

RADIOUHLÍKOVÉ DATOVÁNÍ

RADIOCARBON DATING

MIRIAM NÝVLTOVÁ FIŠÁKOVÁ

Abstract

The cosmogenic radionuclide ^{14}C is created in the atmosphere as the result of nuclear reactions generated by cosmic radiation. It is then oxidised in the atmosphere to take on the chemical form $^{14}\text{CO}_2$, which has physical and chemical properties similar to conventional carbon dioxide. First of all, $^{14}\text{CO}_2$ is formed in plant tissue through photosynthesis; then, as part of the food chain, ^{14}C enters the bodies of herbivores and subsequently carnivores. When an animal dies, it ceases to absorb ^{14}C from the surrounding environment and ^{14}C activity in the corresponding sample gradually decreases due to radioactive decay. The half-life of ^{14}C is 5730 ± 40 years, which is why this radionuclide may be used to date samples containing organic carbon. ^{14}C may be determined by measuring its activity (using conventional methods) or using Accelerator Mass Spectrometry (AMS) to determine the ^{14}C content in a carbon isotopic mixture (now the predominant method). The resulting activities are referenced against the radiocarbon standard and expressed as conventional radiocarbon age in BP in accordance with the Stuiver-Polach convention (1977). As ^{14}C activity was not completely constant in the past, the resulting activities must be adjusted (calibrated) using a radiocarbon calibration curve. The INTCAL09 calibration curve is now available for terrestrial samples. For the purposes of creating these calibration curves, highly precise ^{14}C activities are allocated ages determined using other dating methods, such as dendrochronology (Stuiver et al. 1993; Reimer et al. 2009). Software such as OxCal, CALIB and CalPal may be used for the actual calibration process, and the result is generally expressed in years AD and BC, or in calibrated BP years (once again meaning prior to 1950; however, when results are expressed in this way it can often lead to confusion with the conventional radiocarbon age). Radiocarbon dating is now one of the most precise physical dating methods in archaeology, after dendrochronology.

Keywords

Radiocarbon dating – Radiocarbon plateau – Calibration

^{14}C je radioaktivní izotop uhlíku, který patří mezi radionuklidy vznikající působením kosmického záření (dále např. ^3He , ^{10}Be , ^{36}Cl , ^{39}Ar).

Uhlík má dva stabilní (^{12}C – 98,9 % a ^{13}C – 1,1 %) a jeden radioaktivní (^{14}C) izotop přeměňující se na ^{14}N emisí β záření. Radiouhlík vzniká zejména v atmosféře záchytem nízkoegetických neutronů na jádrech ^{14}N reakcí $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$. V atmosféře je oxidován na $^{14}\text{CO}_2$ a v důsledku proudění „téměř“ homogenně rozšířen. Obdobně jako běžný CO_2 je zachytáván rostlinami fotosyntézou a přechází dále potravním řetězcem do zvířat a člověka, viz obr 1. V rámci globálního cyklu uhlíku se z atmosféry dostává také do mořské i sladké vody, proto je zabudováván do vlastních těl také vodními organismy - Suess (1965). Poločas rozpadu (přeměny) izotopu ^{14}C je 5730 ± 40 let, pro výpočet konvenčního stáří se však dle Stuiver-Polachovy konvence používá tzv. „Libbyho“ poločas 5568 let (Stuiver-Polach 1977). Datovat lze materiály obsahující uhlík, které se v minulosti účastnily uhlíkového koloběhu, například: dřevo, rašelinu, organické jezerní sedimenty, karbonáty, zbytky rostlin, uhlíky, ulity měkkýšů, korály, CO_2 rozpuštěný ve vodě, kosti, papír, látky, kůže, pigmenty atd. V těchto vzorcích se datují takové chemické formy uhlíku, u kterých může být vyloučeno dodatečnou kontaminací „mladšími“ (a zpra-

vidla značně pohyblivými) formami uhlíku v průběhu depozice, například: kolagen, některé karbonáty, celulóza, lignin). Pomocí ^{14}C datujeme smrt daného organismu, tedy okamžik, kdy přestává do svého těla zabudovávat uhlík a aktivita ^{14}C začíná klesat následkem jeho radioaktivní přeměny (tj. ^{14}C se do organismu přestal doplňovat). Při odběru a skladování vzorků na datování proto musíme zamezit druhotnému ovlivnění (kontaminaci) mladším nebo starším organickým uhlíkem. Ke kontaminaci některými pohyblivými chemickými formami uhlíku může také docházet v důsledku přírodních procesů.

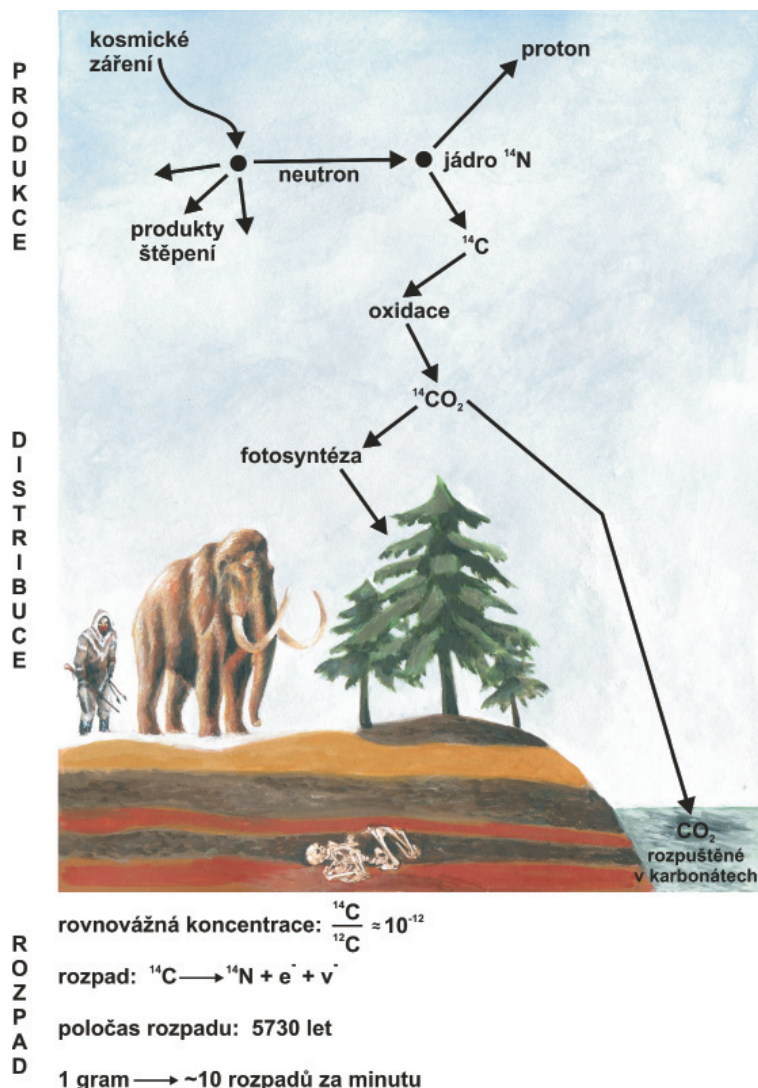
Datovat lze vzorky přibližně do osminásobku poločasu rozpadu, tedy ~ 45 tisíc let, v některých případech až do 60–65 tisíc let (Gomitz, 2009; Walker, 2005).

Metody datování

Konvenční metody radiouhlíkového datování

Tyto metody jsou založené na detekci β záření, odpovídajícího zbytkové úrovni aktivity ^{14}C v daném vzorku, tj. jde o počítání radioaktivních přeměn ^{14}C . To lze měřit dvěma základními metodami (Cook and van den Plicht, 2007):

- **kapalinově scintilační měření (LSC)** radiouhlíku převedeného do chemické formy benzenu (C_6H_6),



Obr. 1. Produkce, distribuce a rozpad přírodního izotopu ^{14}C .

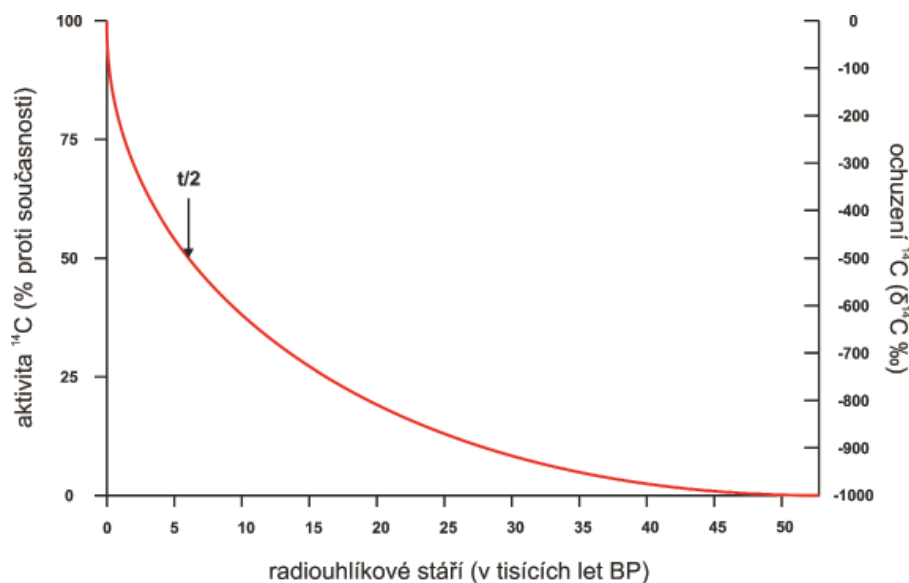
Fig. 1. Production, distribution and decay of natural ^{14}C .

V některých zemích dodnes používaná metoda (např.: Česko, Řecko, Ukrajina, Bulharsko, Albánie, Moldávie).

– **měření plynovým proporcionálním počítačem (GPC)** radiouhlíku převedeného do formy CO_2 nebo methanu (CH_4). Původní, dnes již málo používaná metoda.

– **hmotová spektrometrie pomocí urychlovače (AMS)**

Přímo počítá toky atomů jednotlivých izotopů uhlíku (^{12}C , ^{13}C a ^{14}C), tímto způsobem jsou stanovovány poměry jednotlivých izotopů uhlíku (Jull, 2007). Zásadní výhodou AMS je právě počítání atomů jednotlivých izotopů uhlíku včetně ^{14}C . Jelikož ^{14}C má poměrně dlouhý poločas (5730 let), za rozumně dosažitelnou dobu měření dojde k radioaktivní přeměně pouze malého množství přítomných atomů ^{14}C (např. za tři dny měření jde přibližně o jednu miliontinu z přítomných atomů ^{14}C). Naopak, při použití AMS spočítáme značnou část atomů ^{14}C přítomných ve vzorku. Z tohoto důvodu jsou postačující hmotnosti vzorků pro AMS nižší nejméně o tři řády. Oproti stanovení jiných nuklidů není však možné pro stanovení ^{14}C použít klasickou hmotnostní spektrometrii a je nutné využití speciálního typu



Obr. 2. Pokles aktivity ^{14}C následkem radioaktivní přeměny.

Fig. 2. ^{14}C activity decline due to radioactive decay.

urychlovače se spektrometrickou trasou (zejména: rušení všudypřítomným izobarickým ^{14}N a tvorba rušivých molekulových iontů).

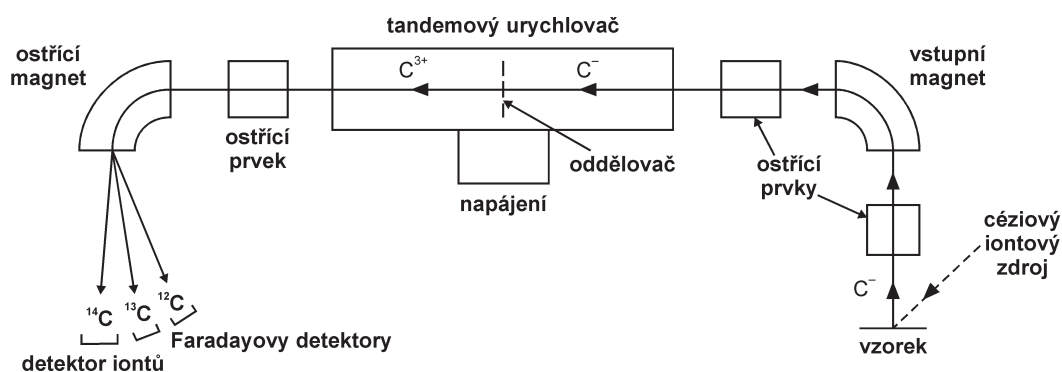
Kvalita měření a srovnání mezi jednotlivými radiokarbonovými laboratořemi

Pro výpočet aktivity ^{14}C jsou naměřené výsledky zpravidla vztahovány k měření referenčního standardu, zejména tzv. sekundární kyselině šťavelové (HOX II, NIST, SRM 4990C), která je metrologicky navázána na konvenční radiouhlíkový standard dle Stuiver-Polachovy konvence (1977). Každá radiouhlíková laboratoř by rovněž měla testovat celý analytický postup s využitím dostupných referenčních materiálů a opakovaných analýz již zpracovaných vzorků. Výsledky těchto kontrolních stanovení by rovněž měly být využívány k realistickému určování kombinovaných nejistot prováděných analýz (Curie 1995; Cook and van der Plicht 2007). Pokud některá laboratoř podhodnocuje z komerčních důvodů nejistotu aktivity ^{14}C , výsledky stanovení u vzorků s původem ve zjevně stejném období dávají zdánlivě statisticky významné rozdíly hodnot konvenčního radiouhlíkového stáří.

Pravidelně probíhají mezinárodní srovnávání vybraných radiokarbonových laboratoří (poslední „*Fifth international radiocarbon intercomparison*“ proběhlo v letech 2006–2007) – Scott et al. (2007). Toto srovnání spíše ukazuje na kvalitu laboratoří a ukazuje na nevýznamné rozdíly výsledků mezi konvenčními a AMS metodami.

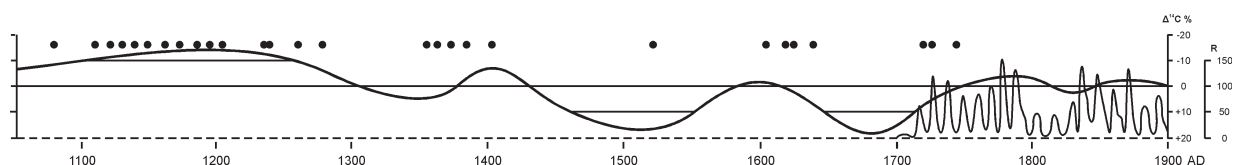
Výsledek měření

Výsledek stanovení je korigován na izotopickou frakcionaci ($\delta^{13}\text{C}$) daného vzorku (zastoupení ^{13}C ve vzorku je vztaženo k referenčnímu standardu PDB – tzv. Pee Dee Belemnite). Konvenční radiokarbonové stáří je vypočteno za použití původního Libbyho poločasu rozpadu ^{14}C (5568 let) ve vztahu k radiouhlíkovému standardu (tj. pomocí Libbyho poločasu je vypočtena doba, jak dlouho by musel být deponován radiouhlíkový standard, aby jeho finální aktivita právě odpovídala vzorku). Výsledek je uváděn jako konvenční radiouhlíkové stáří v letech, standardně udáváno jako roky BP (konvenčně se rozumí před rokem 1950 AD/CE/n.l.). Ačkoliv se v názvu vyskytuje slovo „stáří“, jde pouze o zvláštní formu vyjadřování aktivity ^{14}C , kterou lze dle konvence přepočítat na jiné formy, např. D^{14}C , pMC (které se však spíše používají pro vyjadřování aktivit ^{14}C u současných vzorků). Reálné stáří vzorku je s konvenčním radiouhlíkovým stářím v některých obdobích pouze ve velmi přibližné relaci. Udávaná \pm hodnota je kombinovanou nejistotou výsledku stanovení ^{14}C . Konvenční radiokarbonové stáří se musí udávat vždy, včetně kombinované nejistoty stanovení, i když budeme dále pracovat s daty kalibrovanými. Jelikož se kalibrační křivky a náhledy na jejich interpretaci mění a zpřesňují, konvenční radiouhlíkové stáří může být kdykoliv v budoucnu přepočteno podle jiné kalibrační křivky (Jull, 2007).



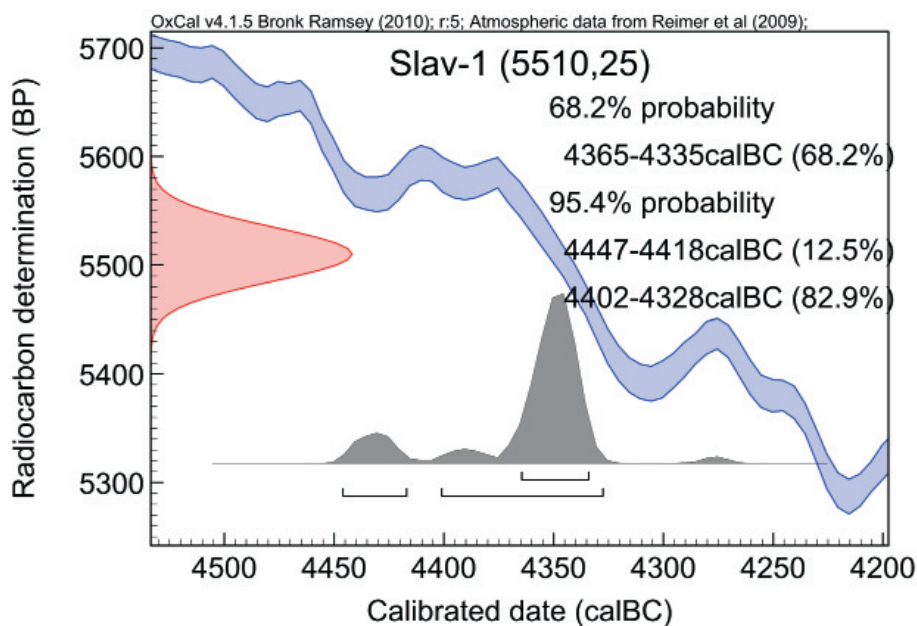
Obr. 3. Princip hmotové spektrometrie.

Fig. 3. Mass spectrometry principle.



Obr. 4. Vztah sluneční aktivity a aktivity ^{14}C v atmosféře v průběhu posledního tisíce let.

Fig. 4. Relationship of solar activity changes and ^{14}C atmospheric activity during the past thousand years.



Obr. 5. Ukázka kalibrační křivky IntCal09 a interpretace výsledku stanovení aktivity ^{14}C s použitím kalibračního programu OxCal. Jak je patrné pro nejistotu na úrovni dvě sigma, výsledek datování nám nabízí dva možné intervaly původu vzorku s přiřazenými absolutními pravděpodobnostmi 13,7% a 81,7% (v součtu právě 95,4%). Tudíž s pravděpodobností odpovídající doplňku do 100%, tj. 4,6% je vzorek původem mimo tyto intervaly, pravděpodobně však v přilehlém období, jak i vyplývá z šedě vyznačené křivky hustoty pravděpodobnosti přilehlé k vodorovné ose.

Fig. 5. The sample of the IntCal09 calibration curve and the interpretation of the determination of the ^{14}C activity using the OxCal calibration software. The calibration result provides two possible time intervals with absolute probabilities of 13.7% and 81.7% (giving 95.4% in total) for the 2σ uncertainty. Thus, with a probability corresponding to the remainder to 100% (i.e. 4.6%) the sample age lies outside of these time intervals, however probably in the adjacent intervals as results from the grey-marked curve of the probability density adjacent to the horizontal axis.

Interpretace výsledků stanovení aktivity ^{14}C (kalibrace)

Na začátku bylo uvažováno, že produkce ^{14}C je poměrně stálá v čase a v prostoru a že mezi jeho produkcí a rozpadem je tedy v přírodě dlouhodobá dynamická rovnováha odpovídající stabilní aktivitě. Avšak již v roce 1958 de Vries ukázal, že toto neplatí (Vries 1958). Tento problém se také projevil při studiu letokruhů, kdy se zjistilo, že stáří získaná jako konvenční radiouhlíková stáří neodpovídají stářím ročních přírůstků (Reimer et al., 2009; Stuiver and Suess H.E., 1966). Aktivita ^{14}C v atmosféře je totiž v čase nerovnoměrná a souvisí se změnami intenzity kosmického záření pronikajícího do atmosféry v důsledku kolísání geomagnetického pole a solární aktivity a s některými pozemskými procesy (především změny oceánského proudění a povrchové ventilace) – Kitawa and van den Plicht (1998). Z tohoto důvodu je nutná kalibrace konvenčního radiouhlíkového stáří!

Tzv. kalibrace je proces, kdy pomocí nezávislých datovacích metod provádíme převod konvenčního radiouhlíkového stáří (aktivity ^{14}C) a jeho nejistoty na stáří

reálné, tzv. kalendářní. Kalibrace konvenčních radiouhlíkových dat je nutná i z následujících důvodů:

- samotné používání původního „Libbyho“ poločasu přeměny vede k podhodnocení o $\sim 3\%$,
- u oceánských a mořských vzorků dochází ke snížení aktivity ^{14}C následkem tzv. zásobníkového efektu způsobeného poměrně dlouhou dobou zdržení radiouhlíku v tomto prostředí (v závislosti na proudění a stratifikaci vody může tato doba být v hlubších částech oceánů dokonce srovnatelná s poločasem přeměny ^{14}C),
- při tání ledovců a permafrostu se může do atmosféry uvolňovat CO_2 s výrazně nižší aktivitou ^{14}C , tento jev je dobře pozorovatelný v globálním měřítku na konci posledního glaciálu,
- v důsledku eroze karbonátových nebo organogenních hornin a jejich ukládání v jezerech a mořích se mění aktivita ^{14}C v sedimentech,
- vulkanická aktivita dodává do atmosféry zvýšené množství fosilního CO_2 ,

f) od průmyslové revoluce je pozorovatelný významný vliv člověka na aktivitu ^{14}C v atmosféře. Spalování fosilních paliv ředí obsah ^{14}C v uhlíkové izotopické směsi a aktivita se snižuje tzv. Suessův efekt (Suess 1955). Naopak následkem testů jaderných zbraní došlo k uvolnění značného množství ^{14}C do atmosféry, což na severní polokouli vedlo k navýšení aktivity ^{14}C na přibližně dvojnásobek hodnoty dané přirozenou kosmogenní produkcí tohoto radionuklidu (Meijer et al. 1995).

Metody kalibrace radiokarbonových dat

Dendrochronologická kalibrace – přímé srovnání letokruhů datovaných radiouhlíkovou metodou a jejich přesného stáří stanoveného dendrochronologicky. V dnešní době lze dendrochronologicky kalibrovat až po stáří 12594 cal. let BP podle nejdelší dendrochronologické řady (dubová a borovicová křivka z jižního Německa) - Reimer et al. (2004 a 2009).

Radiouhlíkové kalibrační křivky

INTCAL – International Calibration (od roku 1986) je kalibrační křivka vycházející především z dendrochronologického záznamu, pro období starší než kam dosahují dendrochronologické kalibrace využívá laminovaných sedimentů (mořských – pánev Cariaco a vrty v severním Atlantiku i přírodních jezerních – varvová chronologie) a srovnání aktivit ^{14}C ve vzorcích korálů a planktonních foraminifer s uran-thoriovým datováním. Postupně dochází k zpřesňování a prodlužování dosahu kalibračních křivek – INTCAL93 (12 ka cal. BP), INTCAL98 (24 ka cal. BP), INTCAL04 (26 ka cal. BP), INTCAL09 (50 ka cal. BP) - Reimer et al. (2004 a 2009). Kalibrační křivky Intcal by měly odpovídat průběhu aktivit ^{14}C ve vzduchu a suchozemské biotě. Kromě těchto globálních kalibrač-

ních křivek existují specifické kalibrační řady pro určitá prostředí či části Země:

Marine09 (dříve Marine04) – kalibrační křivka pro mořské vzorky, která zahrnuje opravu na rezervoárový efekt pro dané období v povrchových oceánských vodách (Hughen et al., 2004)

SHCal04 je křivka založená na dendrochronologii terestrického materiálu pouze z jižní polokoule, dosah 11 ka cal. BP (McCormac et al., 2004)

Fairbanks05 – pleistocénní data založená na U/Th datování korálů,

Fairbanks0107 – novější verze kalibrační křivky Fairbanks05 (Fairbanks et al., 2005).

CalPal-2007-Hulu je kalibrační křivka s programem pro posledních 60 ka. Pro pleistocénní stáří je založená na U/Th datování krasových sintrů z jeskyně Hulu v Číně, jejichž záznam je chronologicky synchronizován s křivkou $\delta^{18}\text{O}$ z ledovcového jádra NGRIP (van den Plicht, 1993).

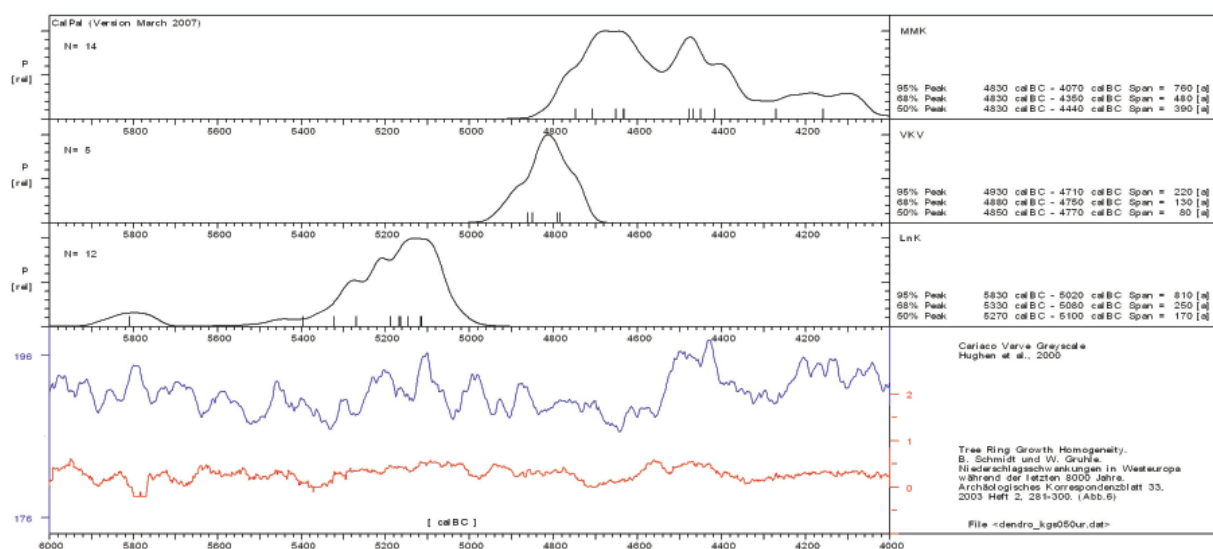
S využitím vhodné kalibrační křivky, výsledku stanovení aktivity ^{14}C a jeho kombinované nejistoty se pro vlastní výpočet intervalu (případně intervalů) kalibrovaného stáří vzorků nejčastěji používají tyto programy:

CALIB – oficiální program INTCAL komunity, verze 6 zahrnuje především datové sety INCAL09, Marine09, SHCal04 a některé další,

CalPal – program vhodný k porovnání výsledků s různými paleoklimatologickými záznamy,

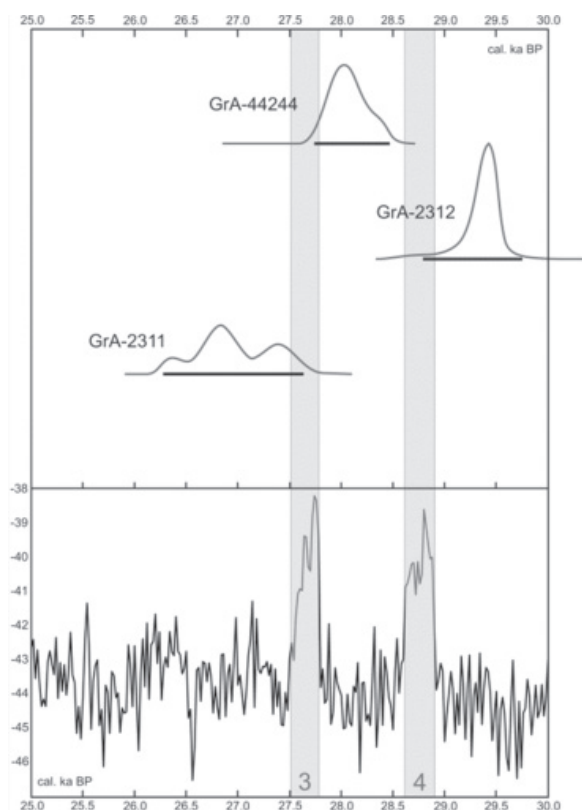
OxCal – program často používaný evropskými radiouhlíkovými laboratořemi, který využívá bayesiánský pravděpodobnostní přístup pro výpočet kalibrovaného stáří.

Protože radiokarbonové datování je výsledkem počítání radioaktivních přeměn nebo počtu atomů, lze obvykle výslednou nejistotu měření (a případně i celého stanovení) charakterizovat pomocí normálního (Gaussova) rozdělení. Průmětem výsledku stanovení a jeho kombi-



Obr. 6. Ukázka kalibrační křivky v CalPalu.

Fig. 6. The sample of the calibration curve in the CalPal software.



Obr. 7. Ukázka kalibrační křivky v programu Calib.
Fig. 7. The sample of the calibration curve in the Calib software.

nované nejistoty s přiřazeným rozdělením (zpravidla na úrovni 1 a 2 sigma, tj. 68% a 95% pravděpodobnosti) na křivku kalibrační a její nejistotu dostáváme křivku hustoty pravděpodobnosti původu vzorku v daném období. Průměty intervalů pro 1 a 2 sigma pak odpovídají korespondujícím intervalům kalibrovaného stáří pro zvolenou hladinu pravděpodobnosti. Jelikož kalibrační křivka obsahuje mnoho nepravidlostí, odpovídajících již diskutovanému kolísání aktivity ^{14}C v přírodě, výsledkem radiouhlíkového datování může být i několik intervalů kalibrovaného stáří. Na základě ploch vymezených na křivce hustoty pravděpodobnosti jsou pak jednotlivým intervalům přiřazovány míry pravděpodobnosti relativní (normalizované na jednotkovou plochu pro všechny vymezené intervaly). Absolutní pravděpodobnost je poté vypočtena násobením pravděpodobností odpovídající zvolenému intervalu nejistot stanovení koeficientem odpovídajícímu zvolenému intervalu nejistoty stanovení (obvykle pro 1 a 2 sigma odpovídajícímu 0,68 nebo 0,95). Zpravidla je vhodnější prezentovat výsledky odpovídající nejistotě stanovení 2σ , kde je 95% pravděpodobnost, že dané stáří do prezentovaného intervalu (intervalů) spadá (Walker, 2005).

Datování po roce 1950 AD

Pro účely například ekologických studií může být zajímavé datovat vzorky s původem po roce 1950. Následkem výbuchů jaderných zbraní došlo k výraznému navýšení aktivity ^{14}C v přírodě s maximem pozorovaným v roce 1963³. Po moratoriu na testy jaderných zbraní dochází k exponenciálnímu poklesu aktivity následkem přenosu $^{14}\text{CO}_2$ z atmosféry do dalších složek životního prostředí (oceánské vody, biota). V průběhu druhé poloviny let osmdesátých minulého století se průběh poklesu mění na lineární. Přibližně od roku 1992 se již na pozorovaném globálním meziročním poklesu aktivity nepodílí rozptýl bombového ^{14}C , nýbrž pouze ředění uhlíkové izotopické směsi CO_2 uvolňovaným do atmosféry následkem spalování fosilních paliv (tzv. globální Suessův efekt). Tento trend trvá dosud (začátek roku 2013), aktivita atmosférického $^{14}\text{CO}_2$ však dosud o několik procent převyšuje úroveň, která přibližně odpovídá přirozené kosmogenní produkci. Z tohoto důvodu jsou vzorky s původem po roce 1950 dobře identifikovatelné. Oproti předchozímu období je výsledný interval datování takových vzorků obvykle poměrně úzký a odpovídá dolním jednotkám let. **V případě vzorků odebraných v blízkosti významných zdrojů fosilního uhlíku (spalovny, konvenční elektrárny, města a obce, frekventované komunikace) však může docházet k lokálnímu ovlivnění výše zmiňovaným Suessovým efektem. V takových případech je zapotřebí stanovit korekci a adekvátním způsobem také navýšit kombinovanou nejistotu stanovení ^{14}C .**

CALIBomb – kalibrační program pro datování vzorků mladších než 1950 AD (<http://calib.qub.ac.uk/CALIBomb/frameset.html>)

Levin – fitace měsíčních průměrných aktivit troposférického $^{14}\text{CO}_2$ (1959– 2007 AD), vhodné pro střední zeměpisné šířky severní polokoule - Lewin and Kromer (2004)

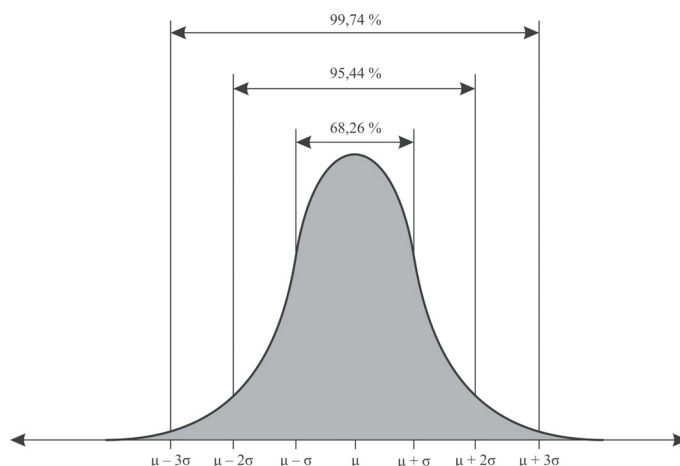
NH_zone1 – kompilace měsíčních průměrů troposférického $^{14}\text{CO}_2$ pro oblast s. od 40° s.š. (1955–2000 AD) - Levin, Hammer, Kromer and Meinhardt (2008)

Nepravidelnosti na kalibračních křivkách

- a) Radiouhlíková plata
 Časové změny aktivity atmosférického ^{14}C způsobují několik komplikací, mezi které patří tzv. radiouhlíková plata. Ta odpovídají pozvolnému poklesu aktivity ^{14}C v přírodě daného období, jehož rychlost přibližně odpovídá poklesu aktivity následkem radioaktivní přeměny. V důsledku tohoto jevu mají v současnosti všechny vzorky s původem v celém takovém časovém intervalu přibližně stejnou aktivitu (tj. starší vzorky z tohoto období měly původně aktivitu mírně vyšší, následkem radioaktivní přeměny však došlo v průběhu tohoto období k jejímu vyrovnání se vzorky mladšími), viz tabulka 1. Z tohoto důvodu nelze původ takového vzorku blíže vymežit v rámci „plata“ ani s použitím velmi přesných stanovení.

Obr. 8. Rozdělení výsledků kalibrace. Výsledek stanovení aktivity ^{14}C 5000 ± 50 BP (s nejistotou 1σ) neznámá, že se aktivita nachází v intervalu 4950 a 5050 lety BP. Ale znamená to, že existuje 68,3% pravděpodobnost (1σ), že se výsledek pohybuje v tomto intervalu. Zároveň ale platí, že je 31,7% pravděpodobnost, že aktivita v tomto intervalu neleží, jak je patrné z uvedené křivky normálního rozdělení. Obdobně pro nejistotu v intervalu 2σ , které odpovídá 95,4% pravděpodobnost, že daná aktivita do prezentovaného intervalu spadá.

Fig. 8. Distribution of the calibration results. The determination of the ^{14}C activity for 5000 ± 50 BP (1σ uncertainty) does not mean, that the activity lies in the interval between 4950 and 5050 years BP. But it does mean, that there is a probability of 68.3% (1σ) that the result lies in this interval. At the same time there is a probability of 31.7%, that the activity does not lie in this interval, as could be seen from the normal distribution curve. Similarly, the 2σ uncertainty corresponds to the probability of 95.4% that the activity lies within the interval.



Například, pokud bychom datovali vzorek s původem v druhé polovině sedmáctého století, jako výsledek dostaneme tři až čtyři intervaly se srovnatelnými pravděpodobnostmi. Nejstarší interval bude začínat po roce 1630 a nejmladší interval bude končit v rozmezí let 1950–1956 (Bredley, 1999; Walker, 2005).

Datování jednotlivého vzorku může být proto spojeno s nejednoznačným výsledkem (v podobě několika intervalů s přibližně srovnatelnými pravděpodobnostmi) nebo s poměrně širokým obdobím trvání tzv. „plata“ (jeden dlouhodobý interval). Je to proto, že kalibrační křivka není pravidelná. Pokud ale známe aktivity více dobře vzájemně časově zařazených vzorků (relativní časové rozestupy, např. u letokruhů), můžete takovou posloupnost výsledků stanovení aktivity ^{14}C porovnávat s tvarem kalibrační křivky. Tato technika je označována jako „wiggle matching“ a je určitým způsobem obrany proti

b) Fluktuace aktivity ^{14}C

V období >25 ka BP docházelo k velkým fluktuacím aktivity atmosférického ^{14}C , k podobným fluktuacím rovněž docházelo v menším měřítku například přibližně mezi lety 1630 až 1950. Výsledkem radiouhlíkového datování takových vzorků nedává jednoznačnou odpověď v rámci intervalu s kolísající aktivitou.

radiouhlíkové stáří	kalibrované stáří	trvání
10000 ^{14}C BP	11300–11550 cal. BP	250 let
9600 ^{14}C BP	10900–11100 cal. BP	200 let
9200 ^{14}C BP	10300–10400 cal. BP	100 let
8700–8800 ^{14}C BP	9550–9900 cal. BP	350 let
8000–7900 ^{14}C BP	8650–9000 cal. BP	350 let
7300 ^{14}C BP	8050–8150 cal. BP	100 let
6200 ^{14}C BP	7150–7000 cal. BP	150 let
5300 ^{14}C BP	6000–6200 cal. BP	200 let
4500 ^{14}C BP	5050–5300 cal. BP	250 let
4150 ^{14}C BP	4600–4800 cal. BP	200 let
3900 ^{14}C BP	4250–4400 cal. BP	150 let
2400–2500 ^{14}C BP	2350–2700 cal. BP	350 let
350 ^{14}C BP	320–520 cal. BP	200 let
100–200 ^{14}C BP	0–300 cal. BP	300 let

Tabulka 1. Radiokarbonová plata za posledních 12 tisíc let na kalibrační křivce Intcal09 (Reimer et al. 2009) – Autoři: Nývlt a Nývltová Fišáková.

Table 1. Radiocarbon plateaus during the last 12 ka on the IntCal09 calibration curve (Reimer et al. 2009) – Authors: Nývlt a Nývltová Fišáková.

nepravdělností kalibrační křivky, nutnou podmínkou je posloupnost několika vzorků (Ramsey, van den Plicht and Weninger, 2001). Nejjednodušší je použití sekvence letokruhů stromů kde přesně známe (relativní) časový rozstup mezi letokruhy a posloupnost stanovených aktivit ^{14}C můžeme posouvat po kalibrační křivce a hledat nejlepší proložení („fitaci“). Obdobně mohou takto být datovány laminované sedimenty, tefra nebo i rašeliniště, pro než máme nezávislá data o stáří. Pro statistické posouzení úspěšnosti takového proložení se standardně používá metoda nejmenších čtverců, kterou minimalizujeme vážené sumy kvadrátů vzdálenosti testovaných bodů od kalibrační křivky (Stuiver, Reimer, Braziunas, 1998). V některých případech je možné, že získáme více možností proložení. Obecně však platí, že čím více vzorků je zahrnuto do testované sekvence, tím je vyšší pravděpodobnost nalezení jednoznačné polohy proložení. Současně se také zlepšuje výsledné časové rozlišení. Pokud je možné použití metody „Wiggle Matching“, můžeme úspěšně datovat i v obdobích, která zasahují do oblastí plat a variací aktivit na kalibrační křivce.

Možné problémy při interpretaci výsledků datování

- radiouhlíkovým datováním neurčujeme stáří sedimentu, stanovujeme stáří organického materiálu, které může být mnohdy starší, než je vlastní sediment,
- optimální pro datování sedimentace dané vrstvy jsou ulity měkkýšů v životní pozici, případně řasovosinicové povlaky v jezerech, je však zapotřebí zvažovat vliv zásobníkového efektu, který může být statisticky významný i v sladkovodních systémech,
- je důležité vědět o možnosti resedimentace daného materiálu (např. kmeny stromů v holocenních říčních sedimentech – mají kořeny? jsou opracované?),
- Odebraný vzorek téměř vždy obsahuje rušivé chemické formy uhlíku (zejména karbonátové formy, humnové a fulvokyseliny), které jsou mladší nebo starší než samotný vzorek. Z tohoto důvodu je nezbytná tzv. předúprava vzorků a pečlivý výběr datovatelných chemických forem uhlíku.
- u jezerních a mořských sedimentů je nutné počítat s rezervoárovým efektem v důsledku přísunu staršího (případně fosilního) uhlíku erozí a transportem z daného povodí,
- provířením nezpevněných sedimentů bentickými organismy, vlněním, příbojem a proudy dochází k promíchání různě starého materiálu,
- pokud datujeme vyhořelý dřevěný srub – nezískáme stáří požáru, ale období tvorby biomasy stromu, ze které je konstrukce postavena (což může být rozdíl mnoha desetiletí i několika století), tedy daný objekt

je vždy mladší než strom (tedy jeho stavba a samozřejmě jeho zánik požárem),

- pozor na hroby, člověk může dělat nepředvídatelné věci.

Závěry

- radiouhlíkové datování je vedle dendrochronologie nejpřesnější metodou,
- pomocí ^{14}C datujeme okamžik vyloučení daného vzorku z přírodního uhlíkového koloběhu (smrt daného organismu, tedy okamžik, kdy přestává do svého těla přijímat uhlík a aktivita ^{14}C začíná klesat vlivem radioaktivní přeměny). Při odběru vzorků na datování musíme zamezit druhotnému ovlivnění (kontaminaci) mladším nebo starším organickým uhlíkem. Kontaminace může vzniknout také v důsledku přírodních procesů,
- datovat lze vzorky běžně do osminásobku poločasu přeměny, tedy ~ 45 tisíc let, ve výjimečných případech až do 60–65 tisíc let,
- aktivita $^{14}\text{CO}_2$ v atmosféře je v čase nerovnoměrná, což souvisí především se změnami intenzity kosmického záření pronikajícího do atmosféry v důsledku změn geomagnetického pole a solární aktivity a s některými pozemskými procesy. Proto je nutná kalibrace konvenčního radiouhlíkového stáří, kdy se nám převedou aktivita ^{14}C (tzv. radiouhlíkové „roky“) na kalendářní roky,
- intervaly kalibrovaného stáří mohou být uváděny v letech AD/CE/n.l. a BC/př.n.l., nebo v letech kal. BP (rozumí se před rokem 1950 AD/CE/n.l.), a v humanitních vědách ke křesťanskému letopočtu cal. AD/CE/n.l. a nebo kal. BC/př.n.l.,
- pozor na záměnu kalibrovaného a konvenčního radiouhlíkového stáří. Kalibrované stáří se obvykle uvádí jako časový interval, ke kterému by měla být připojena i odpovídající absolutní pravděpodobnost (např. 1215 – 1395 AD; P = 93%). Výsledek stanovení aktivity ^{14}C (konvenční radiouhlíkové stáří) se uvádí v letech jako diskrétní hodnota spolu s nejistotou pro hladinu pravděpodobnosti 68% (např. 215 ± 48),
- nepravdělnosti na kalibračních křivkách se projevují jako tzv. radiouhlíková plata nebo fluktuace aktivity ^{14}C a mohou způsobit značné komplikace radiouhlíkového datování,
- při interpretaci výsledků radiouhlíkového datování je zapotřebí si uvědomovat možné procesy, ke kterým mohlo docházet v souvislosti s depozicí vzorku (tj. vyloučení vzorku z uhlíkového oběhu) a rovněž důkladně zvažovat možné vlivy, ke kterým mohlo docházet po jeho depozici (například: redepozice se-

dimentů spolu s dřevem, uhlíky, pylovými zrny a dalšími případně datovatelnými materiály). Rovněž je zapotřebí důkladně izolovat datovatelnou chemickou formu uhlíku, tak abychom mohli vyloučit možné ovlivnění aktivity ^{14}C přítomností mladších či starších chemických forem (které mohou být ve vzorku přítomny například následkem pedogenních a biologických procesů),

- u vzorků musíme rovněž pečlivě zvažovat (případně indikovat a korigovat) možné ovlivnění zásobníkovým efektem, nejenom u vzorků mořského původu, ale i u vzorků souvisejících se sladkovodními systémy, zejména v blízkosti krasových oblastí,
- obranou vedoucí vyloučení či alespoň potlačení výše uvedených problémů se zpracováním vzorku je spolupráce mezi zadávajícím a datovací laboratoří. Prvotním výsledkem radiouhlíkového datování je určení časového intervalu vyloučení datovaného materiálu z uhlíkového oběhu. Pro tento účel potřebuje laboratoř co nejlépe znát míru možného ovlivnění přichozího vzorku rušivými látkami (např. konzervační činidla, průnik kořínků do vzorku, přítomnost humnových kyselin, ...),
- také pro interpretaci výsledků datování je důležitá komunikace mezi laboratoří a zadávajícím (jehož specializace umožní laboratoři chápat vzorek v širších souvislostech). Laboratoř může například pomoci s použitím metody Wiggle Matching posoudit další chemické a fyzikální vlivy. Rovněž je důležité u vzorku znát okolnosti vedoucí k možnému ovlivnění rezervoárovým efektem či velkou nadmořskou výškou. Ve spolupráci se zadávajícím může navrhnout indikaci a případnou korekci ovlivnění vzorků ze sladkovodních systémů. Pro takový účel může být například vhodné vybrat několik typů vzorků s různou pravděpodobností ovlivnění (robustností). Pokud se výsledky statisticky významně neliší, lze předpokládat zanedbatelnou míru ovlivnění v daném místě a čase (například: porovnat výsledky datování kostí vodních a suchozemských býložravých organismů, které pocházejí zjevně ze stejné vrstvy, nebo ve stejné vrstvě fluvialních sedimentů statisticky porovnávat výsledky stanovení ^{14}C ve vzorecích hrubých kusů dřev a drobných uhlíků). V některých případech je možné v případě statisticky odlišných výsledků odhadnout korekci a odpovídajícím způsobem poté rozšířit nejistotu stanovení a výsledný interval datování.

Poděkování

Chtěla bych poděkovat panu Ing. Ivo Světlíkovi, PhD. Z Oddělení dozimetrie Jaderného ústavu AV ČR, v.v.i. a radiokarbonové laboratoře Archeologického ústavu AV ČR Praha, v.v.i. za cenné rady a připomínky k článku.

1 Aktivitou ^{14}C se rozumí jeho obsah v uhlíkové izotopické směsi (Stuiver-Polach 1977).

2 Rozumí se uhlík (případně CO_2) s nízkým (neměřitelným) obsahem ^{14}C v uhlíkové izotopické směsi.

3 Platí pro severní polokouli.

Literatura

- Bradley R.S. (1999):** *Paleoclimatology. Reconstructing Climates of the Quaternary*. Second Edition. International Geophysics Series, 64, Academic Press.
- Cook, G.T. and van der Plicht, J (2007):** Radiocarbon dating. Conventional Method. In: Scott, A. E. (ed.): *Encyclopedia of Quaternary Science*. Elsevier, 2899–2911.
- McCormac F.G., Hogg A.G., Blackwell P.G., Buck C.E., Higham T.F.G., Reimer P.J. (2004):** SHCal04 Southern Hemisphere Calibration, 0–11.0 cal kyr BP. *Radiocarbon*, 46, 1087–1092.
- Gornitz V., Ed. (2009):** *Encyclopedia of Paleoclimatology and Ancient Environments*. Springer.
- Hughen K.A., Baillie M.G.L., Bard E., Beck J.W., Bertrand C.J.H., Blackwell P.G., Buck C.E., Burr G.S., Cutler K.B., Damon P.E., Edwards R.L., Fairbanks R.G., Friedrich M., Guilderson T.P., Kromer B., McCormac G., Manning S., Ramsey C.B., Reimer P.J., Reimer R.W., Remmele S., Southon J.R., Stuiver M., Talamo S., Taylor F.W., van der Plicht J., Weyhenmeyer C.E. (2004):** Marine04 marine radiocarbon age calibration, 0–26 cal kyr BP. *Radiocarbon*, 46, 1059–1086.
- Jull, A.J.T (2007):** Radiocarbon dating. AMS Method. In: Scott, A. E. (ed.): *Encyclopedia of Quaternary Science*. Elsevier, 2911–2918.
- Kitagawa H., van der Plicht J. (1998):** Atmospheric Radiocarbon Calibration to 45,000 yr B.P.: Late Glacial Fluctuations and Cosmogenic Isotope Production. *Science*, 279, 1187–1190.
- Levin, I., Kromer, B. (2004):** The tropospheric $^{14}\text{CO}_2$ level in mid-latitudes of the Northern Hemisphere (1959–2003). *Radiocarbon* 46 (3), 1261–1272.
- Levin, I., Hammer, S., Kromer, B. and Meinhardt, F. (2008):** Radiocarbon observations in atmospheric CO_2 : Determining fossil fuel CO_2 over Europe using Jungfraujoch observations as background. *Science of the Total Environment* 391, 211–216.
- Meijer H.A.J., van der Plicht J., Gislefoss J.S., Nydal R. (1995):** Long-term atmospheric records near Groningen, Fruholmen, and Izaña. *Radiocarbon* 37(1), 39–50.
- McCormac F.G., Hogg A.G., Blackwell P.G., Buck C.E., Higham T.F.G., Reimer P.J. (2004):** SHCal04 Southern Hemisphere Calibration, 0–11.0 cal kyr BP. *Radiocarbon*, 46, 1087–1092.
- Libby, V.F. (1955):** *Radiocarbon dating*, 2nd ed. University of Chicago Press, Chicago.
- Ramsey B.C., van den Plicht J., Weninger B. (2001):** ‘Wiggle Matching’ radiocarbon dates. *Radiocarbon*, 43, 381–389.

- Reimer P.J., Baillie M.G.L., Bard E., Bayliss A., Beck J.W., Bertrand C., Blackwell P.G., Buck C.E., Burr G., Cutler K.B., Damon P.E., Edwards R.L., Fairbanks R.G., Friedrich M., Guilderson T.P., Hughen K.A., Kromer B., McCormac F.G., Manning S., Ramsey B.C., Reimer R.W., Remmele S., Southon J.R., Stuiver M., Talamo S., Taylor F.W., van der Plicht J., Weyhenmeyer C.E. (2009):** Intcal09 and marine09 radiocarbon age calibration curves 0–50,000 years Cal BP. *Radiocarbon*, 51, 1111–1150.
- Scott E.M., Cook G.T., Bryant C., O'Donnell D. (2007):** A report on phase I of the 5th International Radiocarbon Intercomparison (VIRI). *Radiocarbon*, 49, 409–426.
- Stuiver M., Suess H.E. (1966):** On the relationship between radiocarbon dates and true sample ages. *Radiocarbon*, 8, 534–540.
- Stuiver M., Reimer P.J., Braziunas T.F. (1998):** High-precision radiocarbon age calibration for terrestrial and marine samples. *Radiocarbon*, 40, 1127–1151.
- Suess H.E. (1955):** Radiocarbon concentration in modern wood. *Science* 122(3166), 415–7.
- Suess H.E. (1965):** Secular variations of the cosmic-ray produced carbon 14 in the atmosphere and their interpretations. *Journal of Geophysical Research*, 70, 5937–5952.
- Van der Plicht, H. (1993):** The Groningen Radiocarbon calibration program. *Radiocarbon*, 35, 231–237.
- Vries H.D. (1958):** Atomic bomb effect - variation of radiocarbon in plants, shells, and snails in the past 4 years. *Science* 128(3318), 250–251.
- Walker M.J.C. (2005):** *Quaternary Dating Methods*. Wiley & Sons.

Summary

Radiocarbon dating is, after dendrochronology, the most accurate dating method. Using ^{14}C we can date the moment a particular sample ceased to be part of the natural carbon cycle (the death of the organism in question, i.e. the instant it stops absorbing carbon into its body and ^{14}C activity begins to decrease due to radioactive decay). When taking samples for dating purposes we must prevent any secondary influence (contamination) by later or earlier organic carbon. Contamination may also occur as the result of natural processes. Samples can generally be dated up to eight times their half-life, i.e. ~ 45 thousand years, in exceptional cases to as much as 60–65 thousand years. $^{14}\text{CO}_2$ activity in the atmosphere is uneven over time, primarily due to changes in the intensity of cosmic radiation penetrating into the atmosphere as the result of shifts in the geomagnetic pole and variations in solar activity, as well as due to certain terrestrial processes. It is therefore necessary to calibrate the conventional radiocarbon age, when ^{14}C activity (referred to as radiocarbon “years”) is converted to calendar years. Intervals in calibrated age may be expressed in years AD/CE and BC, or in calendar BP years (meaning before 1950 AD/CE), and

in the humanities may also be expressed using the Christian calendar as AD/CE and BC. It is important not to confuse the calibrated and conventional radiocarbon age. Calibrated age is usually given as a time interval, which should be accompanied by the corresponding absolute degree of probability (e.g. 1215 – 1395 AD; P=93%). The result determined by ^{14}C activity (conventional radiocarbon age) is given in years as a discrete value, along with a confidence interval of about 68% (e.g. 215 ± 48). Irregularities in calibration curves appear as what is known as the radiocarbon plateau or fluctuations in ^{14}C activity and may considerably complicate radiocarbon dating. When interpreting the results of radiocarbon dating it is essential to take account of any processes that could have occurred in relation to the deposition of the sample (i.e. exclusion of the sample from the carbon cycle) and also to carefully consider factors that could have influenced it after its deposition (e.g.: re-deposition of sediments together with wood, coals, pollen grains and any other datable materials). It is also important to properly isolate the samples with a datable chemical form of carbon to prevent the ^{14}C activity from being affected by the presence of later or older chemical forms (which may be present in the sample as the result of, for example, pedogenic and biological processes). With the samples we must also carefully weigh up (and indicate and correct, where necessary) the possible influence of the stack effect, not just with samples of marine origin, but also samples from freshwater systems, particularly in the vicinity of karst regions. One way of precluding or at least suppressing these problems associated with processing samples is cooperation between the contracting and dating laboratories. The primary result of radiocarbon dating is the determination of the interval since the dated material ceased to be part of the carbon cycle. For this, the laboratory needs to know as much as possible about the degree to which the incoming sample could have been affected by intrusive substances (e.g. preservatives, root penetration into the sample, the presence of humic acids, ...). Another important factor when interpreting dating results is communication between the laboratory and the contracting entity (whose specialisation enables the laboratory to see the sample in the broader context). For example, the laboratory may assess other chemical and physical influences using the Wiggle Matching method. It is also important to be aware of any circumstances which could influence the sample as a result of the reservoir effect or high altitude above sea level. By working with the contracting entity the laboratory may suggest indications and possibly corrections to samples from freshwater systems. For this purpose it may, for example, be best to select several different types of samples with various different probabilities of influence (robustness). If the results are not significantly different in statistical terms, the degree of influence at that given place and time can be considered negligible (for example: comparing the results of dating bones of herbivorous aquatic and terrestrial organisms that apparently come from the same layer, or in the same layer of fluvial sediments making a statistical comparison

of the results of ^{14}C dating in samples of coarse wood and small pieces of charcoal). In some cases, where there are statistical differences in the results, a correction may be

estimated and the level of uncertainty and resulting dating interval may be extended accordingly.