
- Santos, G. M. – Masion, A. – Alexandre, A. 2018: When the carbon being dated is not what you think it is: Insights from phytolith carbon research. *Quaternary Science Reviews* 197, 162–174. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2018.08.007>
- Sarnthein, M. – Küssner, K. – Grootes, P. M. – Ausin, B. – Eglinton, T. et al. 2020: Plateaus and jumps in the atmospheric radiocarbon record–potential origin and value as global age markers for glacial-to-deglacial paleoceanography, a synthesis. *Climate of the Past* 16, 2547–2571. <https://doi.org/10.5194/cp-16-2547-2020>
- Shiroukhov, R. 2019: AMS ^{14}C Dating of the Cremated Human Bones and Funeral Fuel of the Western Balts. In *Theory and in Practice*. *Archaeologia Lituana* 20, 40–74. <https://doi.org/10.15388/ArchLit.2019.20.3>
- Stafford Jr. – T. W. – Hare, P. E. – Currie, L. A. – Jull, A. J. T. – Donahue, D. 1991: Accelerator radiocarbon dating at the molecular level. *Journal of Archaeological Science* 18, 35–72. [https://doi.org/10.1016/0305-4403\(91\)90078-4](https://doi.org/10.1016/0305-4403(91)90078-4)
- Stott, A. W. – Berstan, R. – Evershed, R. P. – Bronk Ramsey, C. – Hedges, R. E. – Humm, M. J. 2003: Direct dating of archaeological pottery by compound-specific ^{14}C analysis of preserved lipids. *Analytical Chemistry* 75, 5037–5045. <https://doi.org/10.1021/ac020743y>
- Strömberg, C. A. – Dunn, R. E. – Criffo, C. – Harris, E. B. 2018: Phytoliths in paleoecology: analytical considerations, current use, and future directions. In: D. Croft – D. Su – S. Simpson (eds.), *Methods in Paleocology. Vertebrate Paleobiology and Paleoanthropology*. Cham: Springer, 235–287. https://doi.org/10.1007/978-3-319-94265-0_12
- Stuiver, M. – Polach, H. A. 1977: Reporting of ^{14}C data. *Radiocarbon* 19, 355–363. <https://doi.org/10.1017/S0033822200003672>
- Světlík, I. – Dreslerová, D. – Limburský, P. – Tomášková, L. 2007: Radiouhlík v přírodě a jeho využití pro datovací účely. *Archeologické rozhledy* 59, 80–94.
- Světlík, I. – Jull, A. J. T. – Molnár, M. – Povinec, P. P. – Kolář, T. – Demján, P. – Pachnerova Brabcova, K. – Brychova, V. – Dreslerová, D. – Rybníček, M. – Simek, P. 2019: The best possible time resolution: How precise could a Radiocarbon dating method be?. *Radiocarbon* 61, 1729–1740. <https://doi.org/10.1017/rdc.2019.134>
- Tennant, R. K. – Jones, R. T. – Brock, F. – Cook, C. – Turney, C. S. M. – Love, J. – Lee, R. 2013: A new flow cytometry method enabling rapid purification of fossil pollen from terrestrial sediments for AMS radiocarbon dating. *Journal of Quaternary Science* 28, 229–236. <https://doi.org/10.1002/jqs.2606>

- Thornton, M. D. – Moran, E. D. – Celoria, F. 1970: The composition of bog butter. *Science and Archaeology* 2/3, 20–25.
- Tchapla, A. – Mejanelle, P. – Bleton, J. – Goursaud, S. 2004: Characterisation of embalming materials of a mummy of the Ptolemaic era. Comparison with balms from mummies of different areas. *Journal of Separation Science* 27, 217–234. <https://doi.org/10.1002/jssc.200301607>
- Tkáč, P. – Kolář, J. 2021: Towards New Demography Proxies and Regional Chronologies: Radiocarbon Dates from Archaeological Contexts Located in the Czech Republic Covering the Period Between 10,000 BC and AD 1250. *Journal of Open Archaeology Data* 9, 1–14. <http://doi.org/10.5334/joad.85>
- Tripp, J. A. – McCullagh, J. S. O. – Hedges, R. E. M. 2006: Preparative separation of underivatized amino acids for compound-specific stable isotope analysis and radiocarbon dating of hydrolyzed bone collagen. *Journal of Separation Science* 29, 41–48. <https://doi.org/10.1002/jssc.200500247>
- Tunno, I. – Zimmerman, S. R. H. – Brown, T. A. – Hassel, C. A. 2021: An Improved Method for Extracting, Sorting, and AMS Dating of Pollen Concentrates From Lake Sediment. *Frontiers in Ecology and Evolution* 9, 1–16. <https://doi.org/10.3389/fevo.2021.668676>
- Urbanová, P. – Boaretto, E. – Artioli, G. 2020: The state-of-the-art of dating techniques applied to ancient mortars and binders: A review. *Radiocarbon* 62, 503–525. <https://doi.org/10.1017/RDC.2020.43>
- van Klinken, G. J. – Bowles, A. D. – Hedges, R. E. M. 1994: Radiocarbon dating of peptides isolated from contaminated fossil bone collagen by collagenase digestion and reversed-phase chromatography. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 58, 2543–2551. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(94\)90030-2](https://doi.org/10.1016/0016-7037(94)90030-2)
- Van Strydonck, M. 2016: Radiocarbon Dating of Cremated Bones: An Overview. In: G. Grupe – G. C. McGlynn (eds.), *Isotopic Landscapes in Bioarchaeology*, Berlin – Heidelberg: Springer, 69–89. https://doi.org/10.1007/978-3-662-48339-8_4
- Vandergoes, M. J. – Prior, C. A. 2003: AMS Dating of Pollen Concentrates—A Methodological Study of Late Quaternary Sediments from South Westland, New Zealand. *Radiocarbon* 45, 479–491. <https://doi.org/10.1017/S0033822200032823>
- Velíšek, J. – Hajšlová, J. 2009: *Chemie potravin* 1. 3. vyd. Tábor: OSSIS.
- Vondrovský, V. – Demján, P. – Dreslerová, D. 2023: Arch14CZ – Czech Archaeological Radiocarbon Database. Dostupné z: <http://arch14.aiscr.cz/> [cit. 19-07-2023].
- Wacker, L. – Christl, M. – Synal H. 2010: Bats: A new tool for AMS data reduction. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 268, 976–979. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2009.10.078>
- Warinner, C. – Hendy, J. – Speller, C. – Cappellini, E. – Fischer, R. et al. 2014a: Direct evidence of milk consumption from ancient human dental calculus. *Scientific Reports* 4, 1–6. <https://doi.org/10.1038/srep07104>
- Warinner, Ch. – Rodrigues, J. F. M. – Vyas, R. – Trachsel, Ch. – Shved, N. – Grossmann, J. – Radini, A. – Hancock, Y. – Tito, R. Y. – Fiddyment, S. 2014b: Pathogens and host immunity in the ancient human oral cavity. *Nature Genetic* 46, 336–346. <https://doi.org/10.1038/ng.2906>
- Warinner, Ch. – Speller, C. – Collins, M. 2014c: A new era in palaeomicrobiology: prospects for ancient dental calculus as a long-term record of the human oral microbiome. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 370, 1–11. <https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0376>
- Wesolowski, V. – de Souza, S. M. F. M. – Reinhard, K. J. – Ceccantini, G. 2010: Evaluating microfossil content of dental calculus from Brazilian sambaquis. *Journal of Archaeological Science* 37, 1326–1338. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2009.12.037>
- Wolska, B. 2020: Applying isotope analyses of cremated human bones in archaeological research – a review. *Analecta Archaeologica Ressoviensia* 15, 7–16. <http://dx.doi.org/10.15584/anares.2020.15.1>
- Wood, R. 2015: From revolution to convention: the past, present and future of radiocarbon dating. *Journal of Archaeological Science* 56, 61–72. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2015.02.019>
- Yates, A. B. – Smith, A. M. – Bertuch, F. 2015: Residue radiocarbon AMS dating review and preliminary sampling protocol suggestions. *Journal of Archaeological Science* 61, 223–234. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2015.06.011>
- Yuan, S. – Wu, X. – Liu, K. – Guo, Z. – Cheng, X. – Pan, Y. – Wang, J. 2007: Removal of Contaminants from Oracle Bones During Sample Pretreatment. *Radiocarbon* 49, 211–216. <https://doi.org/10.1017/S0033822200042132>
- Zazzo, A. – Saliège, J. F. – Lebon, M. – Lepetz, S. – Moreau, C. – 2012: Radiocarbon Dating of Calcined Bones: Insights from Combustion Experiments Under Natural Conditions. *Radiocarbon* 54, 855–866. <https://doi.org/10.1017/S0033822200047500>
- Zazzo, A. – Saliège, J. F. – Person, A. – Boucher, H. 2009: Radiocarbon Dating of Calcined Bones: Where Does the Carbon Come from?. *Radiocarbon* 51, 601–611. <https://doi.org/10.1017/S0033822200047500>

- Zuo, X. – Lu, H. – Gu, Z. 2014: Distribution of soil phytolith–occluded carbon in the Chinese Loess Plateau and its implications for silica–carbon cycles. *Plant and Soil* 374, 223–232. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1850-6>
- Zuo, X. – Lu, H. – Jiang, L. – Zhang, J. – Yang, X. – Huan, X. – Wu, N. 2017: Dating rice remains through phytolith carbon–14 study reveals domestication at the beginning of the Holocene. *PNAS* 114, 6486–6491. <https://doi.org/10.1073/pnas.1704304114>

Capabilities and limits of radiocarbon dating with a focus on untypical archaeological samples

Radiocarbon dating is a basic method that helps to determine the absolute age of archaeological finds up to 55 000 years old. There are no established processes in the Czech research community that lead to an appreciation of the potential of radiocarbon dating while respecting its limitations. Thus, the presented review should help archaeologists to easily orient themselves in the rapidly developing issue and to improve their application of radiocarbon dating. The paper is focused on a critical evaluation of atypical archaeological samples that can be analysed using modern AMS systems (lipids, dental calculus, iron and slag, charred bones, pollen and phytolith concentrates).

Already when selecting samples for dating, it is important to keep in mind that ^{14}C activity represents a specific type of chronological information, which is expressed as a probability distribution, and to adapt the research question accordingly. In addition to typologically dated objects, there are also ^{14}C -dated samples whose only link to an archaeological situation is their record in an archaeological context. To reduce the potential for errors in identifying dating results with the site context, the following are used: ^{14}C dating in stratigraphy, repeated dating of the same context using multiple independent samples, and the selection of dated objects according to the classification of their relationship to the context (Bayliss *et al.* 2011).

Samples intended for radiocarbon dating must be treated differently from common archaeological material: after collection, they are left to dry on an aluminium or plastic mat or frozen; small and fragile samples are stored in solid plastic tubes. Bones with the least degradation should be preferred for dating. In the case of finds from museum depositories, samples should be free of labels, varnish, and glue residues, as these may be contaminated with extraneous carbon.

In nature, ^{14}C activity fluctuates, so calibration curves have been constructed based on other dating methods, which assign a calibrated age in the form of a probability distribution to the conventional radiocarbon age. In order to avoid loss of information, the analysis of the relationships between individual calibrated measurements (contemporaneity, overlap, etc.) should always be done with complete distributions and the reduction to intervals in calendar years should only be done in the final stage of data interpretation (see Světlík *et al.* 2019). The variation of atmospheric $^{14}\text{CO}_2$ activity causes that the course of the radiocarbon calibration curve is not linear but fluctuates and the resulting calibrated time intervals vary in duration from decades to centuries.

There are so-called reservoirs in nature that hold carbon sources and do not match the atmospheric carbon values. This effect causes a reduction in ^{14}C activity and leads to an apparent increase in sample age, e.g. due to the admixture of fossil carbon originating from carbonates dissolved in water or due to a slower $\text{CO}_2/^{14}\text{CO}_2$ exchange between the surface ocean layer and deep waters. The reservoir effect is highly variable geographically and can vary within a single water source, species, or biological age, and is transferable through the food chain.

The most common types of samples are bones, teeth, and charred materials of plant origin. Nevertheless, technological advances have enabled the dating of new types of archaeological samples, some of which are already successfully processed in laboratories (lipids, dental calculus, pollen concentrates, phytoliths) and others are in the testing stage (charred bones, slags, mortars).

Lipids are a broad group of chemicals of natural origin. The degradation products of fats, oils or waxes – fatty acids or fatty alcohols, but also resin residues – are most often mentioned in connection with archaeological objects (*Evershed 2008*). Lipids for dating are extracted from various types of archaeological samples including unglazed pottery, soil and sediments (*Bull et al. 2003*), human and animal remains (*Corr et al. 2008*), plant material (*Tchaplá et al. 2004*), or natural dyes and pigments (*Cardon 2007*).

Dental calculus is a mineralized bacterial coating formed primarily from plaque on the surface of teeth (*Jin – Yip 2002*) and is found in all known human populations (*Lieverse 1999*). Ethically, it is a class II biological material (*Henry et al. 2011; Poulson et al. 2013*) that can be removed for destructive analyses without damage to skeletal remains. Dental calculus is used to assess health, diet composition, environment, migration, endogenous DNA analysis, etc. Recently, its use for radiocarbon dating has also been revealed but it is still in the experimental phase (*Hofreiter et al. 2021*).

In cases when we need to date sedimentary records, pollen concentrates can be used. The carbon in the pollen cell walls is derived from atmospheric CO₂ and is at most a few years old (e.g. *Davis – Sparks 1971*). However, the influence of formation processes and possible sources of contamination must be considered when interpreting the results. An advantage of pollen concentrates is the ability to determine the source vegetation based on species spectrum analysis, so that, for example, contamination by aquatic plants can be excluded (*Fletcher et al. 2017*). Another option for dating sediments and soils is to date phytoliths, highly resistant microscopic particles of biogenic opal formed in the tissues of living plants (*Piperno 2006*). When comparing phytoliths with other dated organic materials, a perfect match cannot be expected, as phytoliths are dated across their entire spectrum, which comes from different plants and is thus averaged in space and time.

The acidic soil environment degrades organic skeletal remains and the only material that can be dated in regions with these soils comes from cremations. The radiocarbon dating of charred bones is considerably affected by the exchange of carbon between the bioapatite and the gas released from the fuel, which makes the dating of charred bones potentially equivalent to dating the wood used during cremation. Therefore, a potential risk in the dating of cremations is the old wood effect, which arises from the wood carbon significantly older than the burial.

The dating of historic iron objects and slags is also based on determining the age of the fuel used in the process. However, this assumption is only valid if wood and charcoal are used to produce the iron. The carbon in chemical combination with iron may come from sources of very different origin. When fossil fuels and geological carbonates (limestone and siderite), which have significantly lower ¹⁴C content, are used, the resulting ¹⁴C activity may appear to be thousands of years older. Iron recycling was common in the past, so the material may have been exposed to pyrotechnological processes repeatedly, making interpretation of the resulting ¹⁴C data difficult. The method is currently not widely used and only appears in the case of exceptional archaeological finds without context (*Hüls et al. 2019*) or when artefacts need to be authenticated (*Craddock et al. 2002*).

Direct dating of the carbonate mortar binder is problematic. The process of mortar formation involves the production of quicklime created by the thermal decomposition of limestone; after the lime is slaked, CO₂ is absorbed from the air and CaCO₃ is formed again. The decomposed and the newly-formed carbonate differ in isotopic composition and ¹⁴C activity since the geogenic limestone has already undergone a complete radioactive transformation, whereas the newly-formed limestone contains ¹⁴C, ¹³C and ¹⁸O originating from atmospheric CO₂ molecules at the time of reaction. Theoretically, the dating of the mortar binder corresponds to the time of its formation. The process described is influenced by many contradictory and often simultaneous factors that can affect the ¹⁴C activity, making the sample appear older or younger. Another possibility is to date the charcoals included in the mortars, which are likely to have come from the wood used in the lime firing, so there is a risk of the old wood effect.

Over the last 15 years, the radiocarbon dating method has undergone a technological transformation: the requirements for the amount of analysed material have been reduced and the whole process

has been accelerated. Some limitations remain but can be overcome by increasing the number and type of samples, ultrafiltration of proteins from collagen, dating of isolated amino acids from collagen, use of statistical methods, or stable isotope analyses. A persistent limitation of the method is the non-linear course of the calibration curve, where the resulting dating interval may be too wide, and the influence of reservoirs with non-atmospheric carbon sources. Other limitations are related to the genesis of samples derived from charred bones, slags, iron objects and mortars, as the results may not correspond to the dated event due to additional ^{14}C uptake. Current capabilities of the radiocarbon method allow the dating of previously rarely analysed sample types such as lipids preserved in the pores of pottery, dental calculus, phytoliths and pollen from sediments and soils. This broadens the range of possibilities for the application of radiocarbon dating as a basic tool for chronological anchoring of past natural and cultural processes and events.

JARMILA BÍŠKOVÁ, Ústav jaderné fyziky AV ČR, Hlavní 130, 250 68 Husinec, CZ-260 68 Řež, Czech Republic; Ústav archeologie a muzeologie, Filozofická fakulta, Masarykova univerzita, Czech Republic
jarmila.nedbalova@gmail.com

VERONIKA BRYCHOVÁ, Ústav jaderné fyziky AV ČR, Hlavní 130, 250 68 Husinec, CZ-260 68 Řež, Czech Republic
brychova@ujf.cas.cz

PETER DEMJÁN, Archeologický ústav AV ČR, Letenská 123/4, CZ-118 01 Praha, Czech Republic
demjan@arup.cas.cz

DAGMAR DRESLEROVÁ, Archeologický ústav AV ČR, Letenská 123/4, CZ-118 01 Praha, Czech Republic
dreslerova@arup.cas.cz

ALŽBĚTA FRANK DANIELISOVÁ, Archeologický ústav AV ČR, Letenská 123/4, CZ-118 01 Praha, Czech Republic
danielisova@arup.cas.cz

KRISTÝNA HOŠKOVÁ, Ústav jaderné fyziky AV ČR, Hlavní 130, 250 68 Husinec, CZ-260 68 Řež, Czech Republic; Přírodovědecká fakulta UK, Benátská 433/2, CZ-128 01 Praha, Czech Republic; hoskova@ujf.cas.cz

DAVID JOHN, Ústav jaderné fyziky AV ČR, Hlavní 130, 250 68 Husinec, CZ-260 68 Řež, Czech Republic
john@ujf.cas.cz

NIKOLA KOŠTOVÁ, Archeologický ústav AV ČR, Letenská 123/4, CZ-118 01 Praha, Czech Republic
kostova@arup.cas.cz

PETR LIMBURSKÝ, Archeologický ústav AV ČR, Letenská 123/4, CZ-118 01 Praha, Czech Republic
limbursky@arup.cas.cz

MIHÁLY MOLNÁR, Isotope Climatology and Environmental Research Centre, Institute for Nuclear Research, Bem tér 18/C, Debrecen, H-4026, Hungary; molnar.mihaly@atomki.mta.hu

ALICE MORAVCOVÁ, Archeologický ústav AV ČR, Letenská 123/4, CZ-118 01 Praha; Přírodovědecká fakulta UK, Benátská 433/2, CZ-128 01 Praha, Czech Republic; amoravcova@arup.cas.cz

KATEŘINA PACHNEROVÁ BRABCOVÁ, Ústav jaderné fyziky AV ČR, Hlavní 130, 250 68 Husinec, CZ-260 68 Řež, Czech Republic; brabcova@ujf.cas.cz

MARKÉTA PETROVÁ, Ústav jaderné fyziky AV ČR, Hlavní 130, 250 68 Husinec, CZ-260 68 Řež, Czech Republic
petrova@ujf.cas.cz

IVO SVĚTLÍK, Ústav jaderné fyziky AV ČR, Hlavní 130, 250 68 Husinec, CZ-260 68 Řež, Czech Republic
svetlik@ujf.cas.cz

JIŘÍ ŠNEBERGER, Ústav jaderné fyziky AV ČR, Hlavní 130, 250 68 Husinec, CZ-260 68 Řež; Archeologický ústav AV ČR, Letenská 123/4, CZ-118 01 Praha, Czech Republic; Katedra genetiky a mikrobiologie, Přírodovědecká fakulta, Karlova Univerzita, Viničná 5, Praha 2, CZ-12843, Czech Republic; Západočeské muzeum v Plzni, Kopeckého sady 2, 301 00 Plzeň, Czech Republic; sneberger@ujf.cas.cz

JOSEF TECL, Ústav jaderné fyziky AV ČR, Hlavní 130, 250 68 Husinec, CZ-260 68 Řež, Czech Republic
tecl@ujf.cas.cz

VOJTĚCH VALÁŠEK, Ústav jaderné fyziky AV ČR, Hlavní 130, 250 68 Husinec, CZ-260 68 Řež, Czech Republic; Přírodovědecká fakulta UK, Benátská 433/2, CZ-128 01 Praha, Czech Republic; valasek@ujf.cas.cz