

Kvarterní prostředí (podzimní semestr 2019)

Datovací metody kvartérních procesů a událostí

MUNI

Daniel Nývlt (daniel.nyvlt@sci.muni.cz)

Datovací metody

Absolutní X relativní datování

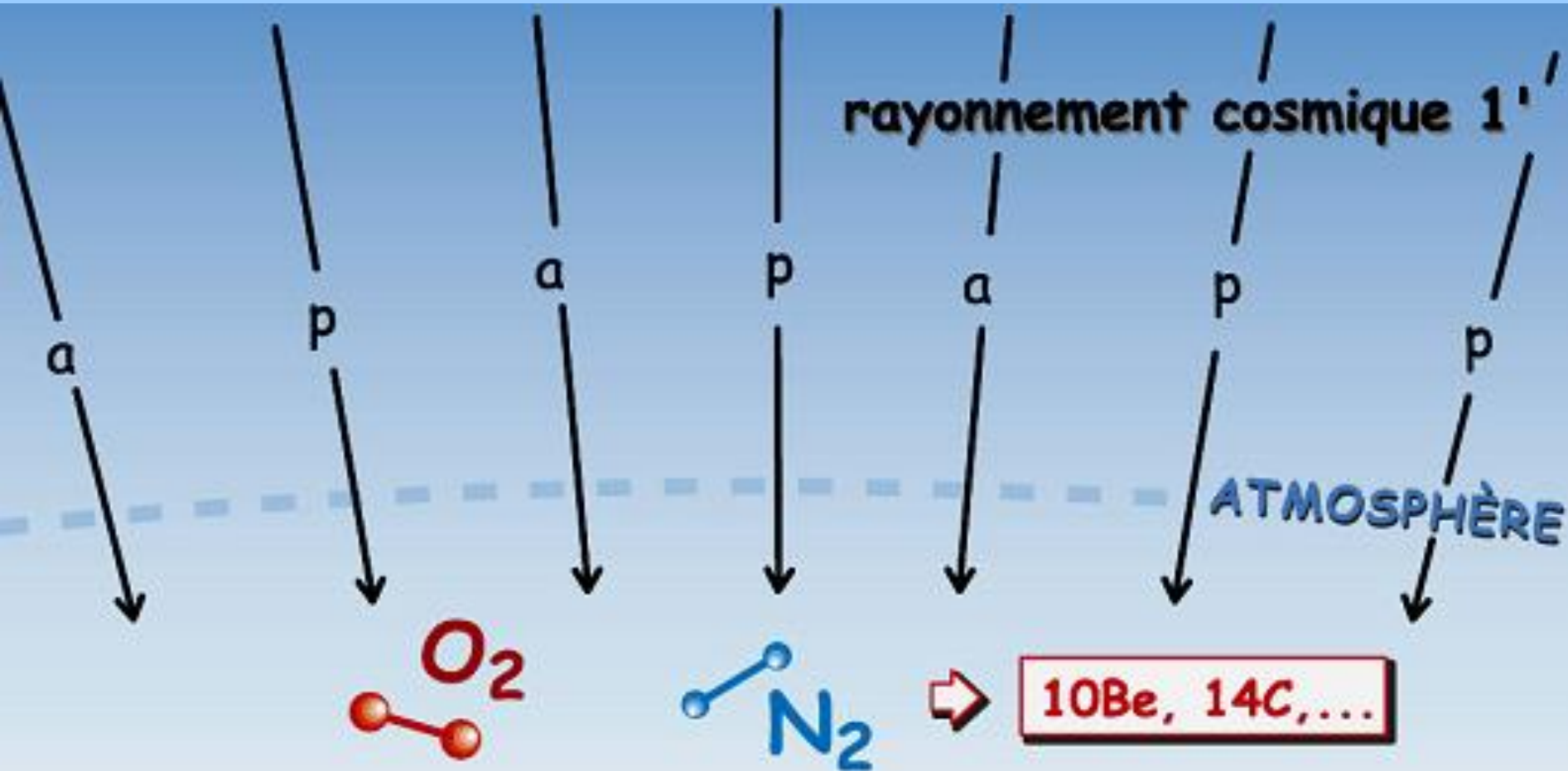
Radiometrické (radioizotopové) metody (terigenni radionuklidy, kosmogenní radionuklidy)

Radiační dozimetrické metody (luminiscence, racemizace aminokyselin, elektronová spinová rezonance, štěpné stopy)

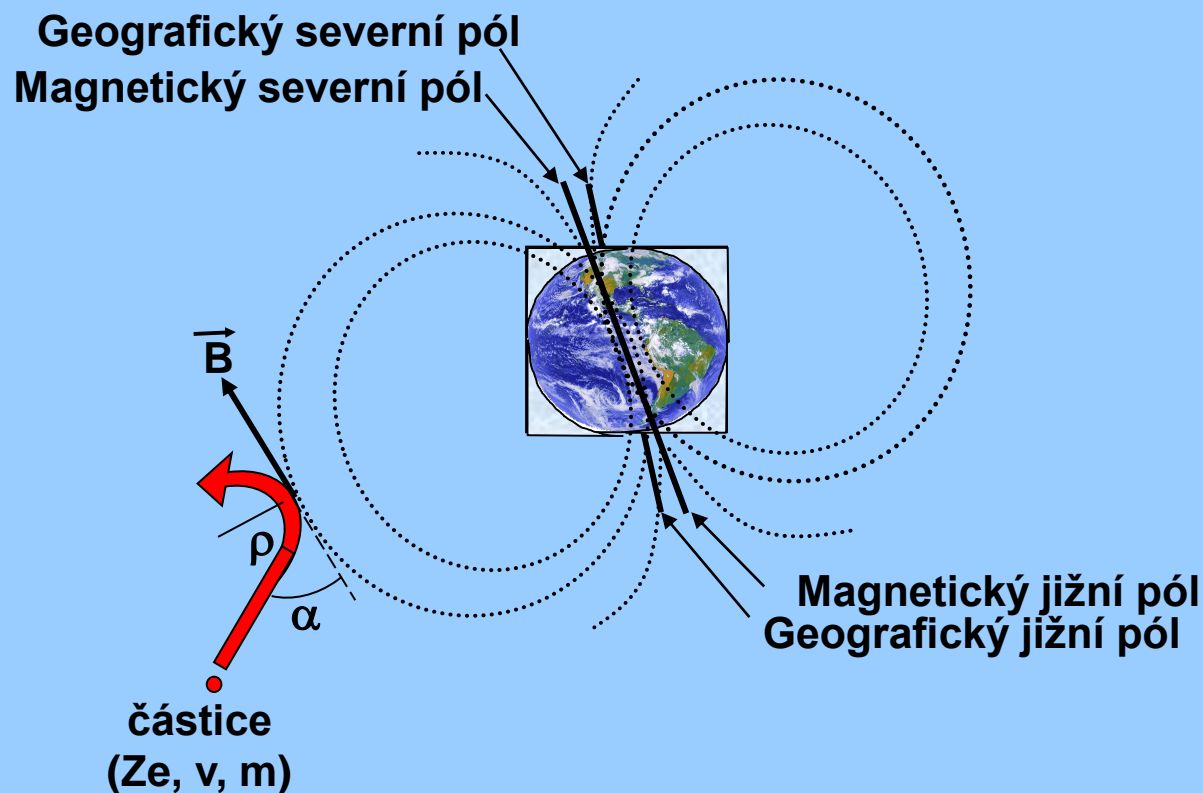
Kvalitativní a srovnávací metody (přírůstkové metody – varvy, letokruhy, led; molekulární hodiny, magnetostratigrafie, biostratigrafie, tefrochronologie, lichenometrie, zvětrávání, pedogeneze, izotopické signály, superpozice, stratigrafické vztahy)

Kosmogenní radionuklidy – radiogenní izotopy vznikající štěpením atomových jader vlivem **vysokoenergetického kosmického záření**.

Působením primárního kosmického záření (vysoce energetické nukleony s energií >1 GeV: 89 % protony, <10 % alfa částice, 1 % jádra těžších prvků; <1 % beta částice) na atomy vzduchu (H, N, O, Ar, Cl) v horních vrstvách atmosféry vznikají **kosmogenní radionuklidy** (např. ^3He , ^{10}Be , ^{14}C , ^{36}Cl , ^{39}Ar), které se zabudovávají např. do biosféry nebo hydrosféry.



Atmosférická i *in situ* produkce kosmogenních radionuklidů je závislá na **magnetickém poli Země**. Jejich produkce vzrůstá s nadmořskou výškou a magnetickou (zeměpisnou) šířkou.

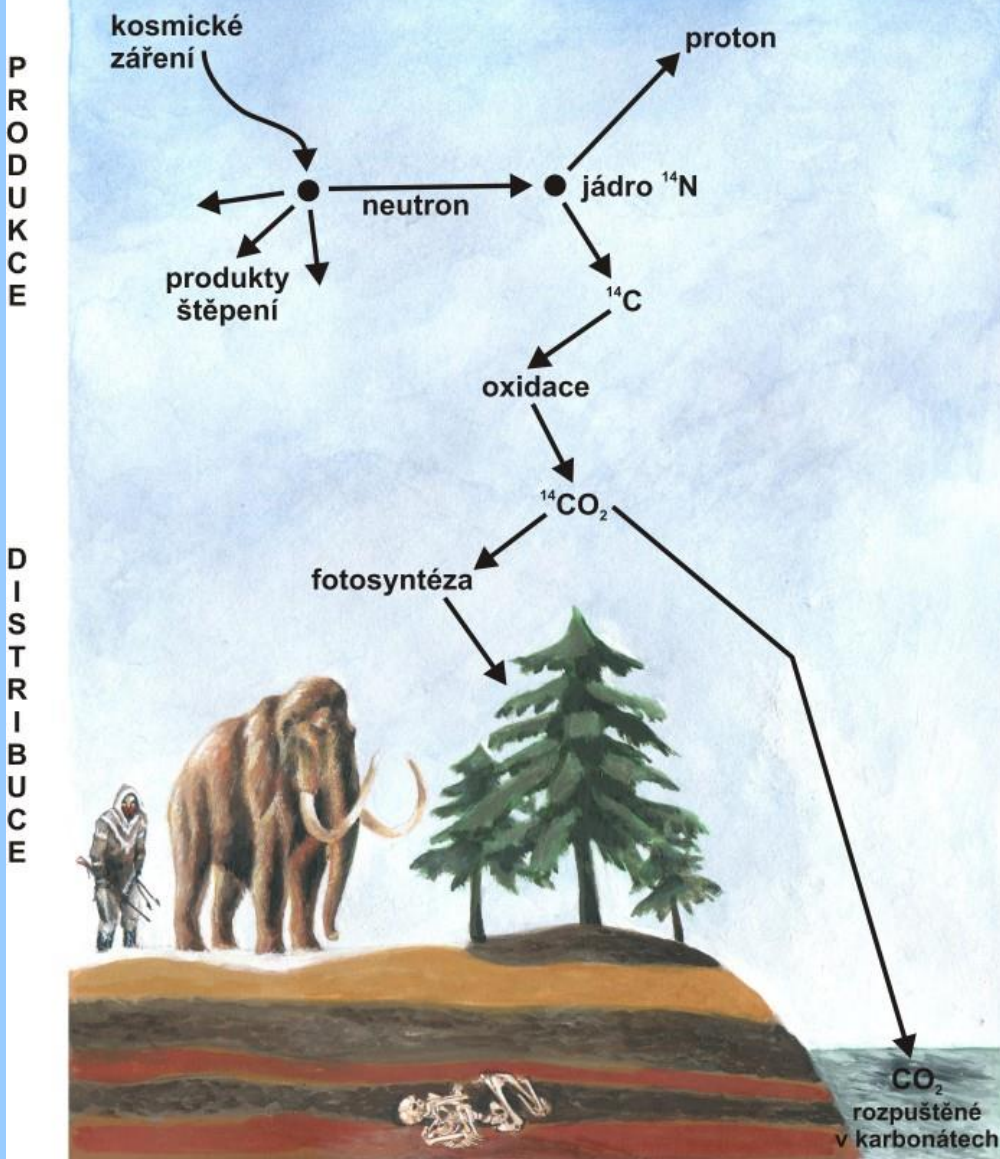


$$B \cdot \rho \cdot c = (m \cdot v \cdot c) / Z_e \cdot \sin \alpha$$

Radiouhlík – ^{14}C

Uhlík má **dva stabilní** (^{12}C – 98,9 % a ^{13}C – 1,1 %) a **jeden radiogenní** (^{14}C) izotop rozpadající se na ^{14}N s emisí β záření. Radiouhlík **vzniká v atmosféře** na hranici troposféry a stratosféry a především ve vyšších geomagnetických šířkách **při srážkách** vysokoenergetických neutronů s molekulou dusíku (N_2).

V troposféře je v důsledku proudění „téměř“ homogenně rozšířen a reaguje s kyslíkem za vzniku $^{14}\text{CO}_2$. Ten se dostává **fotosyntézou do rostlin** a dále potravním řetězcem **do zvířat a člověka** (globální cyklus uhlíku). Z atmosféry se dostává také do mořské i sladké vody, proto je **zabudován do vlastních těl** také **vodními organismy**.



ROZPAD

rovnovážná koncentrace: $\frac{^{14}\text{C}}{^{12}\text{C}} \approx 10^{-12}$

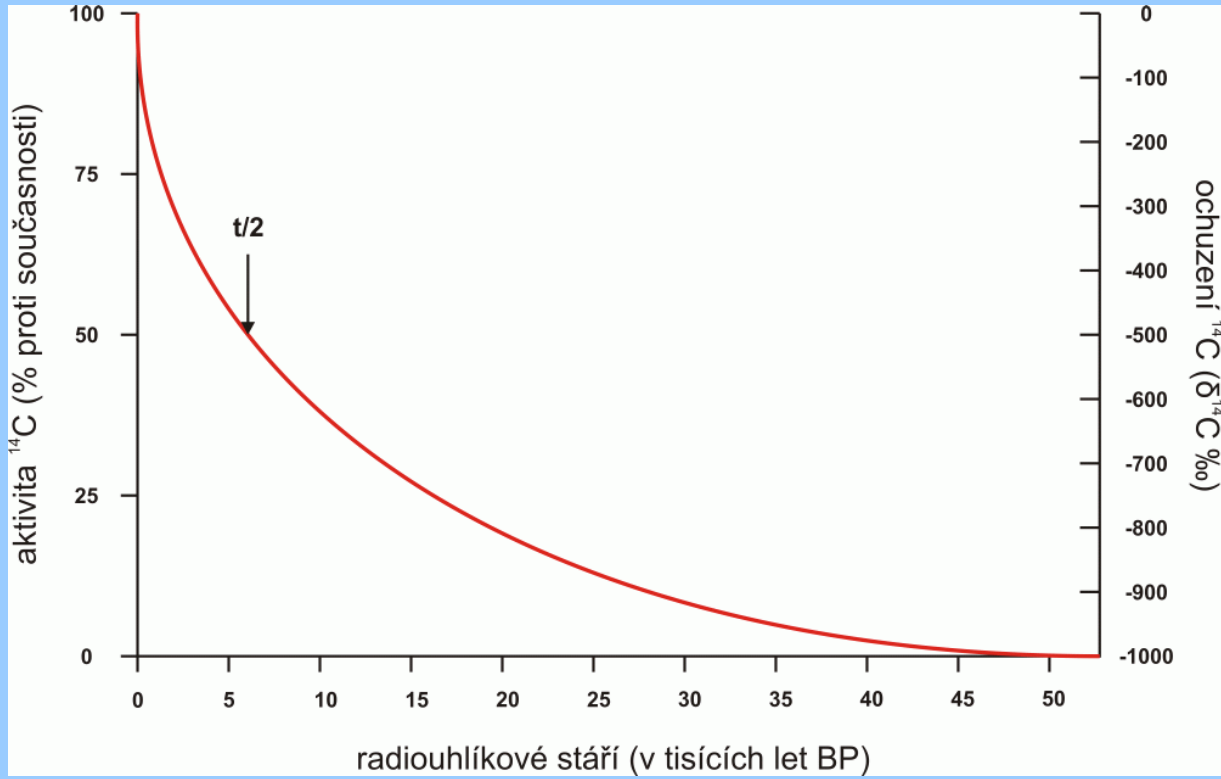
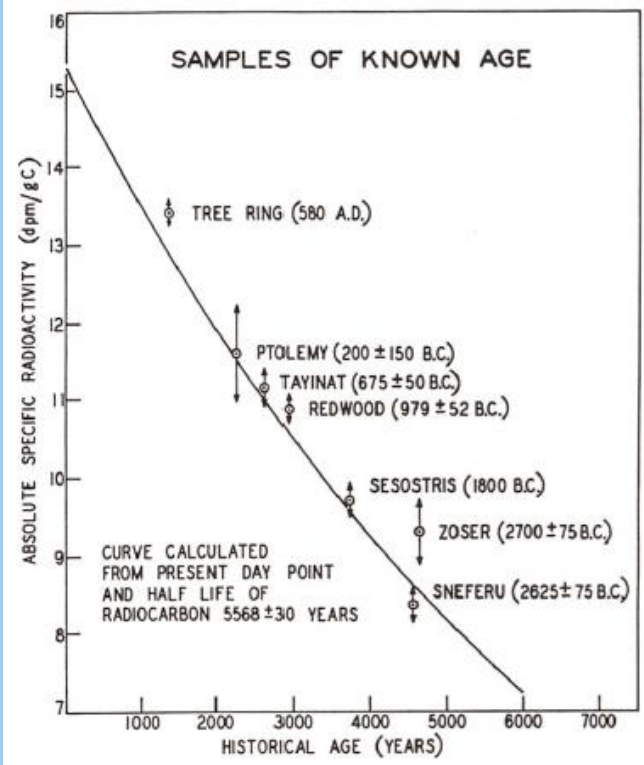
rozpad: $^{14}\text{C} \rightarrow ^{14}\text{N} + e^- + \nu^-$

poločas rozpadu: 5730 let

1 gram \rightarrow ~10 rozpadů za minutu

Radiouhlík – ^{14}C

Poločas rozpadu (přeměny) izotopu ^{14}C je 5730 ± 40 let (tzv. cambridgeský poločas rozpadu). Původní poločas rozpadu použitý W. F. Libbym (1949) byl 5568 ± 30 let.



W.F. Libby – Nobel Prize winner 1960 – „Seldom has a single discovery in chemistry had such an impact on the thinking in so many fields of human endeavor.“ Nobel Committee (1960)

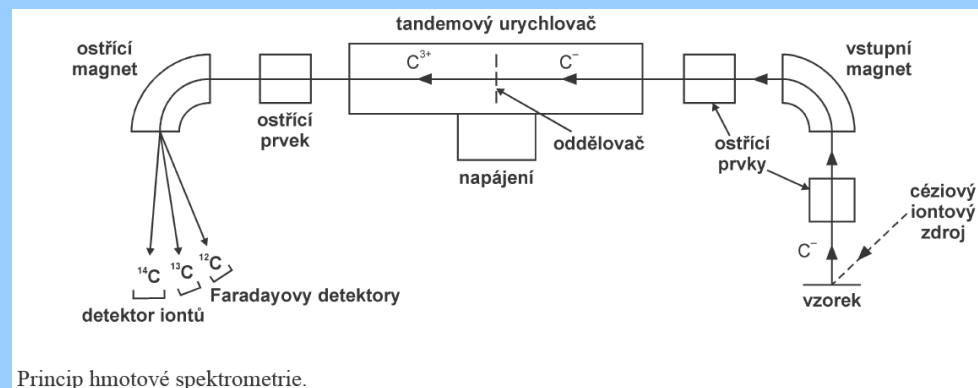
Radiouhlíkové datování

- Jaký materiál datujeme?** dřevo, rašelinu, organické jezerní sedimenty, karbonáty, zbytky rostlin, uhlíky, ulity měkkýšů, korály, CO₂ rozpuštěné ve vodě, kosti, papír, látky, kůže, pigmenty...
- Co v něm datujeme?** organický uhlík (kolagen, karbonáty, huminové kyseliny, celulóza, lignin)
- Jakou událost datujeme?** úmrtí daného organismu, tedy okamžik, kdy přestává do svého těla zabudovávat izotopy uhlíku a radiogenní uhlík se začíná rozpadat a mění se tak poměr izotopů uhlíku
- Čemu je nutné zabránit?** druhotnému ovlivnění (kontaminaci) mladším nebo starším organickým uhlíkem. Kontaminace může vzniknout v důsledku přírodních procesů nebo během vzorkování a skladování vzorku.
- Jak starý materiál lze odatovat?** běžně osminásobek poločasu rozpadu, tedy ~ 45 tisíc let, max. 60–65 tisíc let

Jakými metodami měříme aktivitu radiogenního uhlíku?

Konvenční metoda radiouhlíkového datování založená na detekci a měření β záření (počtu radioaktivních přeměn) atomů ^{14}C . Měříme to nejčastěji **kapalinově scintilačním měřením (LSC)** nebo dříve též **plynovým proporcionálním měřením (GPC)**.

Hmotová spektrometrie pomocí urychlovače (AMS) přímo počítá atomy jednotlivých izotopů uhlíku (^{12}C , ^{13}C a ^{14}C), vzhledem k časovým možnostem jsou **stanovovány poměry izotopů uhlíku**, nikoliv jejich absolutní hodnoty.



A co kvalita měření a mezilaboratorní srovnání výsledků?

Pro zajištění srovnatelnosti dat jsou používány **referenční standardy**, jako je kyselina šťavelová (HOx1 a 2; N.I.S.T. SRM 4990 B a C). Standardy jsou průběžně měřeny mezi jednotlivými vzorky a každá laboratoř dlouhodobě sleduje analytickou reprodukovatelnost měřených vzorků.

Pravidelně probíhají **mezinárodní srovnávání vybraných radiokarbonových laboratoří**. To spíše ukazuje na kvalitu laboratoří a na **nevýznamné rozdíly** v získaných stářích **mezi konvenčními a AMS metodami**.

Co z laboratoře dostanete?

laboratorní kód vzorku

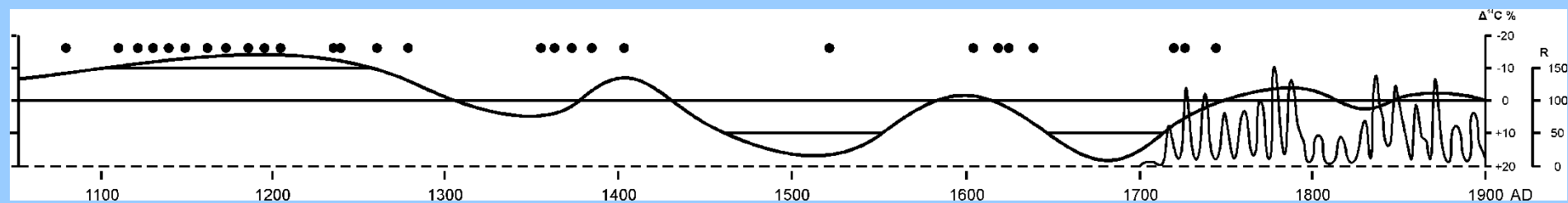
konvenční radiouhlíkové stáří BP s interní chybou $\pm 1\sigma$ – co to znamená?

- je přepočteno za použití původního **Libbyho poločasu rozpadu ^{14}C** (5568 let),
- je vztaženo k modernímu radiouhlíkovému standardu (HOx1, HOx2, ANU sacharóza nebo jinému),
- byla provedena korekce na izotopickou frakcionaci ($\delta^{13}\text{C}$) daného vzorku normalizací k poměru $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ v karbonátu standardu VPDB,
- standardně udáváno **BP** (konvenčně před rokem 1950 AD/CE/n.l.),
- udávaná \pm hodnota je **směrodatnou odchylkou**, což je interní chyba měření vzorku v dané laboratoři, konvenčně $\pm 1\sigma$ – **obecně podhodnocená hodnota odrážející pouze statistickou chybu měření**, neodráží množství dalších faktorů zvyšujících chybu, jako je rozdílný poločas rozpadu a chyby vznikající při přípravě vzorků.
- je nutné jej **vždy udávat**, i když budete pro své interpretace využívat kalibrované stáří; protože toto je číslo, které se nemění, ale kalibrační sety se neustále zpřesňují a konvenční radiouhlíkové stáří tak může být kdykoliv v budoucnu přepočteno podle jakéhokoliv jiného kalibračního setu...

Kalibrace radiouhlíkových dat

Prvotním přiblížením bylo uvažováno, že **produkce radiogenního uhlíku je stálá v čase a v prostoru** a že mezi jeho produkcí a rozpadem je tedy v přírodě dlouhodobá dynamická rovnováha. Avšak již v roce 1958 de Vries studiem letokruhů ukázal, že stáří získaná jako konvenční radiouhlíková stáří neodpovídají stářím ročních přírůstků.

Produkce radiogenního uhlíku v atmosféře je totiž v čase a prostoru nerovnoměrná (dochází ke kvaziperiodickým změnám atmosférické aktivity ^{14}C v periodách od 200 do 2300 let, myšleno na krátkých časových škálách).



Ta souvisí především se **změnami intenzity kosmického záření pronikajícího do atmosféry** v důsledku **změn geomagnetického pole a solární aktivity** a s některými pozemskými procesy (především změny mořského proudění).

Co je to kalibrace radiouhlíkových dat a jsou i další důvody pro kalibraci?

Je to proces, kdy pomocí nezávislých datovacích metod provádíme transformaci konvenčního radiouhlíkového stáří na **stáří reálné**, často nepřesně označované jako **kalendářní**, protože bychom správně měli počítat v **tropických letech** trvajících 365,242192129 dne.

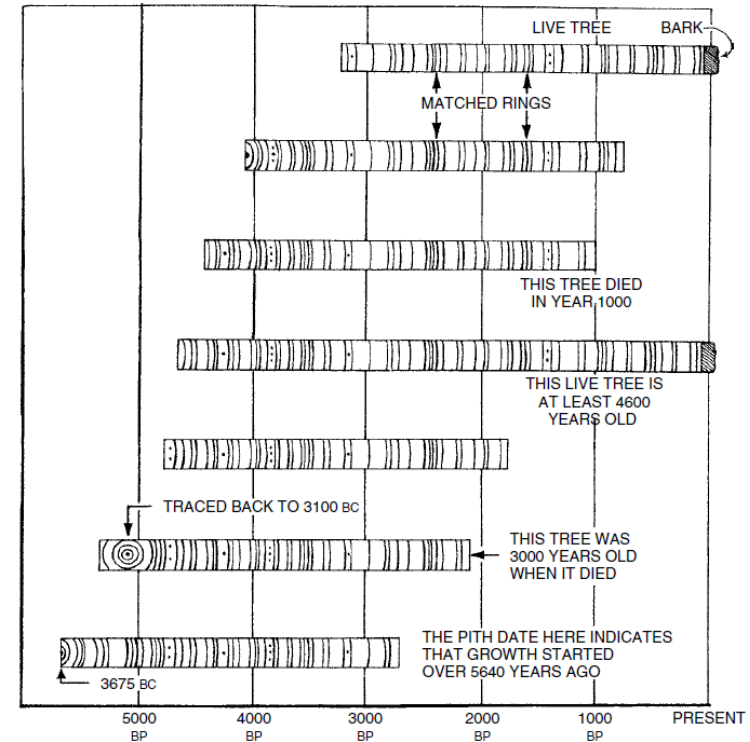
- používání **původního poločasu rozpadu** (podhodnocen o ~3 %) pro udržení kontinuity a srovnání konvenčních radiouhlíkových stáří a vlastní **chyba v jeho stanovení**,
- **u mořských vzorků** potenciální ovlivnění **rezervoárem ^{14}C** v důsledku nehomogenního rozšíření různě starého uhlíku v mořské vodě,
- obdobně izotopicky rozdílná směs izotopů uhlíku se uvolňuje při **tání ledovců a permafrostu** (bublinky vzduchu, CO_2 zamrzlé přímo v ledu),
- v důsledku eroze karbonatických nebo organogenních hornin a jejich ukládání **v jezerech a mořích** se mění **frakcionace izotopů uhlíku** v těchto pánvích,
- **vulkanická aktivita** dodává do atmosféry množství **lehkého uhlíku**,
- od průmyslové revoluce významný **vliv člověka** na frakcionaci uhlíku v atmosféře (**spalování fosilních paliv** ředí radiogenní uhlík v atmosféře dodáváním izotopicky lehčí směsi uhlíku bez ^{14}C – tzv. **Suessův efekt**; naopak **termonukleární výbuchy** zvyšují podíl radiogenního uhlíku v atmosféře na hodnoty, které nemají v přírodní historii období).

Jaké jsou nejčastější metody kalibrace radiouhlíkového stáří?

Dendrochronologická kalibrace – přímé srovnání letokruhů datovaných radiouhlíkovou metodou a jejich přesného stáří stanoveného dendrochronologicky – dnes kalibrace po stáří 13.900 cal. let BP podle nejdelší dendrochronologické řady (dubová a borovicová křivka z Německa a Švýcarska).

Varvová chronologie, mělkomořské laminované sedimenty, speleotémy

Srovnání s jinými datovacími metodami



Jaký kalibrační datový set použít?

INTCAL – International Calibration (od roku 1986) – kompozitní kalibrační set vycházející především z dendrochronologického záznamu, pro období >13,9 cal. ka BP využívá laminovaných sedimentů (*mořských* – korály u Tahiti, pánev Cariaco, vrty v severním Atlantiku a *jezerních* – jezero Suigetsu, Japonsko) a srovnání s datováním produkty rozpadové řady uranu.

Postupně dochází k zpřesňování a prodlužování dosahu kalibračních křivek – **INTCAL93** (12 ka cal. BP) – **INTCAL13** (50 ka cal. BP).

Kromě těchto globálních kalibračních setů existují specifické kalibrační sety pro určitá prostředí či části Země:

Marine13 – kalibrační set pro mořské vzorky, který automaticky počítá s globálním mořským rezervoárem ^{14}C pro dané období

SHCal13 (datový set založený na kombinaci dendrochronologie terestrického materiálu a mořské chronologie pouze z jižní polokoule)

Fairbanks05 – kalibrace pleistocénních dat založená na U/Th datování korálů

CalPal-2007-Hulu – kalibrační set pro posledních 60 ka. Pro pleistocénní stáří je založený na U/Th datovaných speleotémách z jeskyně Hulu v Číně, jejichž záznam je astronomicky laděn na záznam $\delta^{18}\text{O}$ z jádra NGRIP.

To jsou kalibrační sety, ale jaký kalibrační program mi stáří přepočítá?

CALIB – oficiální program INTCAL komunity, verze 7 zahrnuje především datové sety INTCAL13, Marine13, SHCal13 a některé další

OxCal – často používaný program evropskými radiouhlíkovými laboratořemi využívající bayesiánský pravděpodobnostní přístup pro výpočet kalibrovaného stáří

CalPal 2007 – program propojený s různými paleoklimatickými záznamy. Možnost výběru různých kalibračních setů (avšak nejnovější je **INTCAL04**). Verze **CalPal-Online** není vhodná, protože počítá jinak chyby.

Kalibrovaná data jsou obdobně jako konvenční radiouhlíková data vztahována k roku 1950 AD/CE/n.l. (**cal. BP; kal. BP**)

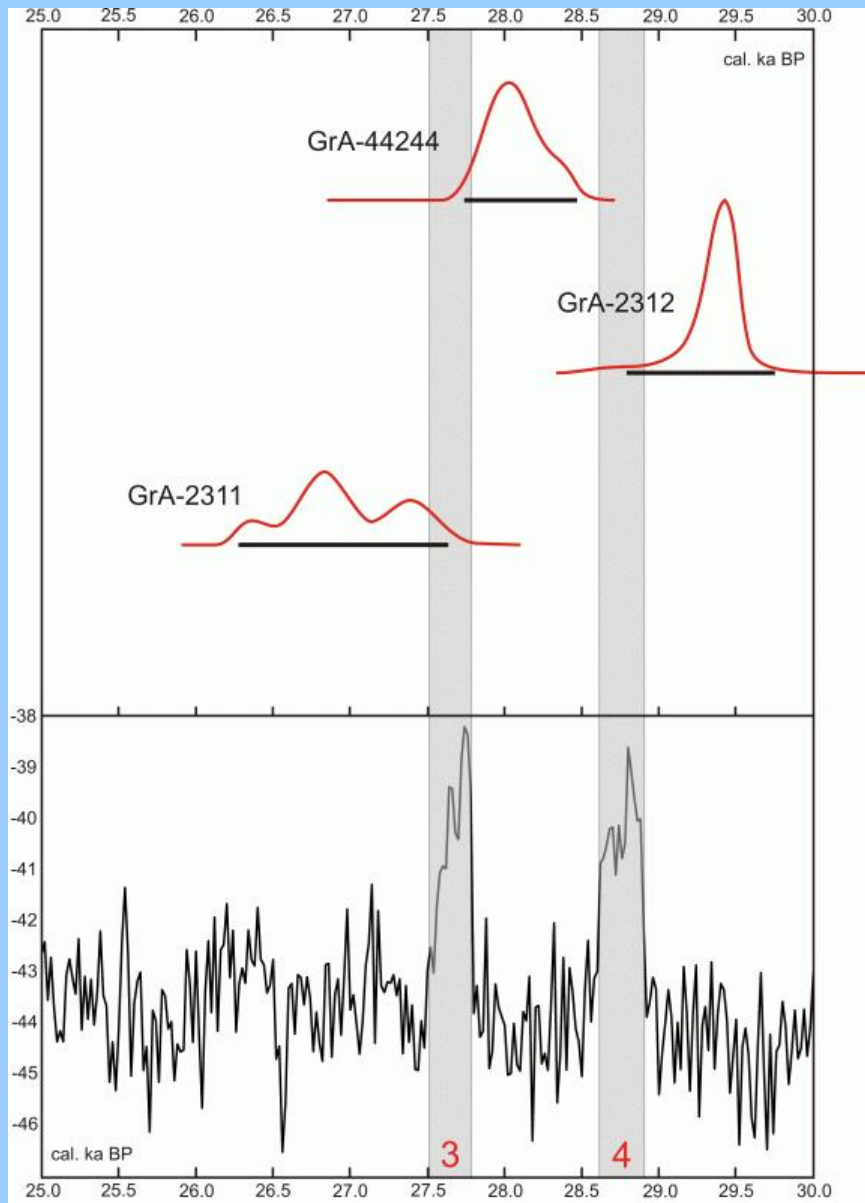
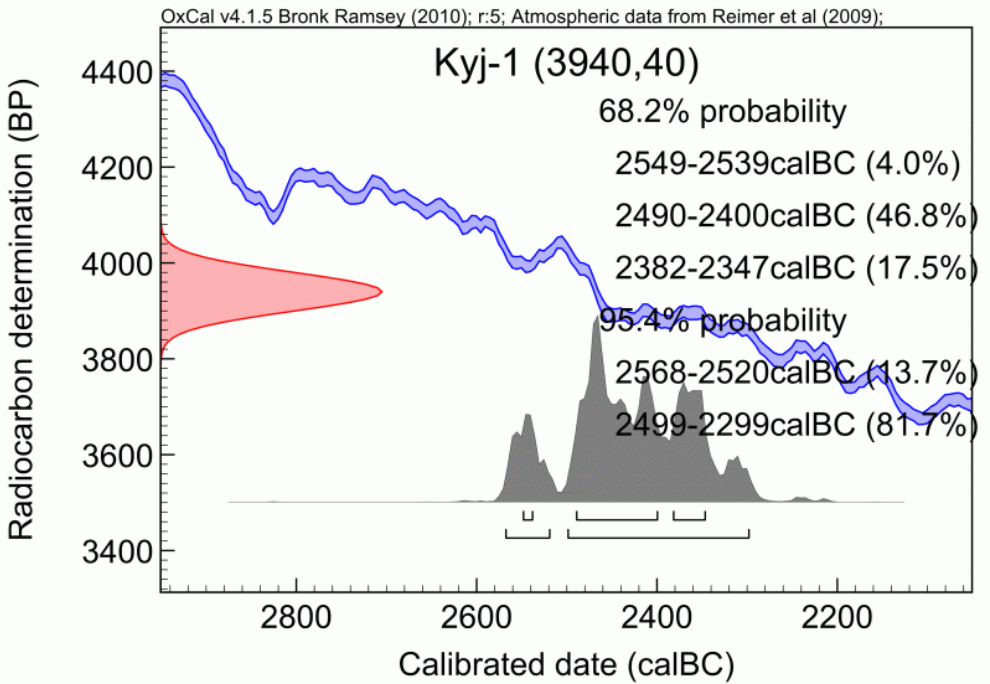
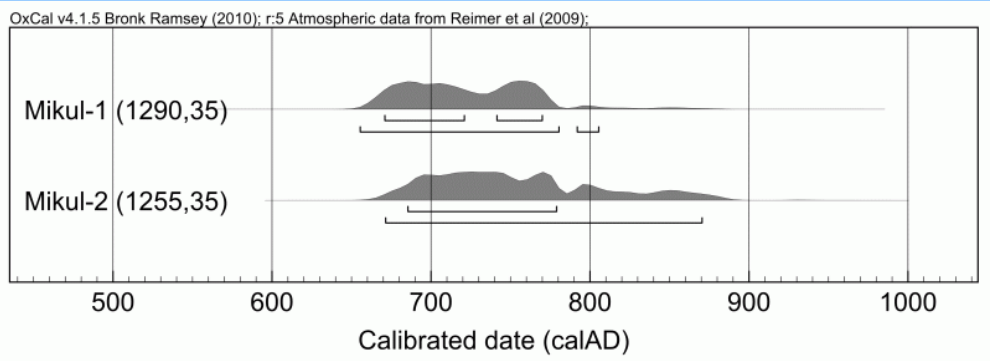
V humanitních vědách lpících na kalendářním zápisu jsou data vztahována ke křesťanskému letopočtu a mohou tak být **cal. AD/CE/n.l.** a nebo **kal. BC/př.n.l.**

Po roce 2000 jsou mnohdy kalibrovaná data vztahována k roku 2000 AD/CE/n.l. (**cal. b2k; kal. b2k**), ale pozor některé časopisy s tím stále mají problém...

Kalibrace radiouhlíkových dat – příklady výstupů kalibračních programů

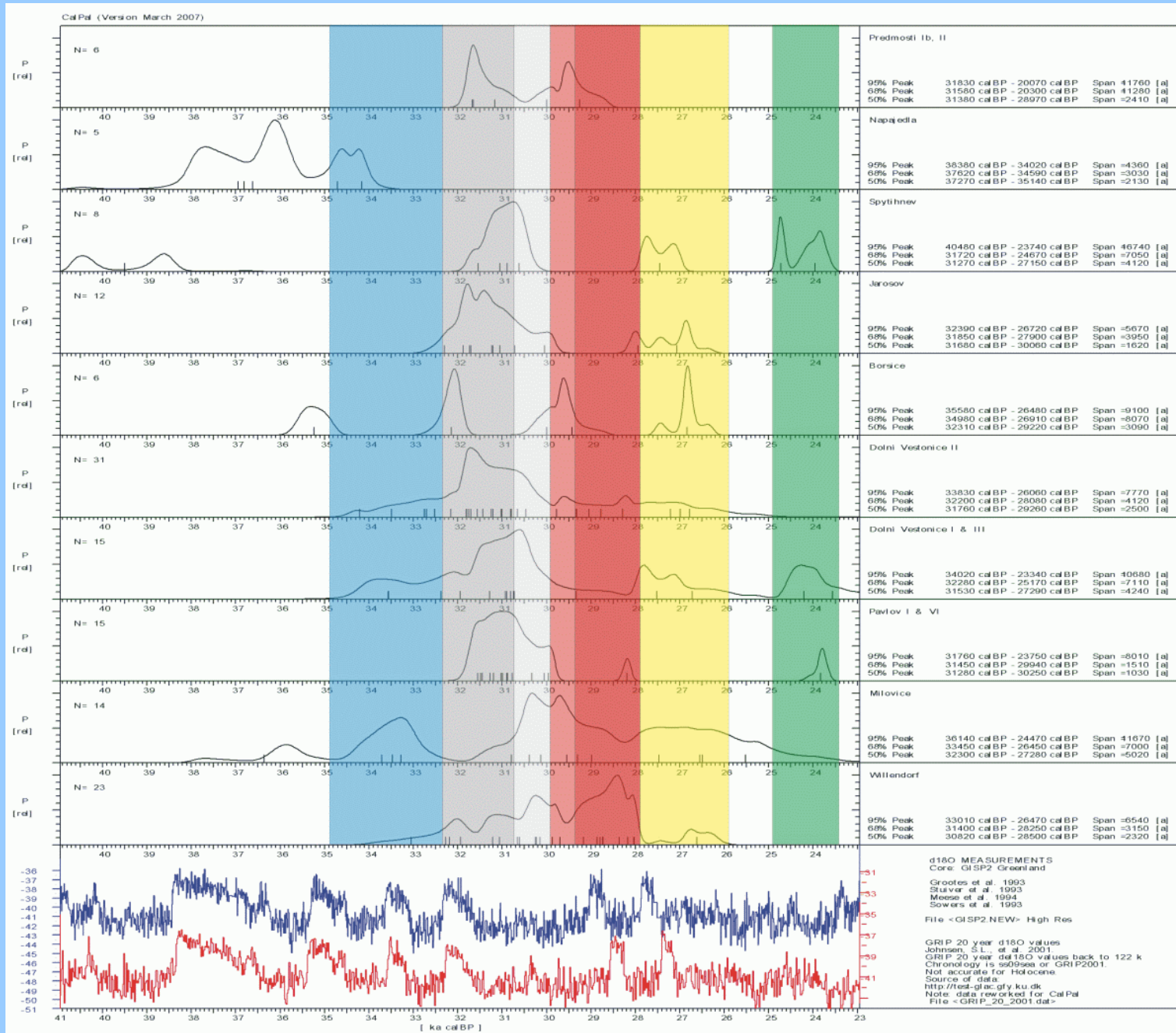
OxCAL v4.1.X

CALIB 7



Kalibrace radiouhlíkových dat – příklady výstupů kalibračních programů

CalPal-2007



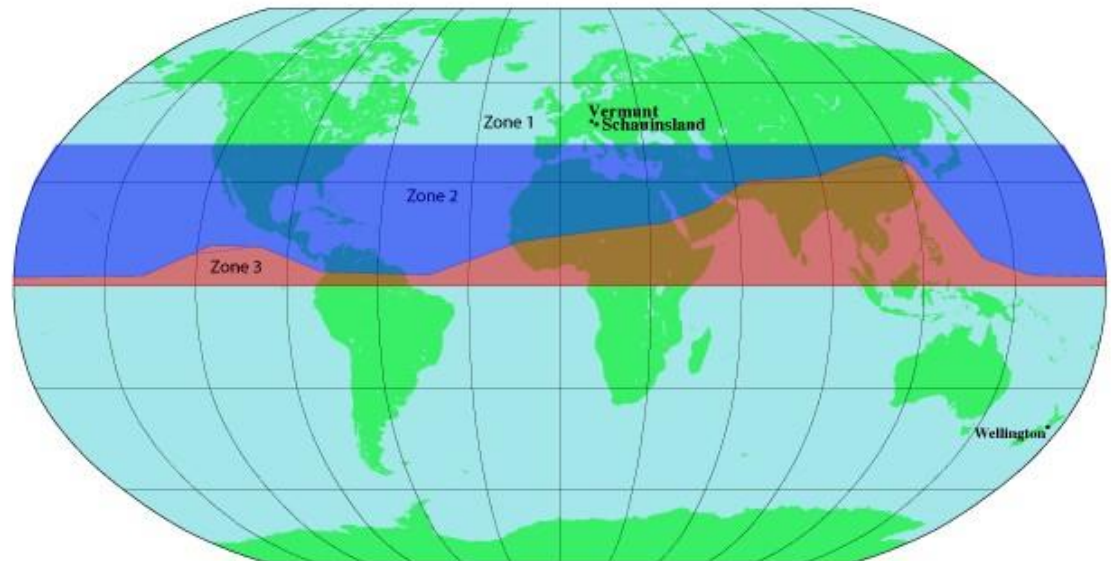
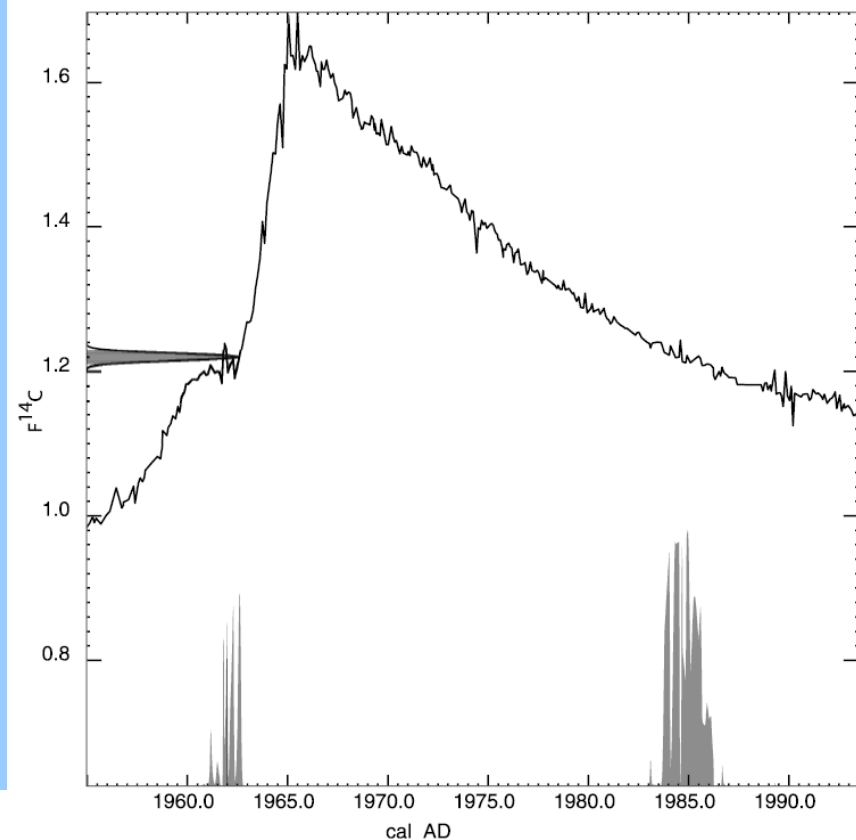
A co s daty po roce 1950 AD?

CALIBomb – kalibrační program využívající různé datové soubory pro kalibraci dat mladších než 1950 AD (<http://calib.qub.ac.uk/CALIBomb/frameset.html>)

Několik kalibračních setů, pro naše jsou území vhodné sety:

Levin – měsíční průměry troposférického $^{14}\text{CO}_2$ (1959–2007 AD), vhodné pro střední zeměpisné šířky severní polokoule

NH_zone1 – kompilace měsíčních průměrů troposférického $^{14}\text{CO}_2$ pro oblast s. od 40° s.š. (1955–2000 AD)



Radiouhlíková vs. kalibrovaná data

Jaké jsou rozdíly mezi konvenčním radiokarbonovým stářím a kalibrovaným (reálným, kalendářním) stářím?

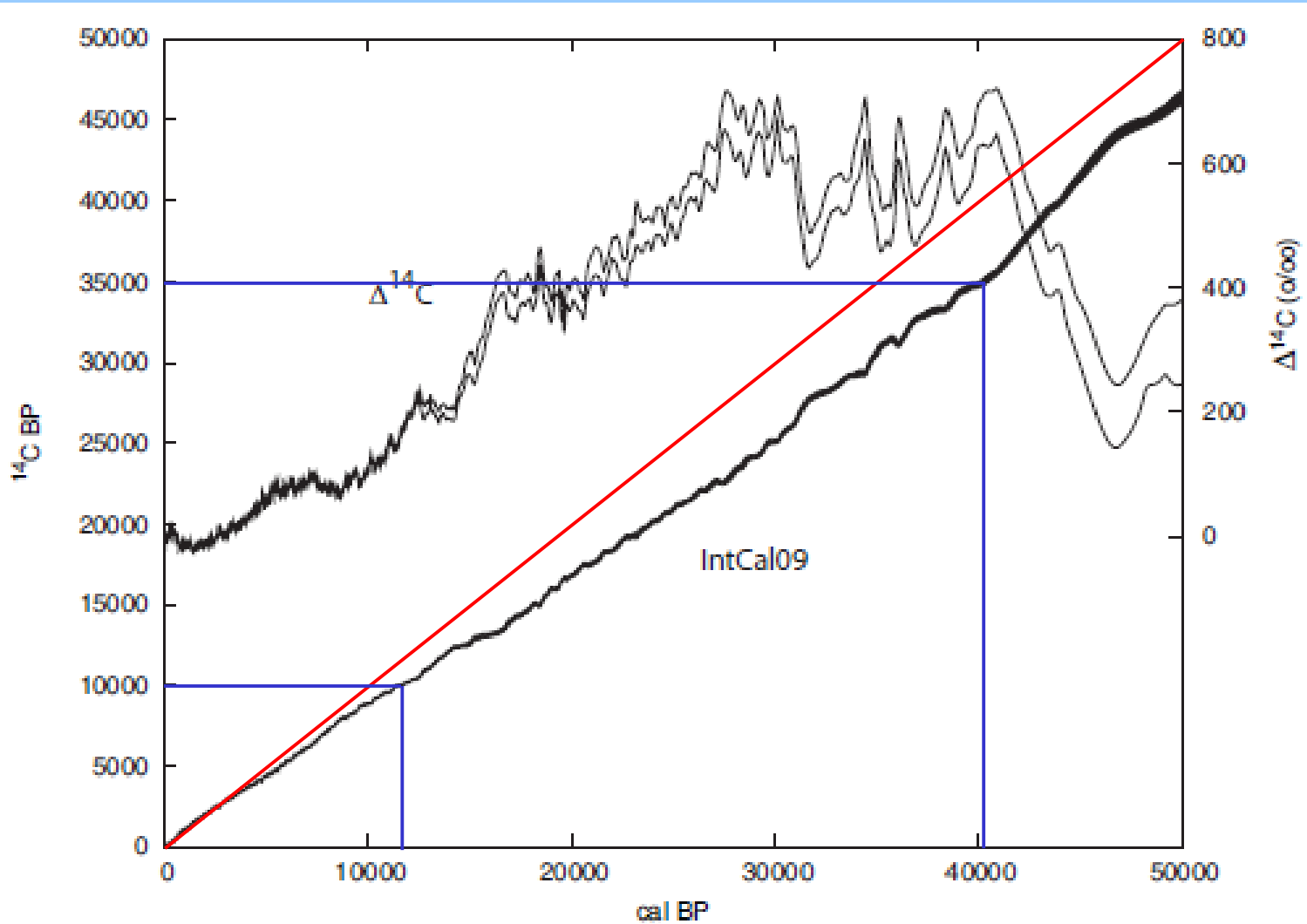


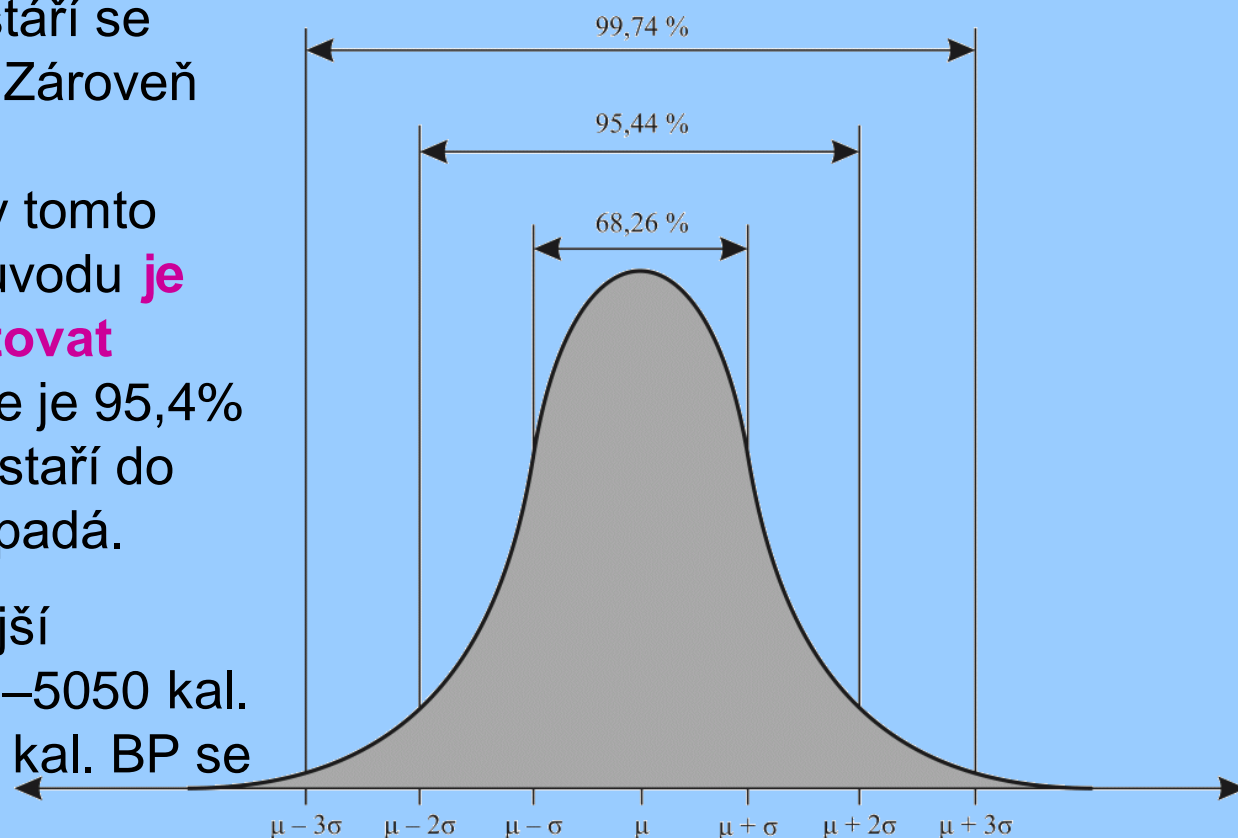
Figure 4 IntCal09 calibration curve and age-corrected Δ¹⁴C (‰) with 1-standard deviation envelopes

Co znamená výsledek kalibrace?

Protože radiokarbonové datování je výsledkem opakovaného měření, je rozdělení jednotlivých jeho výsledků vyjádřeno **normálním** (Gaussovým) **rozdělením**. A proto jsou získaná konvenční radiouhlíková stáří vyjadřována jako průměr \pm jedna (dvě) směrodatná odchylka. Po kalibraci se však již o normální rozdělení nejedná. Proto stáří 5000 ± 50 ^{14}C let BP (s chybou 1σ) neznámá, že skutečné stáří vzorku leží mezi 4950 a 5050 ^{14}C lety BP.

Ale znamená to, že existuje 68,3% pravděpodobnost (1σ), že stáří se pohybuje v tomto intervalu. Zároveň ale platí, že je 31,7% pravděpodobnost, že stáří v tomto intervalu neleží. Z tohoto důvodu **je** vždy **objektivnější prezentovat výsledky s chybou 2σ** , kde je 95,4% pravděpodobnost, že dané stáří do prezentovaného intervalu spadá.

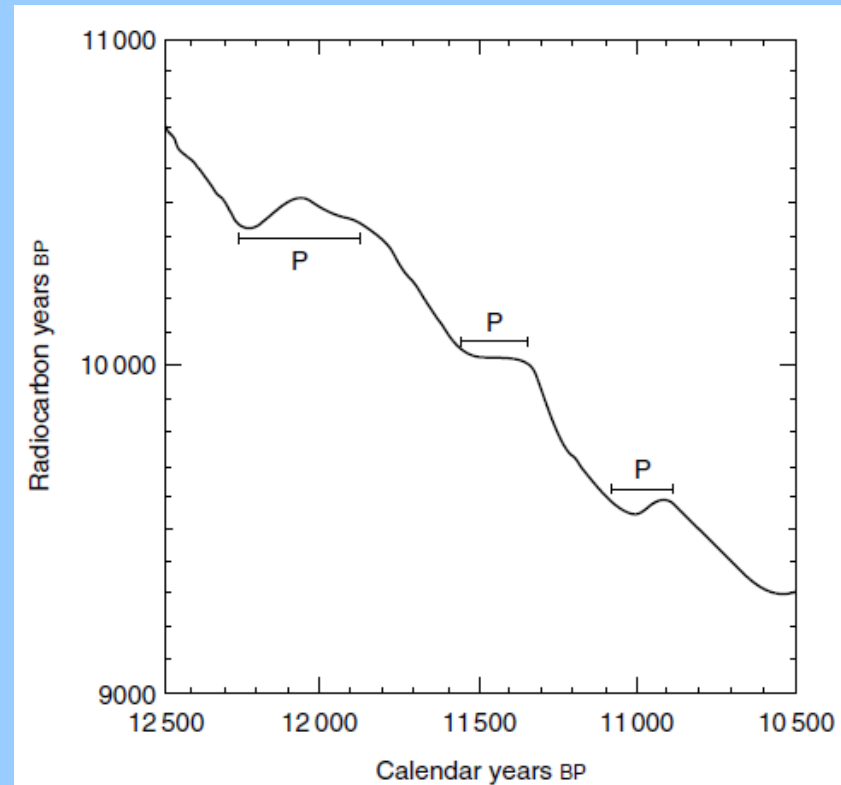
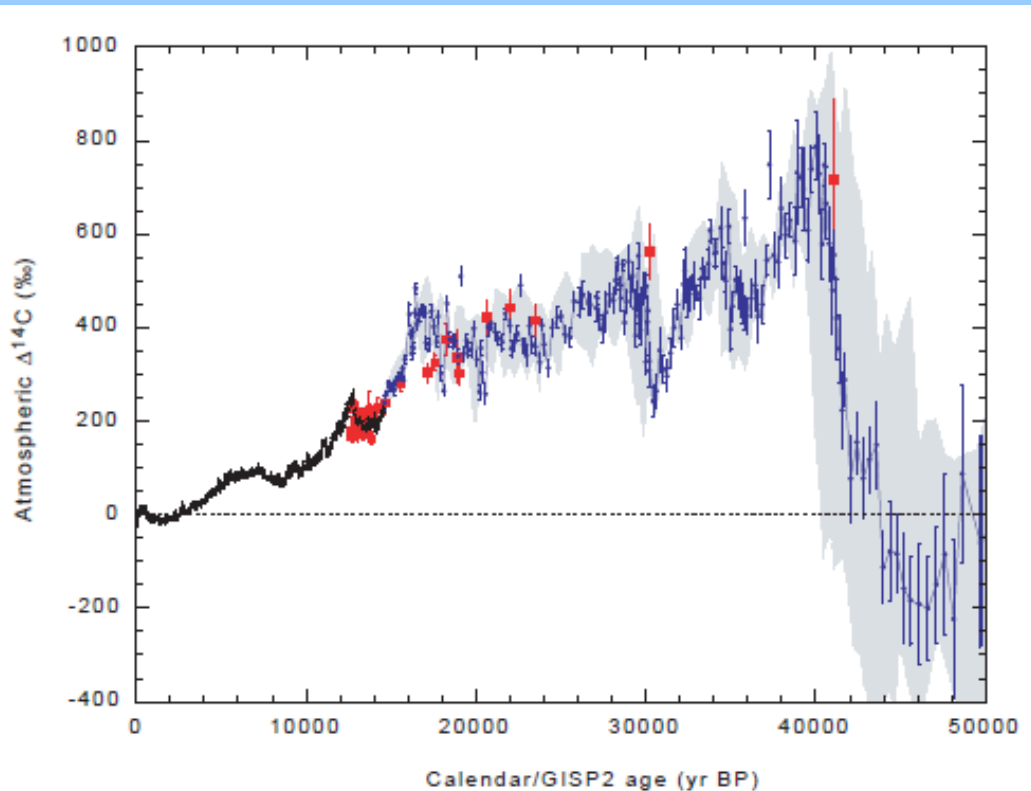
Kalibrovaná stáří je vhodnější prezentovat rozpětím (4950–5050 kal. BP), i když zápis 5000 ± 50 kal. BP se také používá.



Co to jsou radiouhlíková plata (radiocarbon plateaus)?

Časové změny v produkci atmosférického ^{14}C způsobují tzv. **radiouhlíková plata**, ta odrážejí **období snížené aktivity radiogenního uhlíku**.

Pro období >25 ka BP dochází k velkým fluktuacím koncentrací atmosférického ^{14}C , což se nepříznivě projevuje i na přesnosti radiouhlíkového datování v tomto období.



Co to je „wiggle matching“ a k čemu se používá?

Kalibrace jednotlivého data je téměř vždy spojená s významnou ztrátou jeho přesnosti. Je to proto, že kalibrační křivka není hladká a jsou známé změny v produkci radiouhlíku v čase. Pokud ale odatujete **více dobře časově zařazených bodů této křivky**, můžete tato radiouhlíková data lépe přizpůsobit tvaru časové funkce. Tato technika je označována jako „**wiggle matching**“.

Nejjednodušší je použití **letokruhů stromů** – přesně známe časový rozdíl mezi dvěma letokruhy a jejich radiouhlíková data mohou být přesně přizpůsobena průběhu kalibrační křivky. Nejlepší přizpůsobení výsledku kalibrační křivce musí být **statisticky testováno**. Obdobně mohou takto být datovány laminované sedimenty, tefra nebo i rašeliniště, pro než máme nezávislá data o stáří.

Standardně se používá **χ^2 test**, ten minimalizuje vážené sumy kvadrátů měřených bodů kalibrační křivky. V některých případech je možné, že získáte více lokálních minim, obecně však pro více než 2 měření existuje jediné nejstabilnější řešení. Dalšími rozvinutějšími statistickými metodami je **simulace Monte Carlo**, mimo klasickou statistiku lze využít **bayesiánský pravděpodobnostní přístup**.

Těchto přístupů je obecně využíváno ke **zpřesňování kalibračních křivek**.

Co je důležité si uvědomit při interpretaci radiouhlíkových dat?

- radiouhlíkovým datování **nedatujeme** stáří sedimentu, stanovujeme stáří organického materiálu, které může být mnohdy starší nebo naopak mladší, než je vlastní sediment,
- optimální pro datování sedimentace dané vrstvy jsou ulity měkkýšů v životní pozici, případně řasovo-sinicové povlaky v jezerech,
- je důležité vědět o možnosti resedimentace daného materiálu (např. kmeny stromů v holocenních říčních sedimentech – mají kořeny? jsou opracované?),
- je nutné vyloučit možnost druhotného ovlivnění („omlazení“) vzorku pedogenními a biologickými procesy,
- u jezerních a mořských vzorků je nutné počítat s rezervoárem ^{14}C v důsledku přínosu „izotopicky staršího“ uhlíku erozí a transportem z daného povodí,
- naopak provířením nezpevněných sedimentů vlněním, příbojem a proudy dochází k míchání různě starého materiálu,
- pokud datujeme shořelý dřevěný srub – nezískáme stáří požáru, ale stáří uříznutí stromu, ze které je konstrukce postavena (což může být rozdíl mnoha desetiletí i několika století), tedy daný objekt je vždy mladší (tedy jeho stavba a samozřejmě jeho zánik požárem)
- pozor na hroby, člověk dělá nepředvídatelné věci, protože ukládá své pozůstalé pod zem (viz např. paleolitická žena ze Svitávky, která je slovanského stáří),

Kosmogenní radionuklidy

Sekundární radiací mezonů K a π (rozpadajících se na miony) a zejména energetických nukleonů (nejčastěji neutronů s energií >10 MeV) vznikají přímo na zemském povrchu **in situ tvořené kosmogenní radionuklidy** (TCN – terrestrial in situ cosmogenic nuclides: ^3He , ^{10}Be , ^{21}Ne , ^{26}Al , ^{36}Cl , ^{41}Ca).

In situ produkce kosmonuklidů:

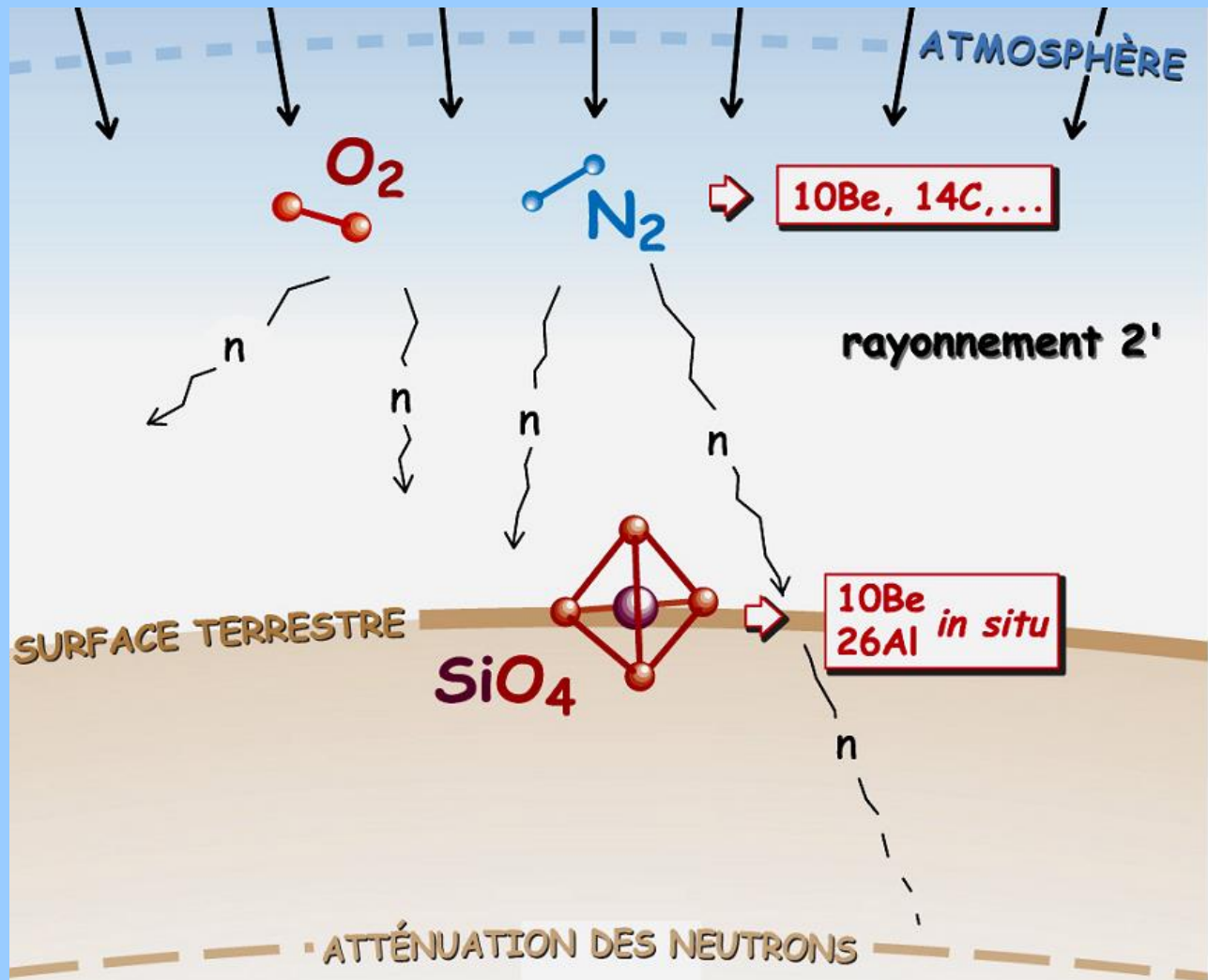
^3He : 75–100 at·g⁻¹·a⁻¹

^{10}Be : 4–7 at·g⁻¹·a⁻¹

^{21}Ne : 18–21 at·g⁻¹·a⁻¹

^{26}Al : 30–36 at·g⁻¹·a⁻¹

^{36}Cl : 8–10 at·g⁻¹·a⁻¹



V jakém materiálu kosmogenní nuklidy vznikají, tedy jaký materiál můžeme analyzovat?

^3He – olivín, pyroxen, amfibol, granát

^{10}Be – křemen, olivín, magnetit, plagioklas, pyroxen

^{21}Ne – křemen, olivín, granát, plagioklas

^{26}Al – křemen

^{36}Cl – K-živce, kalcit, plagioklas, chlorit, fluidní inkluze v křemeni

Jaké jsou výhody a nevýhody použití jednotlivých nuklidů?

nuklid

+

-

^{10}Be

- hojnost křemene,
- jednoduchá příprava vzorků,
- dobře známé chemické chování křemene,
- odolnost křemene vůči chem. zvětrávání,
- vzorky mohou být připravovány zároveň i pro ^{26}Al a ^{21}Ne ,
- obdobně může být využit i olivín,
- dlouhý poločas rozpadu (1,387 Ma; vhodný pro datování dlouhých expozičních)

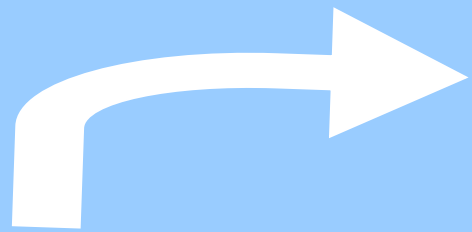
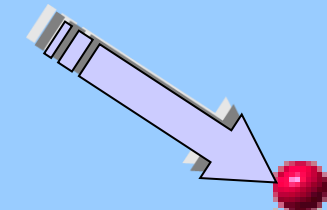
- atmosférický ^{10}Be a ^{10}B je potenciálním kontaminantem, nutné speciální detektory k „odlovení“ bóru,
- má nejnižší produkci, takže datování mladých procesů není možné

Produkce ^{10}Be v krystalové mřížce křemene

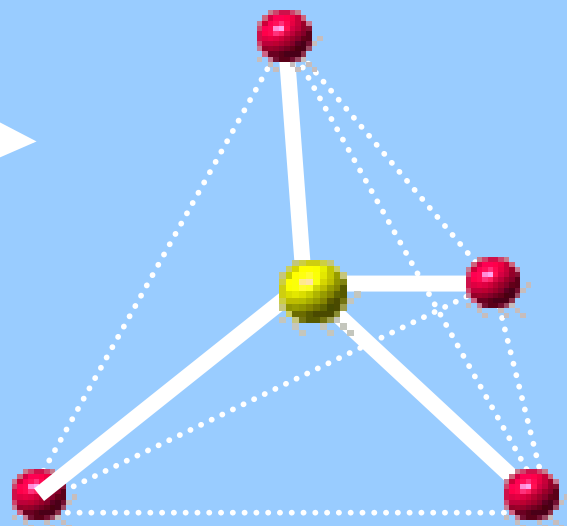
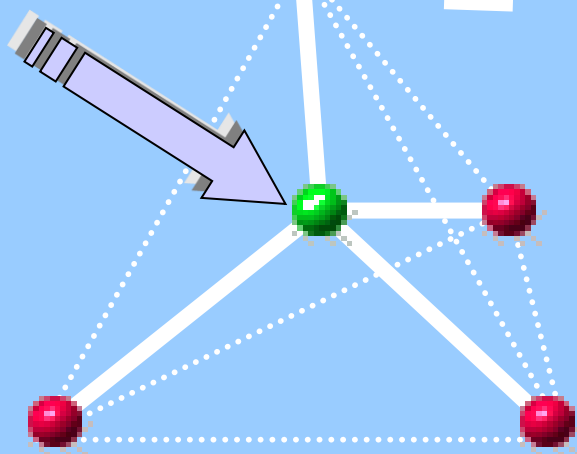
^{10}Be atm $T_{1/2} = 1.387 \pm 0.012$ Ma

sekundární radiace (>10 MeV)

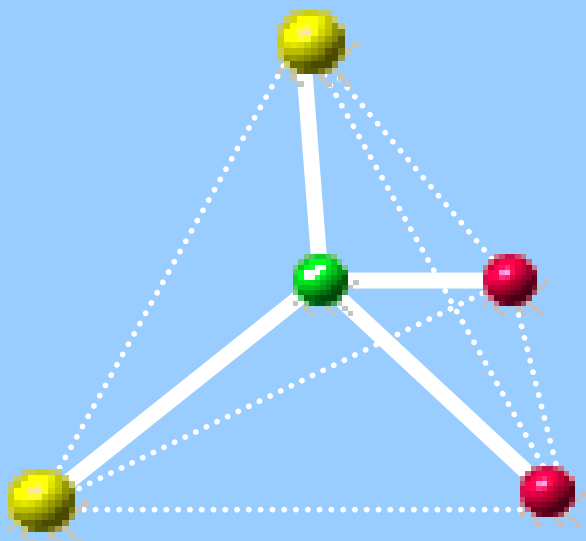
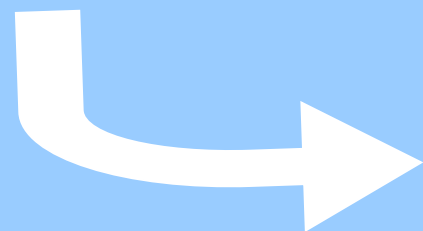
energetické nukleony



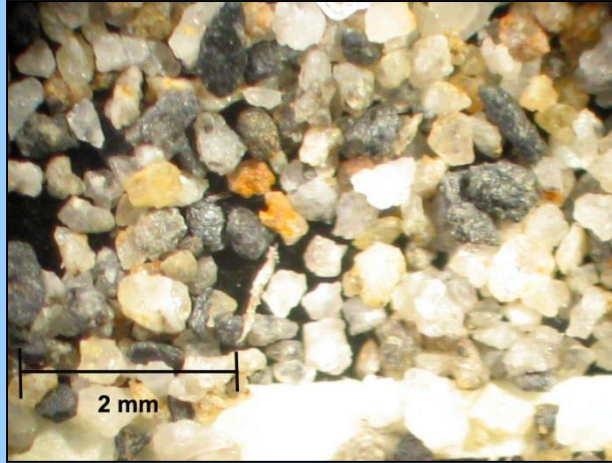
mezony



- ^{10}Be 
- ^{16}O 
- ^{28}Si 



Příprava vzorků před AMS měřením



rozpuštění v
HCl a H_2SiF_6

čisté SiO_2

rozpuštění
v HF (částečné
a celkové)
+
spike ^9Be



extrakce ^{10}Be

srážení
oxidace

BeO

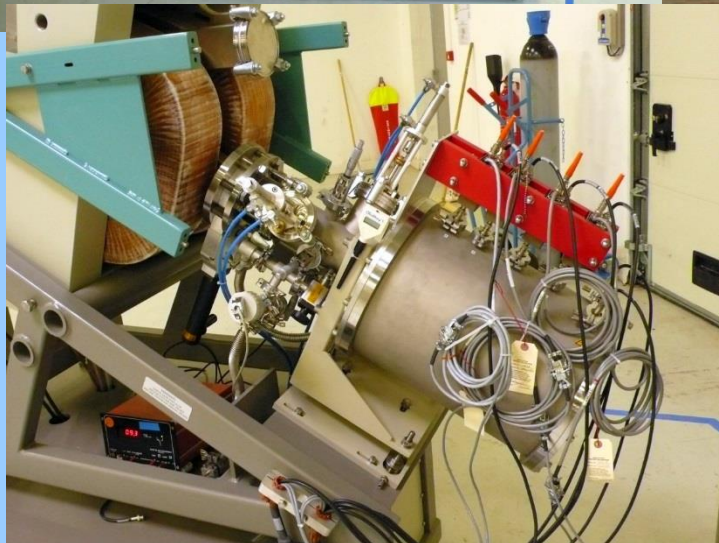
umístění do
katody



AMS
měření



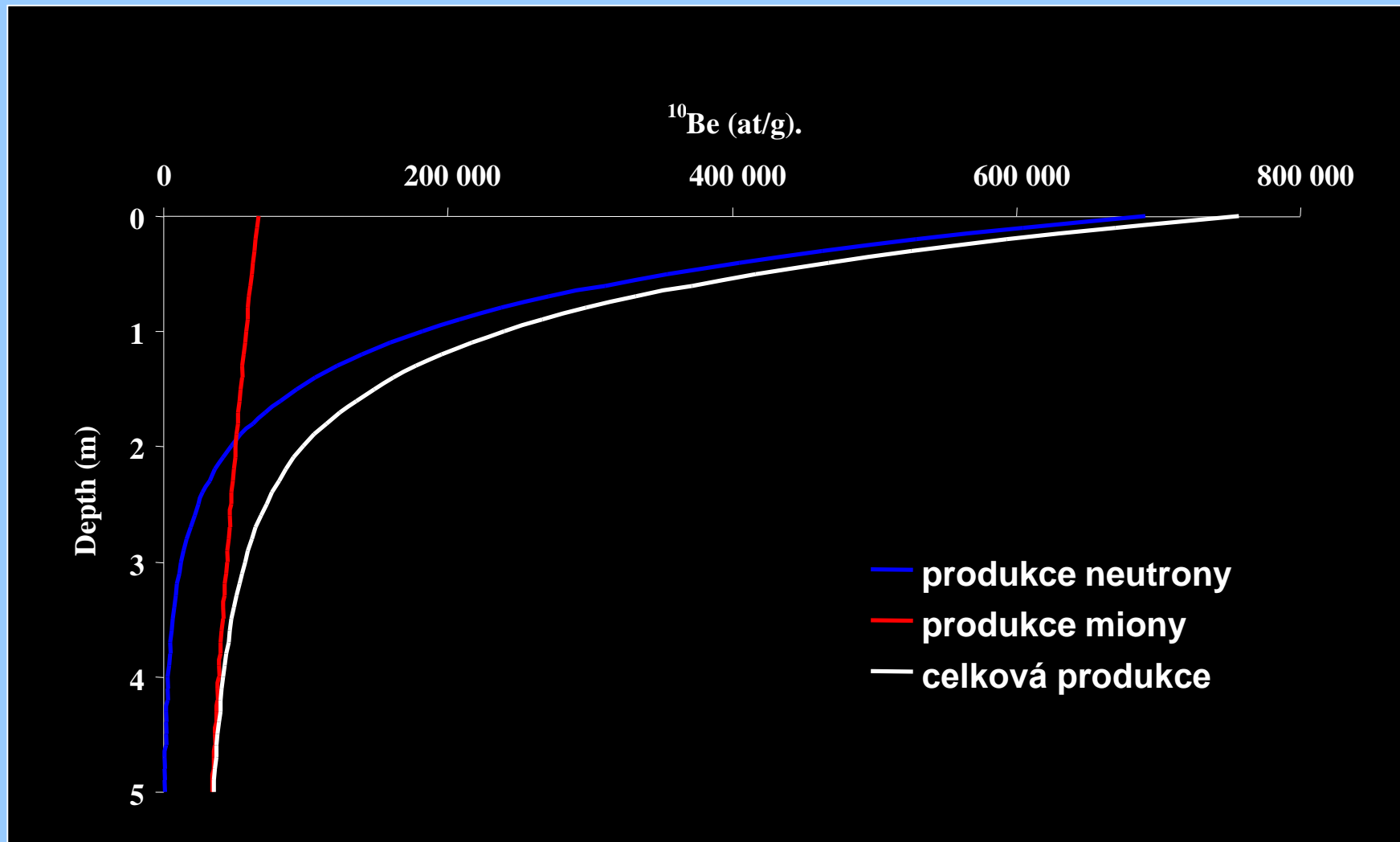
ASTER 5MV (CEREGE, Aix-en-Provence)



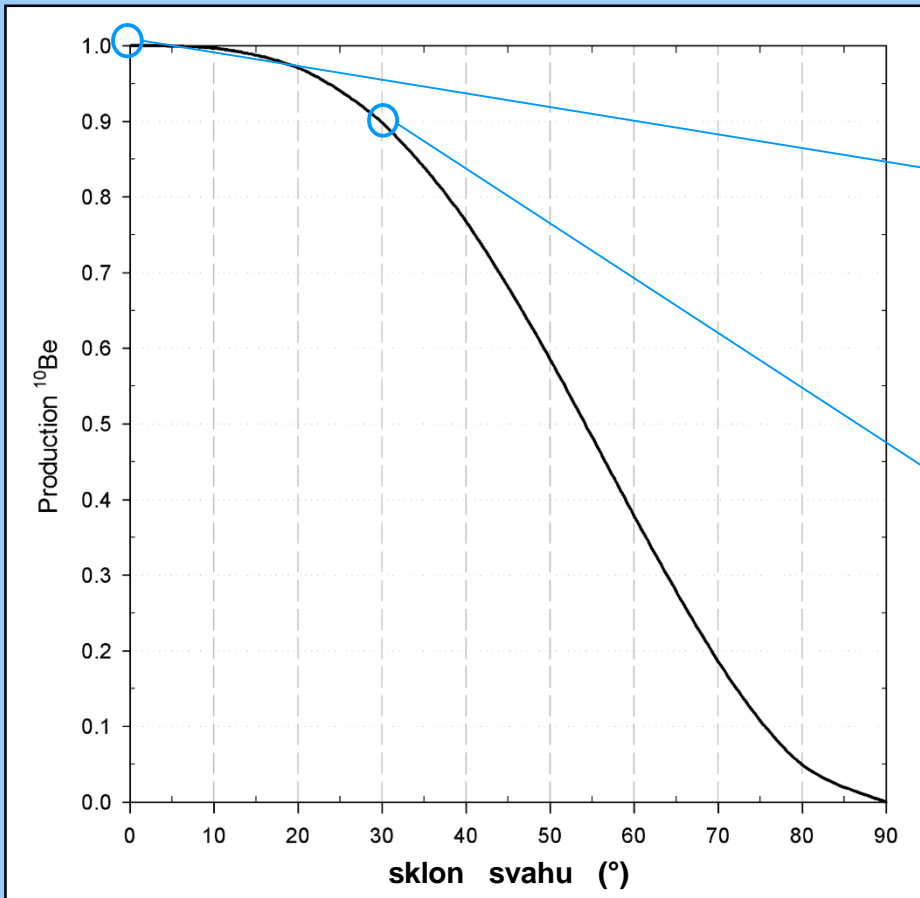
Rychlost *in situ* produkce ^{10}Be

$$\frac{dC}{dt} = \underbrace{P_0 \times \exp\left(-\frac{x}{L}\right)}_{\text{přírůstek}} + \underbrace{\varepsilon \times \frac{dC}{dx} - \lambda \times C}_{\text{úbytek}}$$

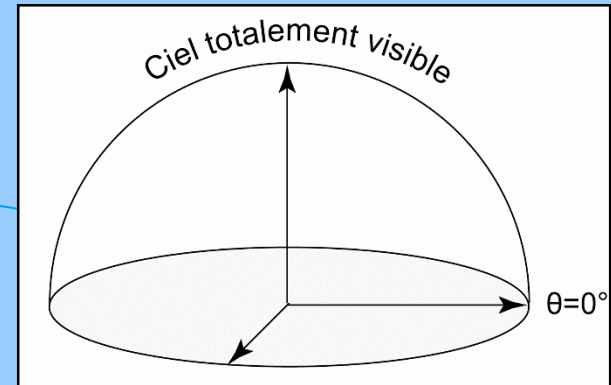
Koncentrace ^{10}Be v závislosti na hloubce



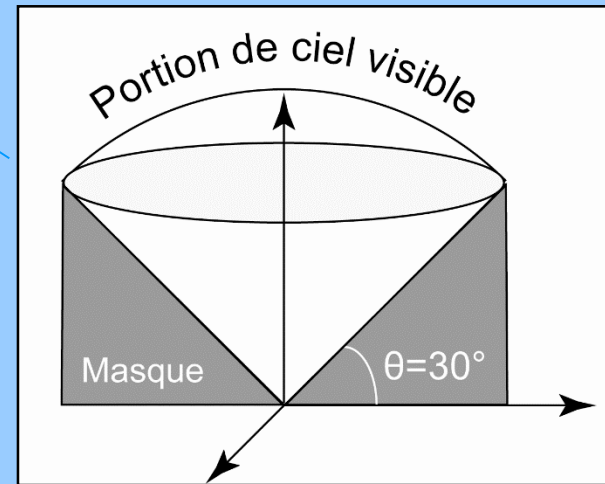
In situ produkce ^{10}Be je ovlivněná zastíněním reliéfem



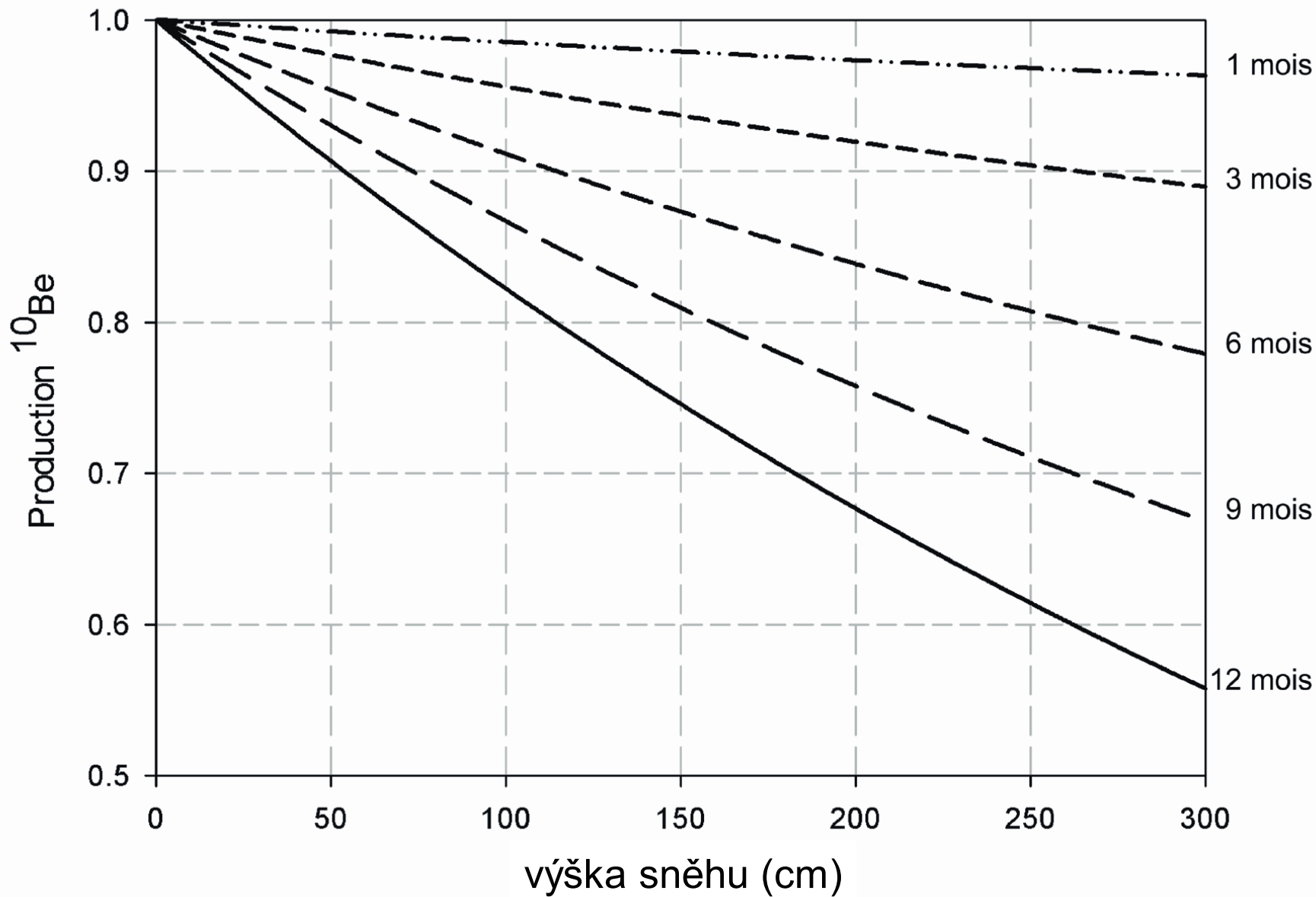
bez zastínění



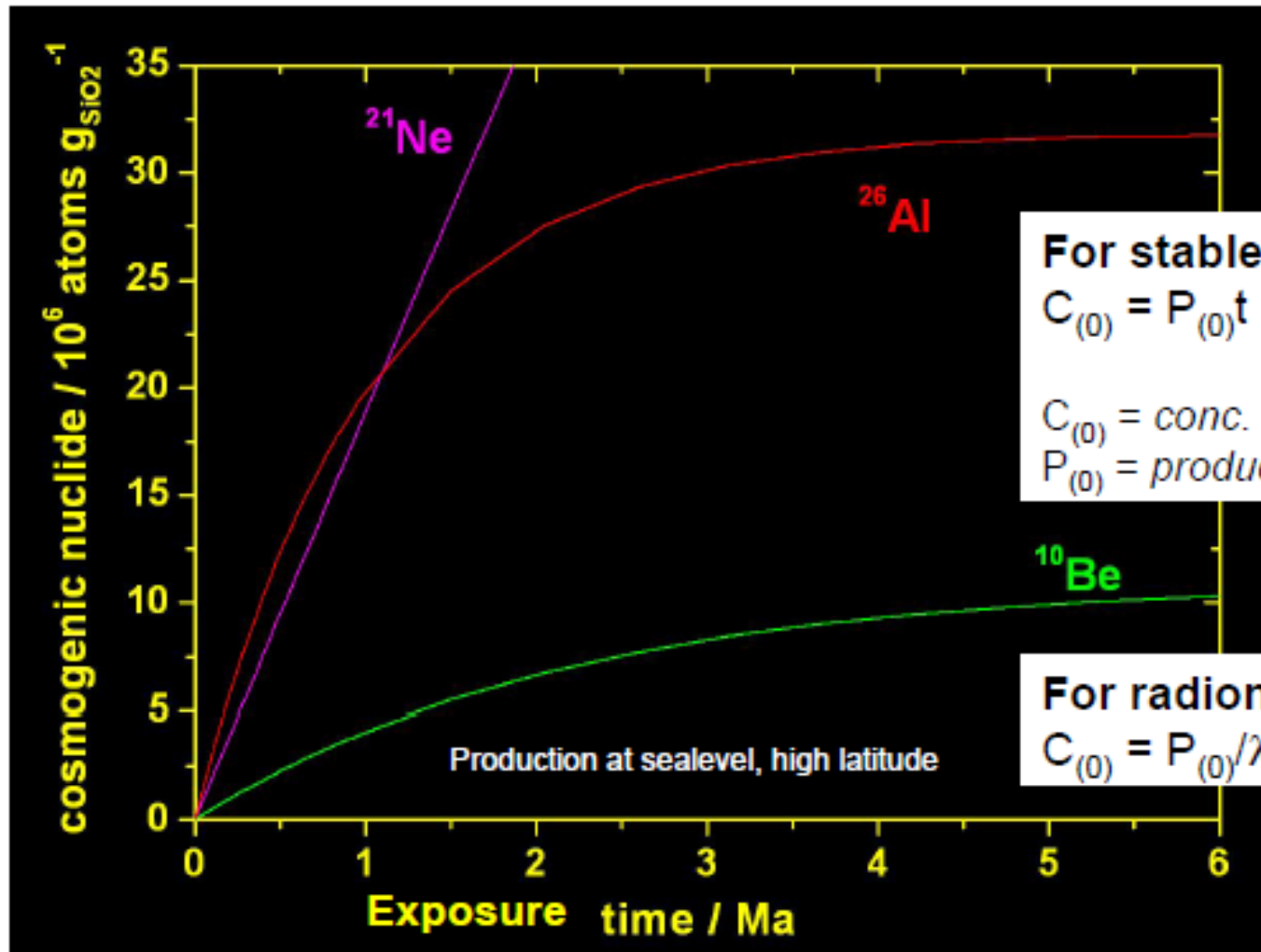
zastínění



In situ production ^{10}Be je ovlivněná pokryvem sněhu



In situ produkce kosmonuklidů při nulové erozi povrchu



For stable nuclides (e.g. ^{21}Ne):

$$C_{(0)} = P_{(0)}t$$

$C_{(0)}$ = conc. at surface

$P_{(0)}$ = production rate at surface

For radionuclides (^{26}Al , ^{10}Be):

$$C_{(0)} = P_{(0)}/\lambda(1-e^{-\lambda t})$$

Využití *in situ* tvořených kosmonuklidů pro datování

Nezákladnější předpoklady:

- nulová eroze povrchu,
- žádný zděděný podíl kosmogenního nuklidu z předchozí expozice,
- jednoduchá historie expozice povrchu (bez překrytí např. sněhem)



stáří expozice daného povrchu

Vzhledem k tomu, že výše zmíněné **předpoklady** téměř nikdy **neplatí** (téměř vždy je každý **povrch erodován**) je nutné brát takto získané **stáří** jako **minimální**.

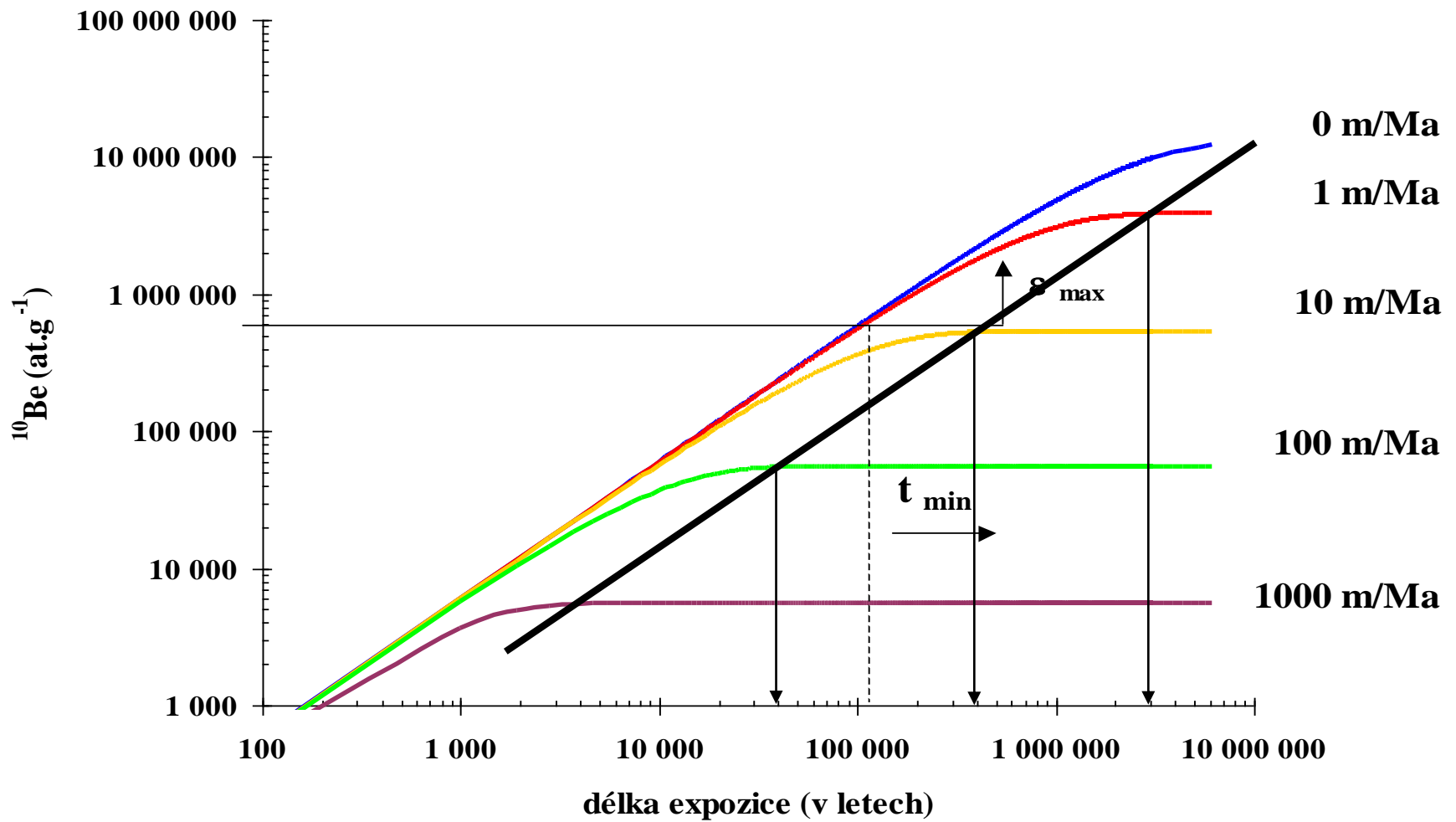
trocha matematiky pro vlastní výpočet délky expozice povrchu...

$$C(\mathbf{x},t) = (1-X) \times \frac{P_o \times \exp(-\frac{\mathbf{x}}{L_n})}{\frac{\varepsilon}{L_n} + \lambda} \times \left(1 - \exp(-t \times (\frac{\varepsilon}{L_n} + \lambda)) \right)$$

+

$$(X) \times \frac{P_o \times \exp(-\frac{\mathbf{x}}{L_\mu})}{\frac{\varepsilon}{L_\mu} + \lambda} \times \left(1 - \exp(-t \times (\frac{\varepsilon}{L_\mu} + \lambda)) \right)$$

Závislost povrchové koncentrace ^{10}Be na erozi povrchu



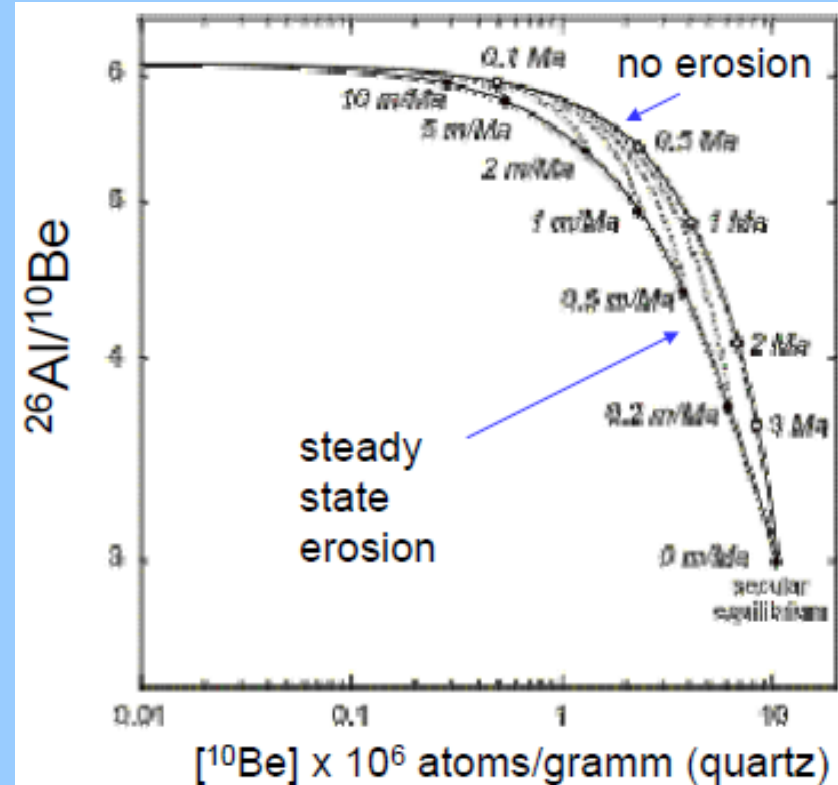
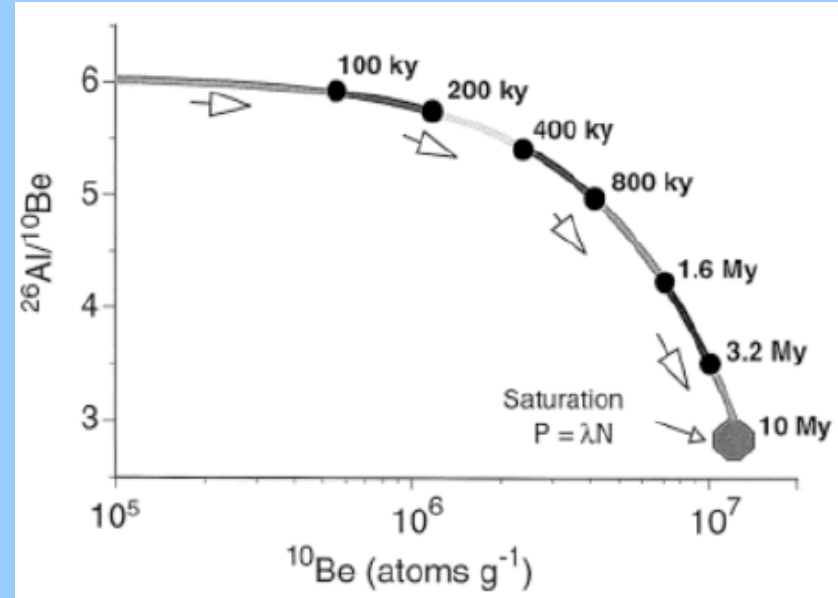
Banánový graf

Při měření obou nuklidů ^{10}Be a ^{26}Al můžeme s výhodou využít jejich rozdílné *in situ* produkce. ^{26}Al vzniká 6x rychleji a zároveň se 2x rychleji rozpadá.

Linie na vnější straně banánu je izotopovou trajektorií vzorku trvale exponovaného na povrchu, tedy s nulovou erozí povrchu.

Naopak u vzorků pocházejících z povrchu erodovaného (dlouhodobě) rovnovážnou rychlostí eroze leží body na vnitřní straně banánu. Tenké linie jsou trajektoriemi vzorků, které odpovídají daným (dlouhodobým) rychlostem eroze.

Vzorky, které byly pohřbené, budou ležet pod banánem. Vzorky, které nebyly pohřbené bude uvnitř banánu.



Výpočet expozičního stáří povrchu kosmogenními radionuklidy

CRONUS-Earth online calculators (<http://hess.ess.washington.edu/math/>)

CosmoCalc (An Excel Add-In for cosmogenic nuclide calculations)

(<http://sites.google.com/site/cosmocalc/>)

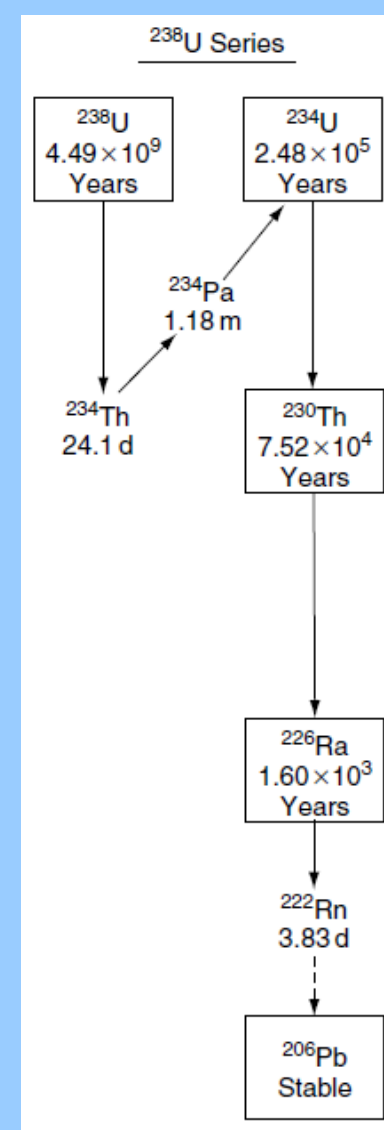
Aplikace kosmogenních radionuklidů



- | | | |
|--|---|----------------------------------|
| ① glacial chronologies
(alpine, ice-sheets) | ⑤ catchment wide
denudation rates | ⑨ volcanic eruption chronologies |
| ② fluvial chronologies
(terraces, incision) | ⑥ burial chronologies
(caves, terraces, paleosols) | ⑩ desert chronologies |
| ③ shoreline chronologies
(terraces, lacustrine, marine) | ⑦ landslide chronologies | ⑫ archeology |
| ④ hillslope rates | ⑧ fault scarp chronologies | ⑬ pedogenic chronologies |

Terigenní radionuklidy Produkty rozpadové řady ^{238}U

- **uran-thoriová metoda** je založená na **stanovení stáří** na základě stupně ustavené rovnováhy mezi rozpadem dceřinného izotopu ^{230}Th a mateřského izotopu ^{234}U ,
- protože je poločas rozpadu dceřinného izotopu kratší, než je poločas rozpadu izotopu mateřského, odpovídá v případě **dlouhodobé rovnováhy** množství rozpadů ^{230}Th za jednotku času množství rozpadů ^{234}U za stejný čas,
- pokud však systém není uzavřený (např. dochází k úniku radonu difuzí nebo ochuzování o vybrané izotopy zvětráváním a erozí) taková rovnováha nemůže být ustavena,
- uran je rozpustný ve vodě a proto jakýkoliv materiál, který se z takovéto vody vysráží bude obsahovat uran (typicky 0,01–100 ppm), proto je tato **metoda** vhodná k **datování mořských** (korálů) i **pevninských karbonátů** (speleotém),
- horní datovatelný limit je ~ 500 ka.



$$1 - \left(\frac{^{230}\text{Th}}{^{238}\text{U}} \right) = e^{-\lambda_{230}T} - \left[\left(\frac{^{234}\text{U}}{^{238}\text{U}} \right) - 1 \right] \left(\frac{\lambda_{230}}{\lambda_{230} - \lambda_{234}} \right) \times (1 - e^{(\lambda_{234} - \lambda_{230})T})$$

aplikace

- datování korálů, rychlosti jejich přírůstku, glacieustatické změny mořské hladiny (využití pro kalibrační křivku Fairbanks05)

- datování přírůstků speleotém čínské jeskyně Hulu (využití pro kalibrační křivku CalPal-2007-Hulu)

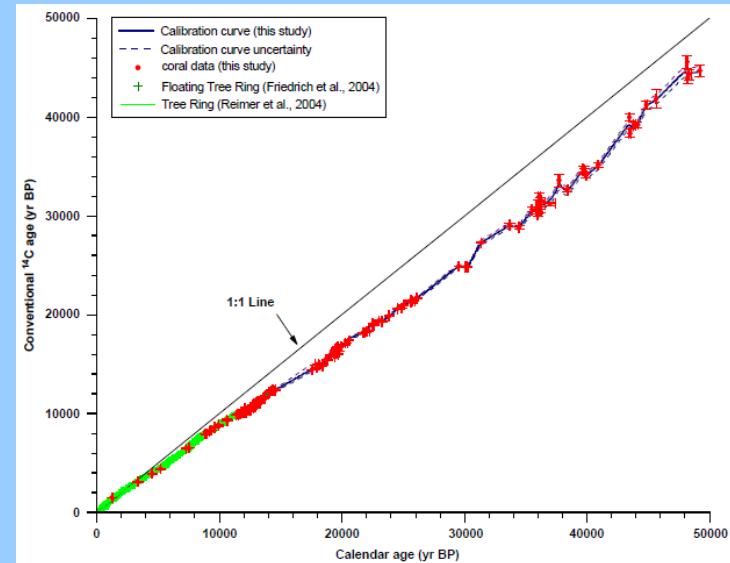
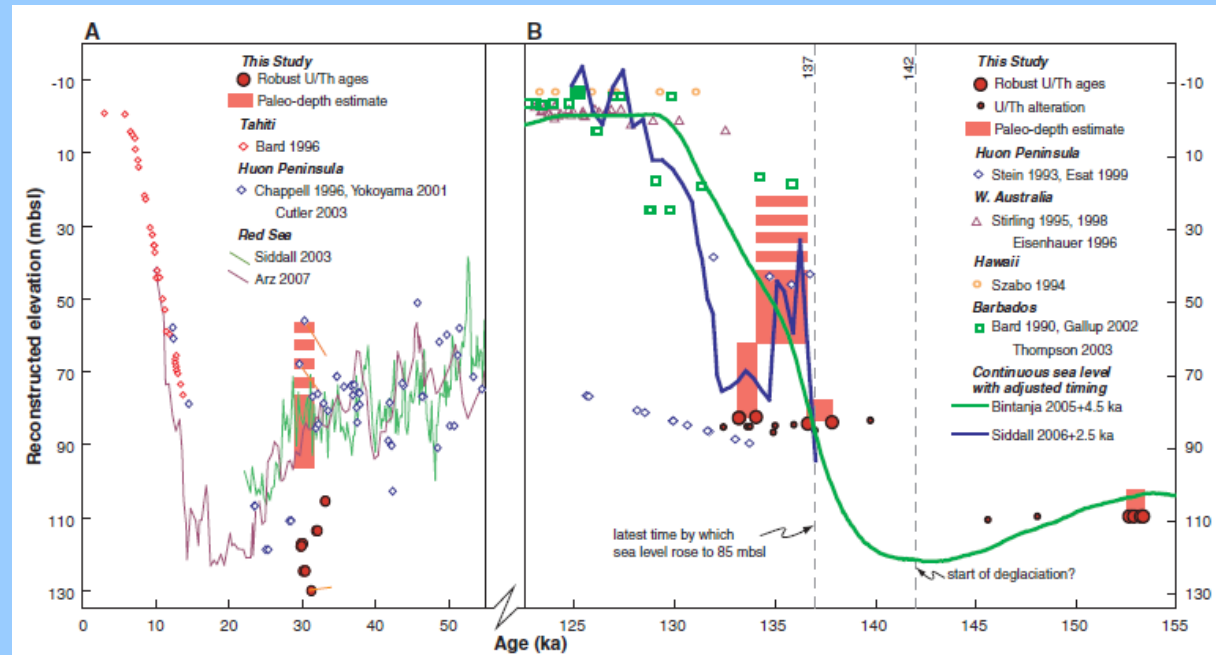
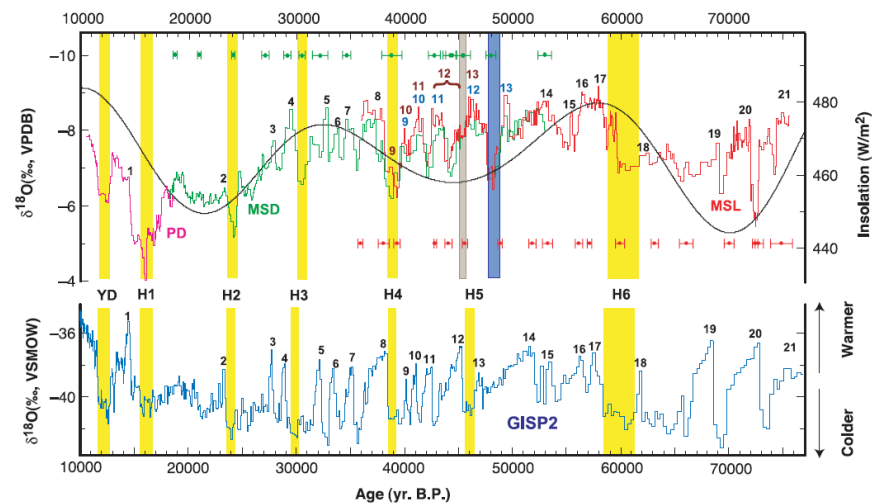


Fig. 1. $\delta^{18}\text{O}$ of Hulu Cave stalagmites (purple, green, and red) and Greenland Ice (22) (dark blue) and insolation at 33°N averaged over the months of June, July, and August (20, 21) (black) versus time. ^{230}Th ages and errors are color-coded by stalagmite. Numbers indicate GISS and correlated events at Hulu Cave. The YD and Heinrich events are depicted with vertical bars (24). The brown and blue bars indicate two possible correlations to H5. The average number of years per $\delta^{18}\text{O}$ analysis is 130 for MSD and 140 for MSL. The $\delta^{18}\text{O}$ scales are reversed for Hulu (increasing down) as compared with Greenland (increasing up).



aplikace

- datování přírůstků speleotém v severním Norsku – teplotní záznam $\delta^{18}\text{O}$ podpořený U/Th datováním pro posledních 10,4 ka (SG93)

další materiál vhodný k datování:

vulkanity, železité konkrce, škeble, travertiny, fosfáty,

- pokusy s datováním reziduálních karbonátů v rašelinách, jezerních sedimentech nebo v zubech, či kostech (např. datování Choukuotienů)

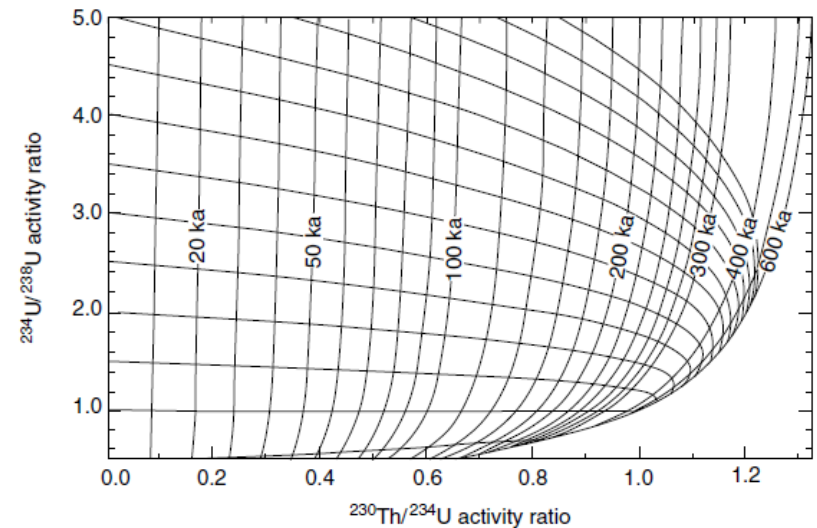
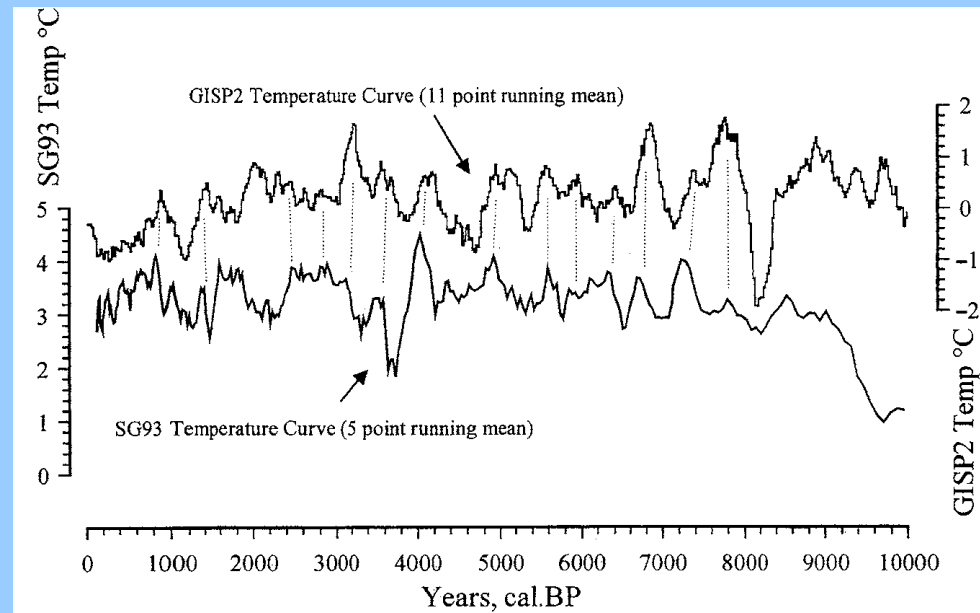
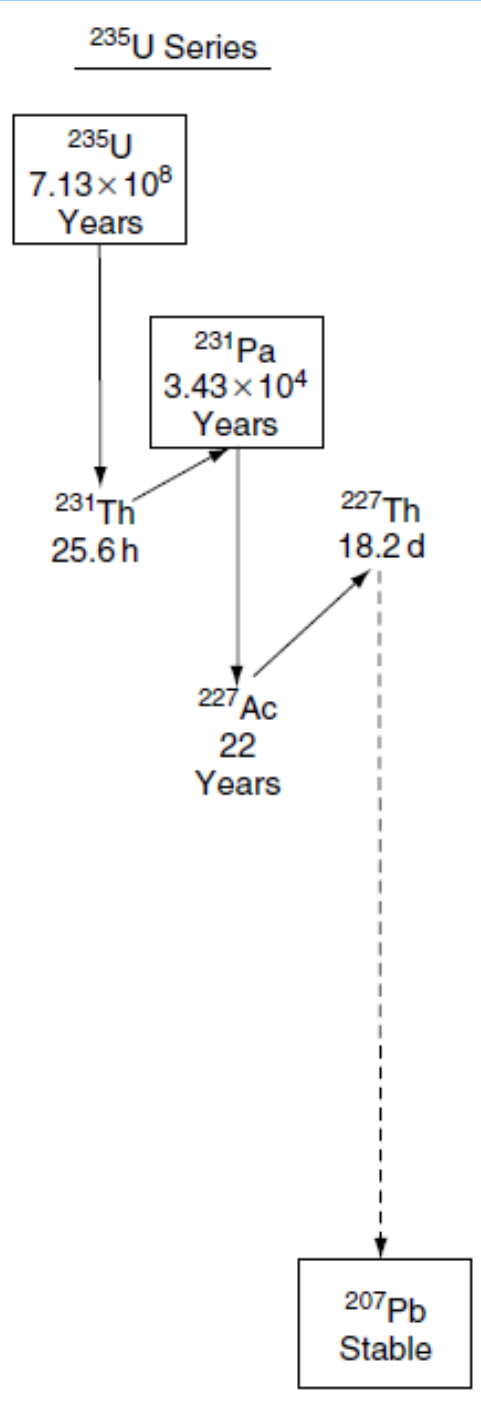
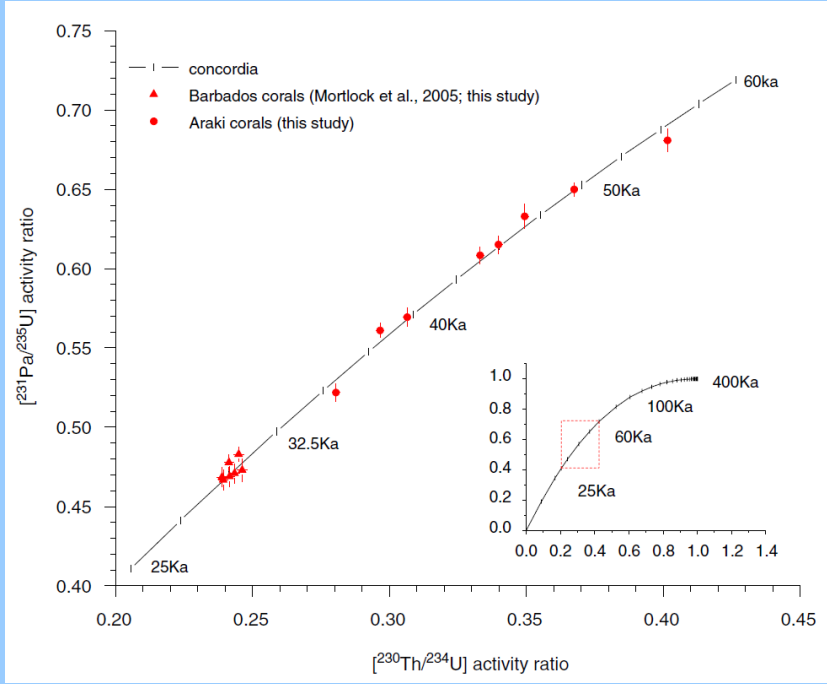


Figure 3.7 Variation of $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ and $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ activity ratios with time in a closed system where there is no initial ^{230}Th present. The near vertical lines are lines of constant age (isochrons), while the near horizontal lines show changes in nuclide activity with time for different initial $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ activity ratios (after Heijnis, 1995)

Produkty rozpadové řady ^{235}U

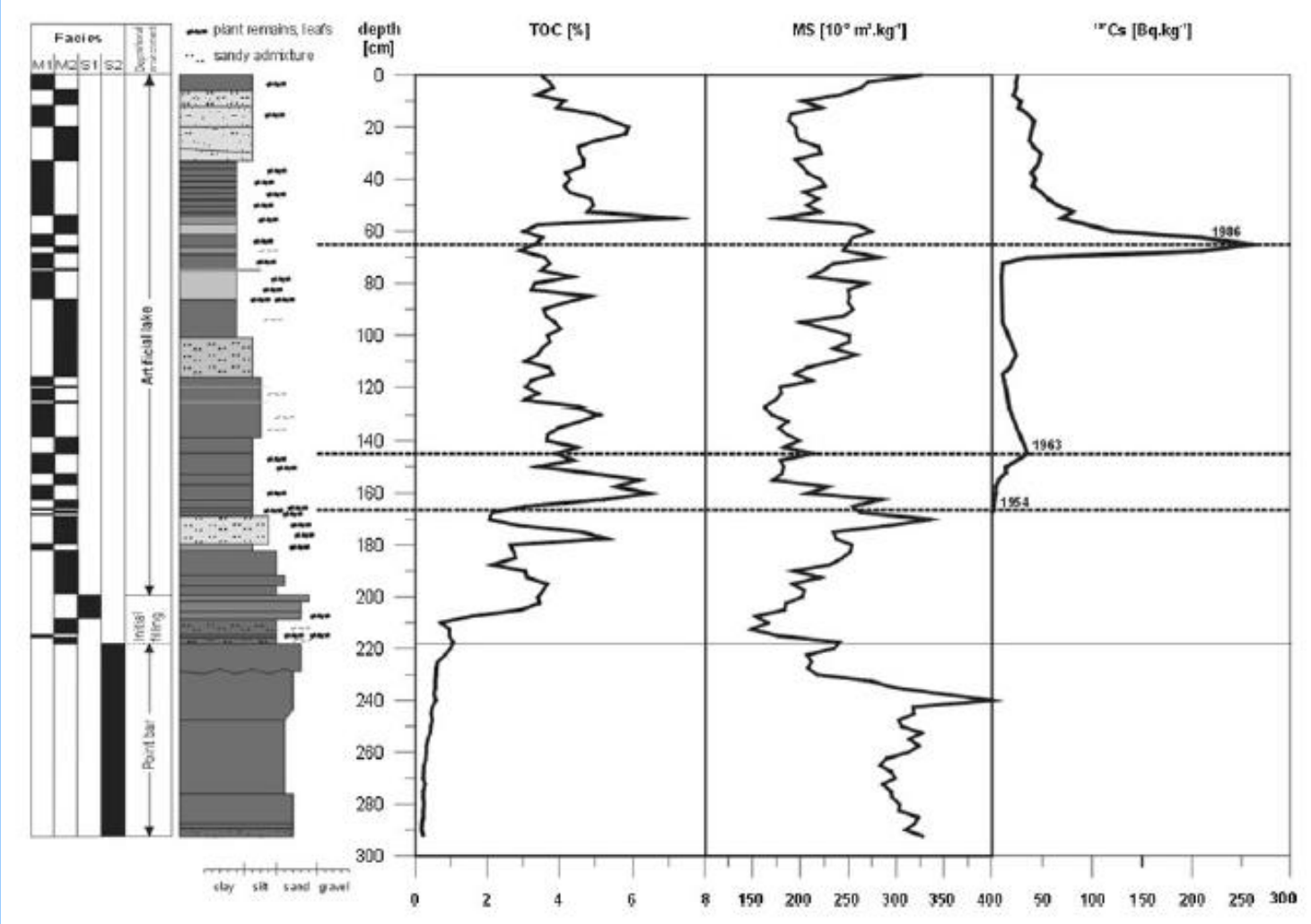
- uran-protaktiniová metoda ($^{231}\text{Pa}/^{235}\text{U}$) je také použitelná pro datování mladých událostí lze také užít poměru,
- protaktinium (obdobně jako thorium) není na rozdíl od uranu rozpustné ve vodě,
- stejné aplikace jako u uran-thoriové metody, tedy vhodné k **datování mořských** (korálů) i **pevninských karbonátů** (speleotém),
- dosah metody ~ 200 ka



Datování pomocí izotopů s krátkým poločasem rozpadu

^{137}Cs (poločas rozpadu 30 let), vhodné pro jezerní sedimenty, rašeliny

- vzniká v důsledku termojaderných výbuchů, v prostředí se významněji objevuje kolem roku **1954**, maximum v roce **1963/1964** a pro severní polokouli události v letech **1986** a **2011**.

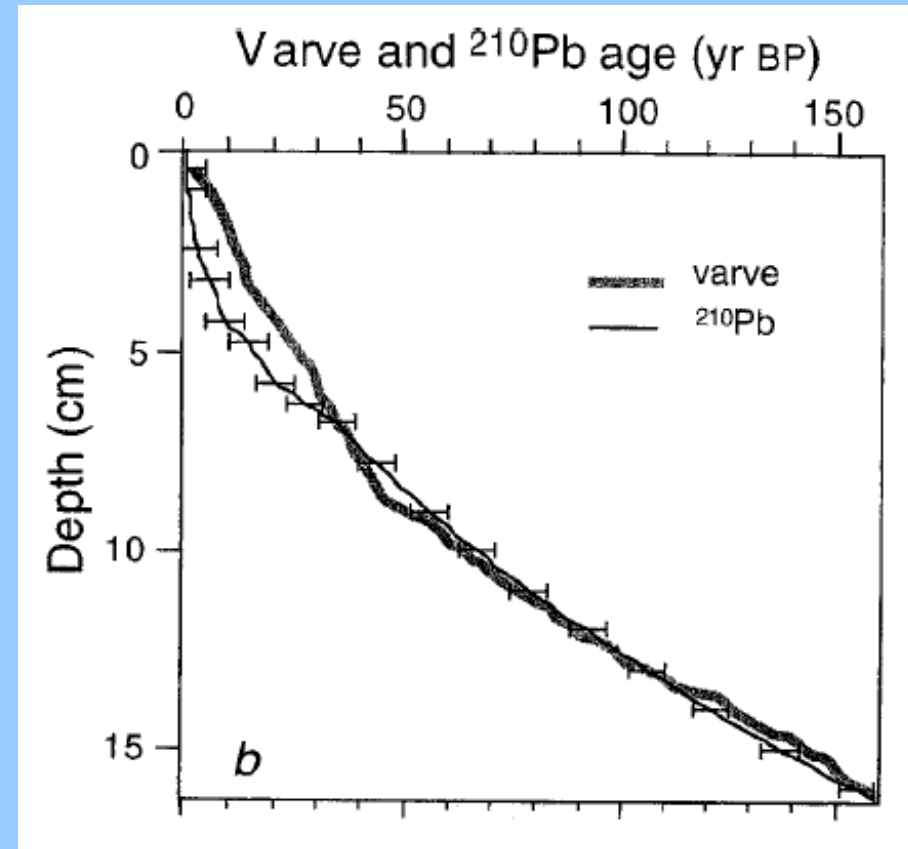


^{210}Pb (poločas rozpadu 22,26 let), vzniká rozpadem ^{222}Rn a rozpadá se na ^{206}Pb , které je již stabilní

- použitelnost pro posledních ~ 200 let, **pro jezerní sedimenty, rašeliny**
- dva modely pro výpočet stáří:

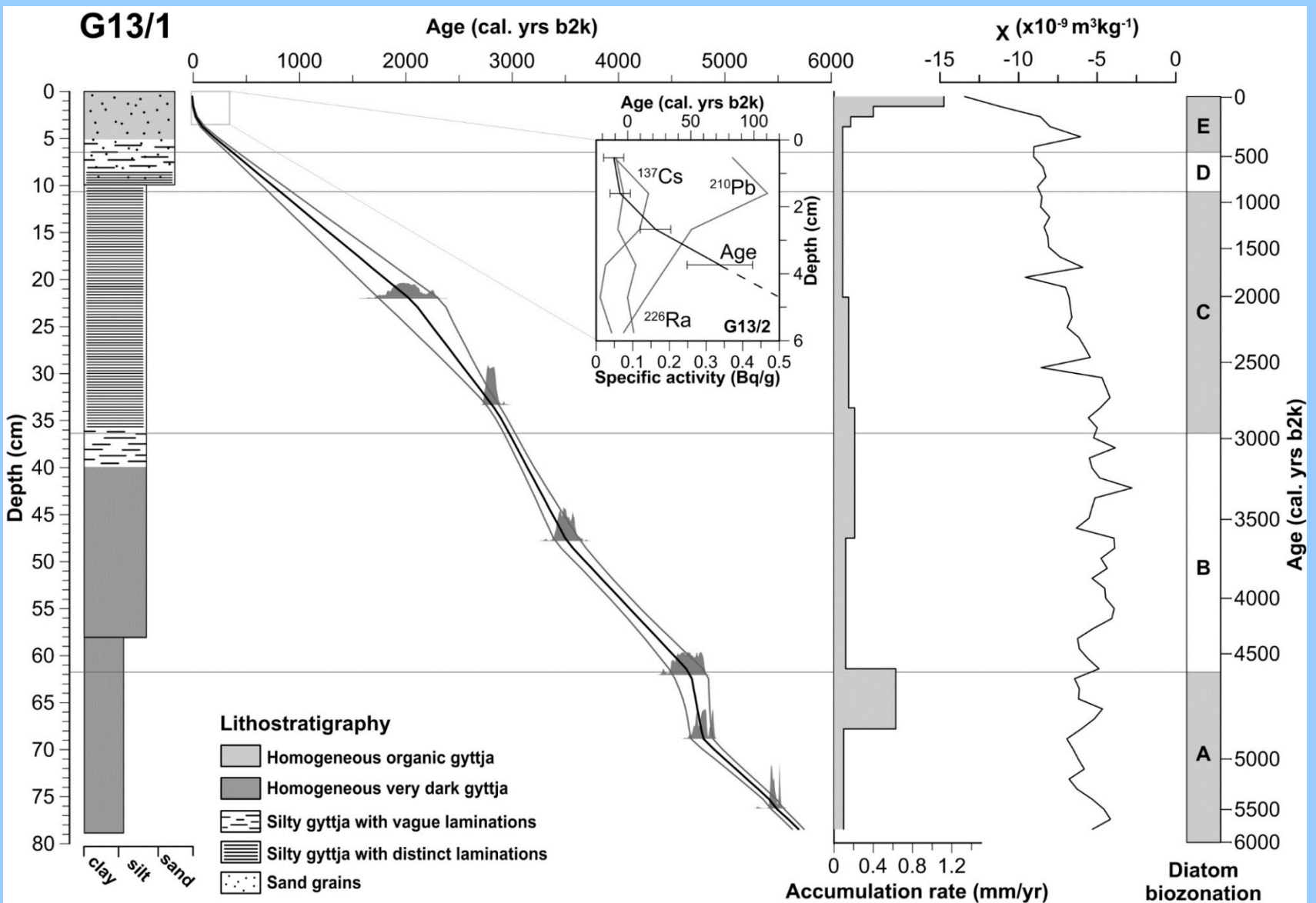
1) **konstantní počáteční koncentrace (CIC) ^{210}Pb** v rámci celého profilu, což v průběhu času vede k monotónnímu úbytku koncentrací ^{210}Pb směrem do hloubky. Bohužel změny v rychlosti sedimentace v dané pánvi obvykle neumožní konstantní počáteční koncentraci ^{210}Pb .

2) Proto je častěji využíván druhý model, který předpokládá **konstantní rychlost přísunu (CRS) ^{210}Pb** během posledních 150–200 let.



Časově-hlubkový model depoziční historie u kontinuálních sedimentárních záznamů

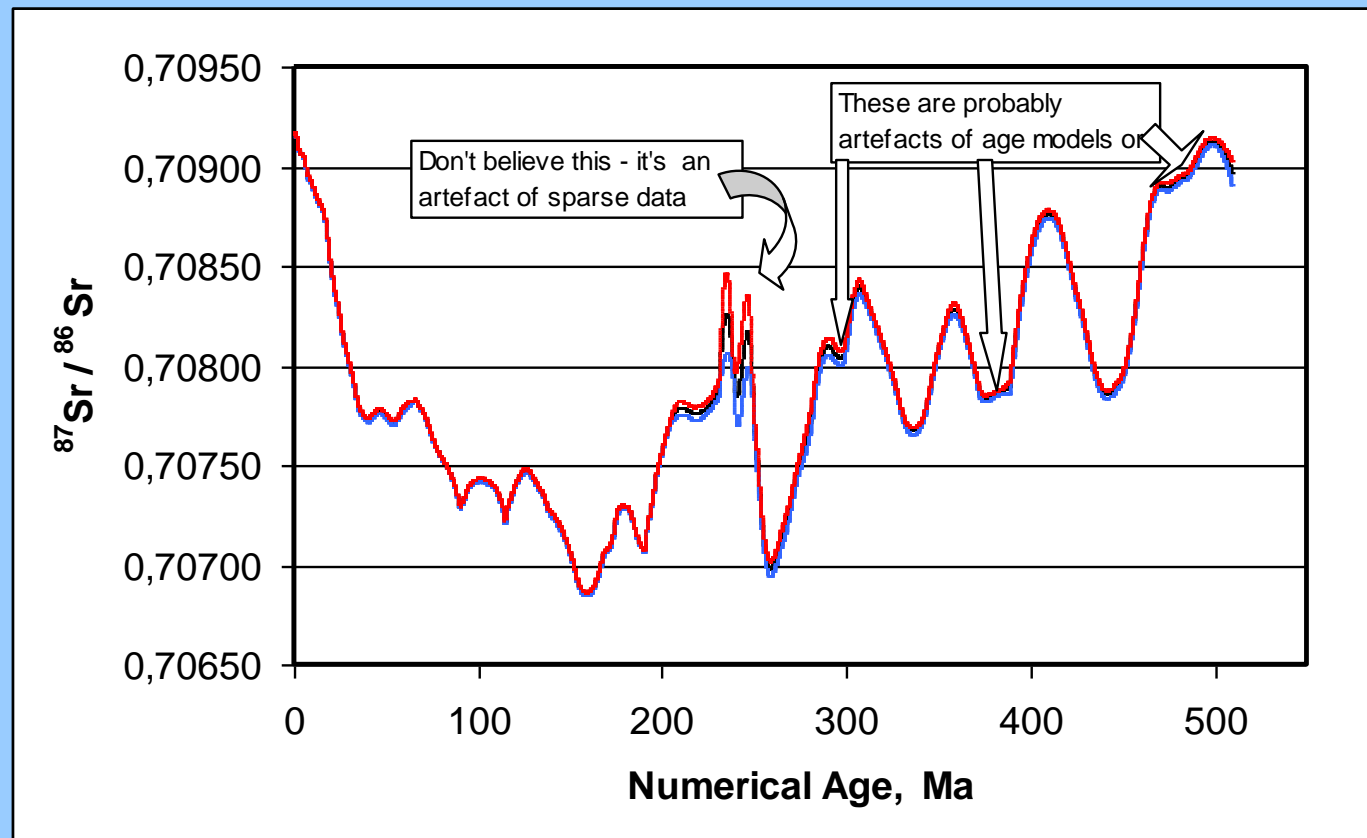
R-code modelování s použitím vhodných geochronologických metod



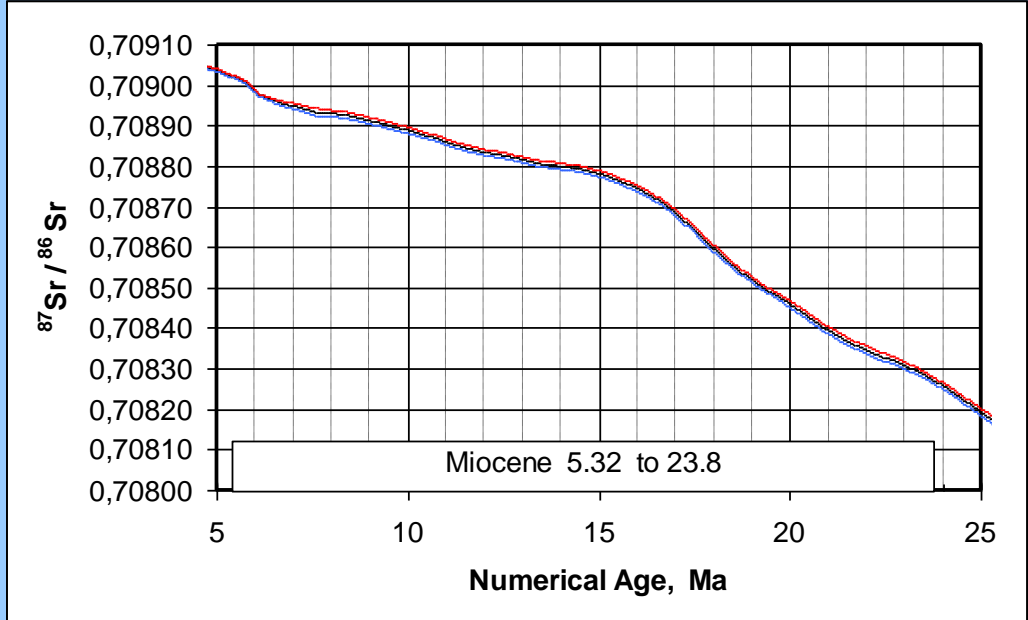
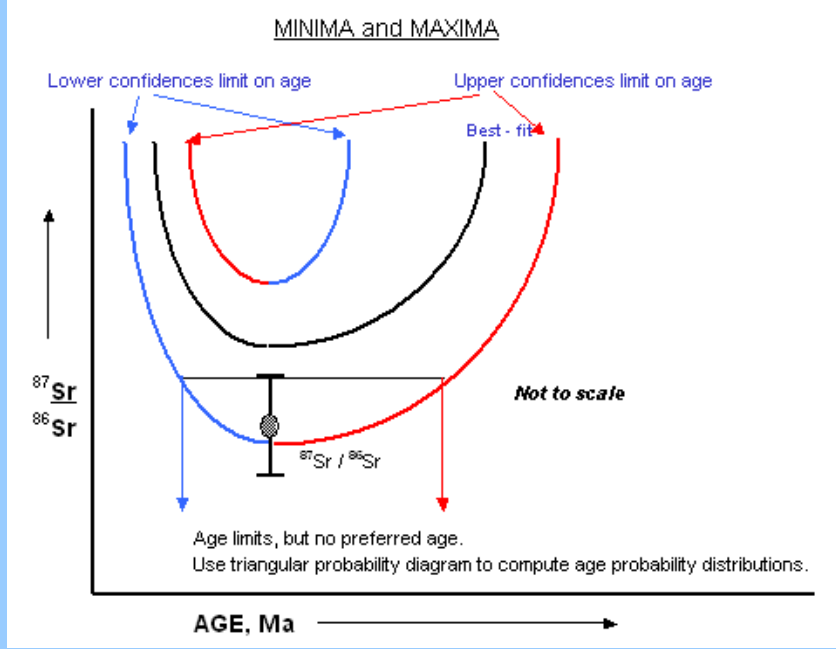
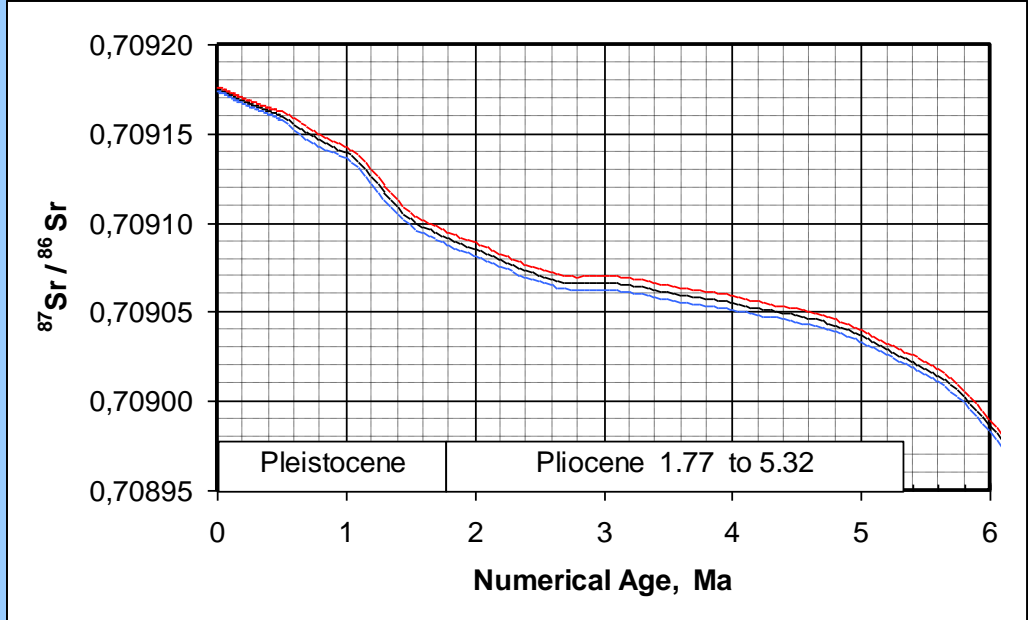
Stronciové datování mořských organismů a sedimentů

Poměr $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ v biogenně a chemogenně vzniklých **mořských organismech a sedimentech se** během fanerozoika **mění**. Poměr $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ v mořské vodě je závislý na poměrech $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ v horninách, které jsou do moří erodovány a kterými sladká voda ještě na pevninách protéká. **Intenzivní vulkanická aktivita** během některých období přináší do oceánu materiál **s nízkým poměrem $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$** , proti tomu působí **snos hornin kontinentální kůry s vysokým poměrem $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$** do oceánů v obdobích bez významnější vulkanické aktivity.

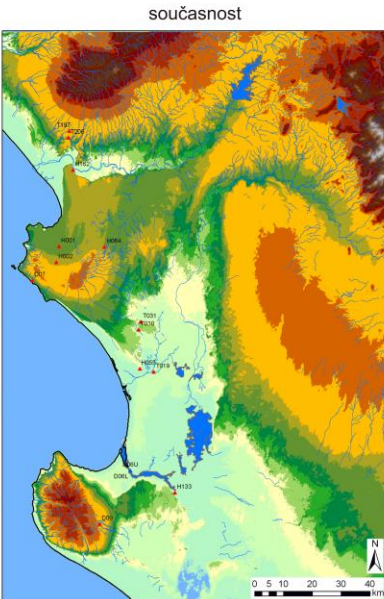
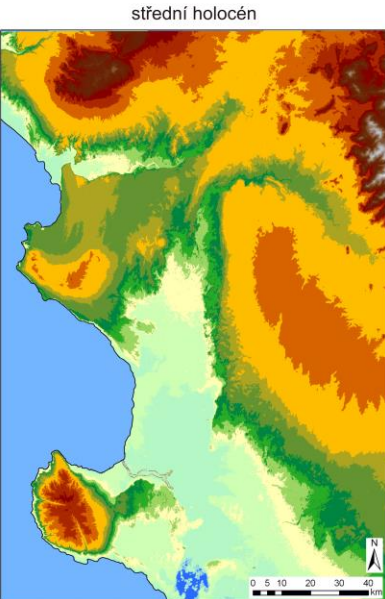
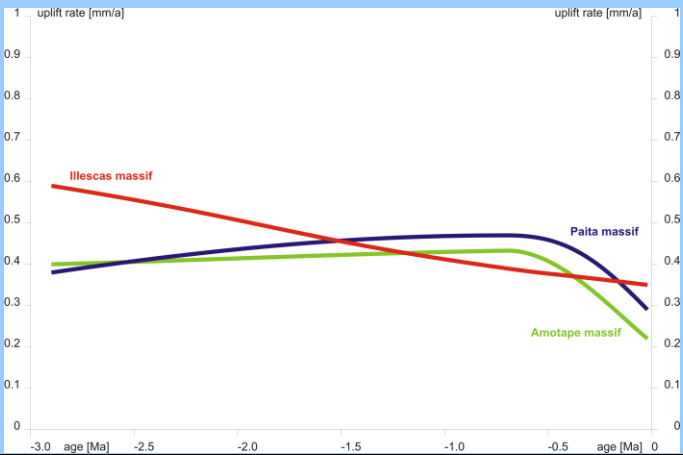
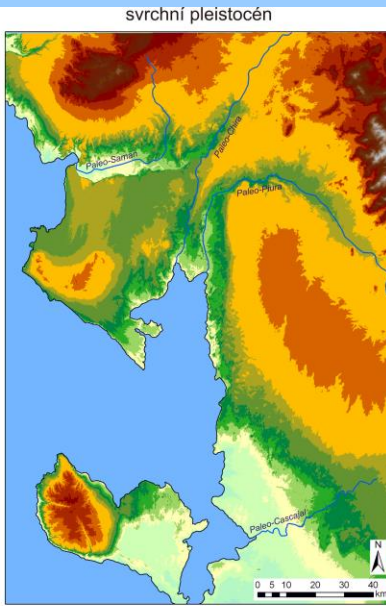
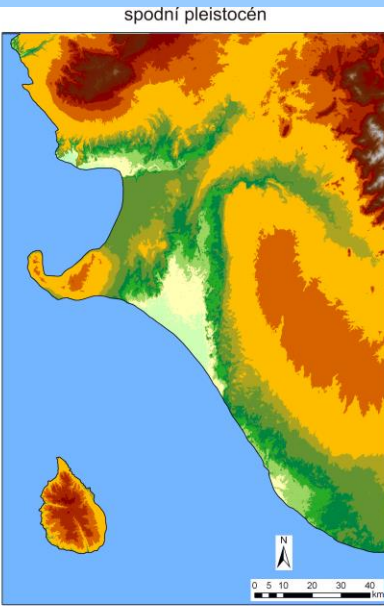
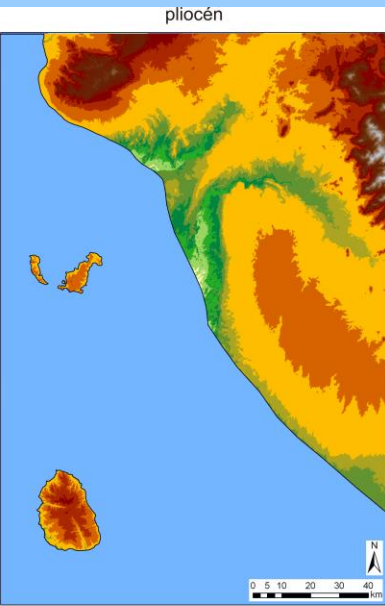
Pro mladší kenozoikum vhodná metoda datování schránek mořských měkkýšů.



Přepočet poměru $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ pomocí SIS Look-Up Table (Excel)

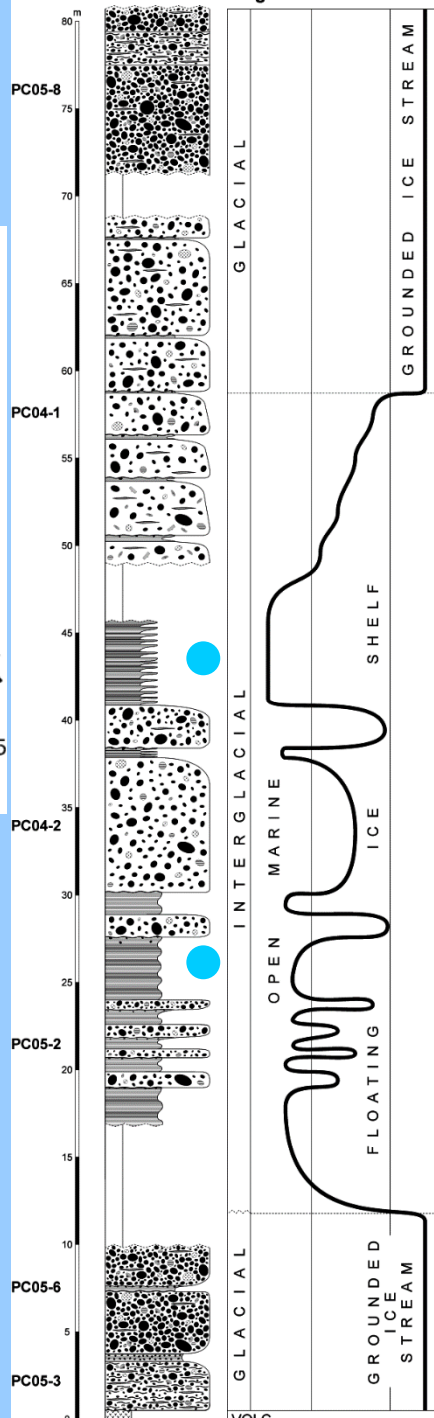
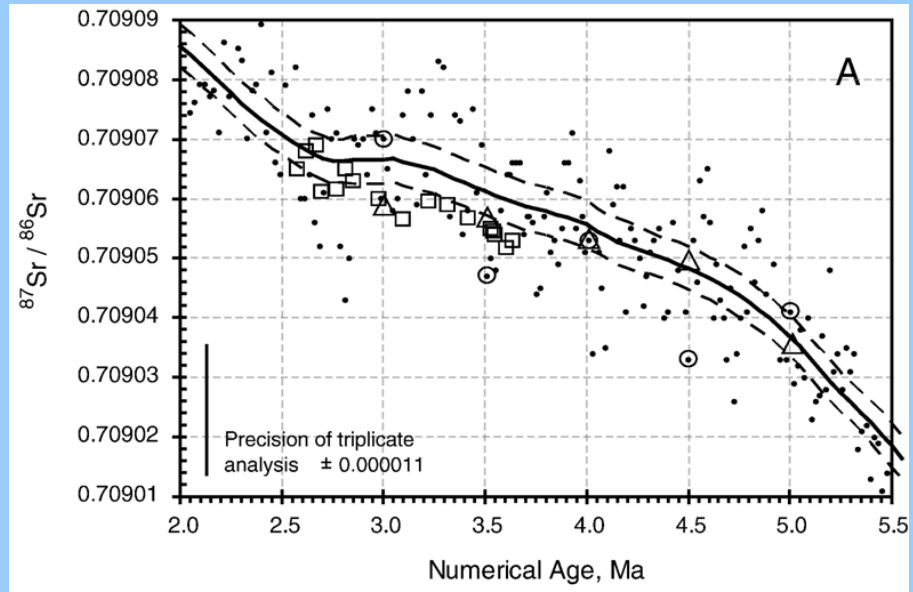
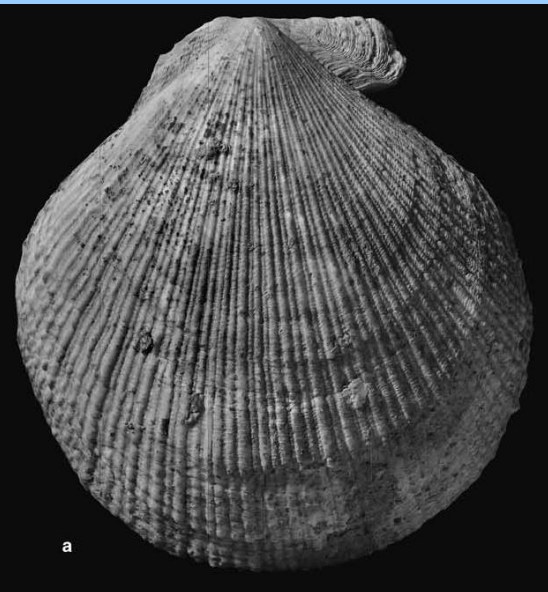


Rekonstrukce vývoje pobřeží severního Peru od pliocénu



číslo vzorku	S (°)	W (°)	výška (m)	mořská terasa (tablazo)	měřené stáří (BP)	reálné stáří - 1 sigma (BP)
D06L	5° 50,637'	80° 50,652'	8	Tablazo Lobitos	47,0 ± 3,0 ka	50,82 ± 3,56 ka
D06U	5° 50,637'	80° 50,652'	10	Tablazo Lobitos	>48,0 ka	>51,78 ka
T019	5° 32,087'	80° 46,285'	7	Tablazo Lobitos	moc mladé	moc mladé
H055	5° 31,480'	80° 48,890'	17	Tablazo Lobitos	střed 0,121 Ma	recent až 0,625 Ma
H133	5° 54,762'	80° 42,303'	25	Tablazo Talara	2,78 ± 0,91 Ma	1,87-3,68 Ma
T031	5° 22,660'	80° 48,727'	27	Tablazo Talara	0,902 ± 0,315 Ma	0,587-1,216 Ma
T030	5° 24,155'	80° 49,171'	34	Tablazo Talara	1,213 ± 0,159 Ma	1,054-1,372 Ma
D07	5° 14,923'	81° 09,077'	59	Tablazo Talara	1,696 ± 0,324 Ma	1,372-2,02 Ma
H001	5° 08,511'	81° 04,046'	77	Tablazo Talara	1,062 ± 0,251 Ma	0,811-1,312 Ma
H084	5° 08,603'	80° 55,540'	83	Tablazo Talara	1,938 ± 0,542 Ma	1,396-2,48 Ma
H002	5° 11,515'	81° 04,561'	93	Tablazo Talara	0,726 ± 0,372 Ma	0,354-1,098 Ma
H162	4° 54,168'	81° 01,443'	94	Tablazo Talara	1,285 ± 0,201 Ma	1,084-1,485 Ma
T206	4° 48,105'	81° 02,291'	111	Tablazo Mancora	3,04 ± 1,06 Ma	1,98-4,10 Ma
T197	4° 46,857'	81° 02,102'	129	Tablazo Mancora	4,27 ± 0,82 Ma	3,45-5,08 Ma
D09	6° 00,644'	80° 56,452'	157	Tablazo Hornillos	4,08 ± 0,95 Ma	3,13-5,03 Ma

Datování interglaciálních fází s otevřenou mořskou hladinou v Antarktidě (sv. miocén-kvartér)



Radiační dozimetrické datovací metody (metody založené na ozáření)

Luminiscenční datovací metody

Luminiscenční metody datování jsou založeny na principu, že **materiály** přirozeně **obsahující radiogenní nuklidy**, jako je U, Th nebo ^{40}K , nebo které leží v těsně blízkosti jiných materiálů obsahujících tyto radionuklidy **jsou vystavovány nízké úrovni radiace**. Tím dochází v krystalové mřížce k ionizaci atomů a volné elektrony se mohou uchytit ve volných místech (dírách) v krystalové mřížce.

Tyto **elektrony můžeme v laboratoři** za kontrolovaných podmínek z krystalové mřížky **uvolnit** buď zahřátím nebo osvětlením. V luminiscenčních centrech krystalu (zvláštní defekty krystalové mřížky nebo nečistoty) **dojde k emisi světla**, která je **úměrná množství zachycených elektronů**.

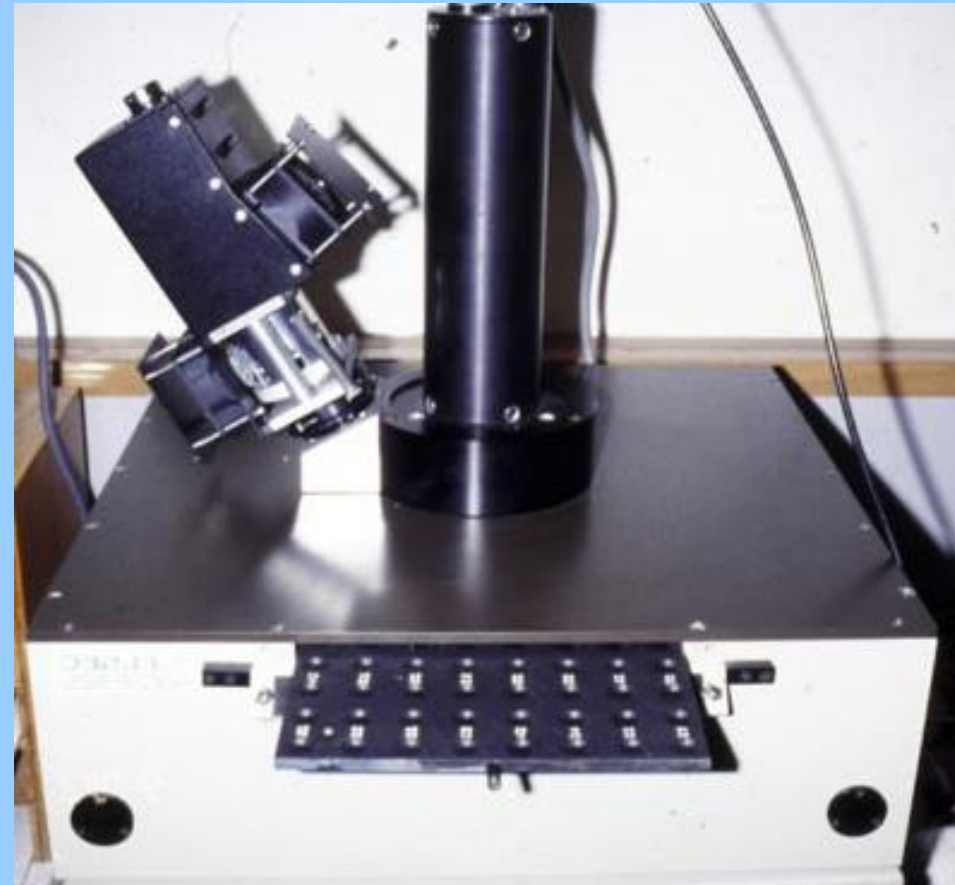
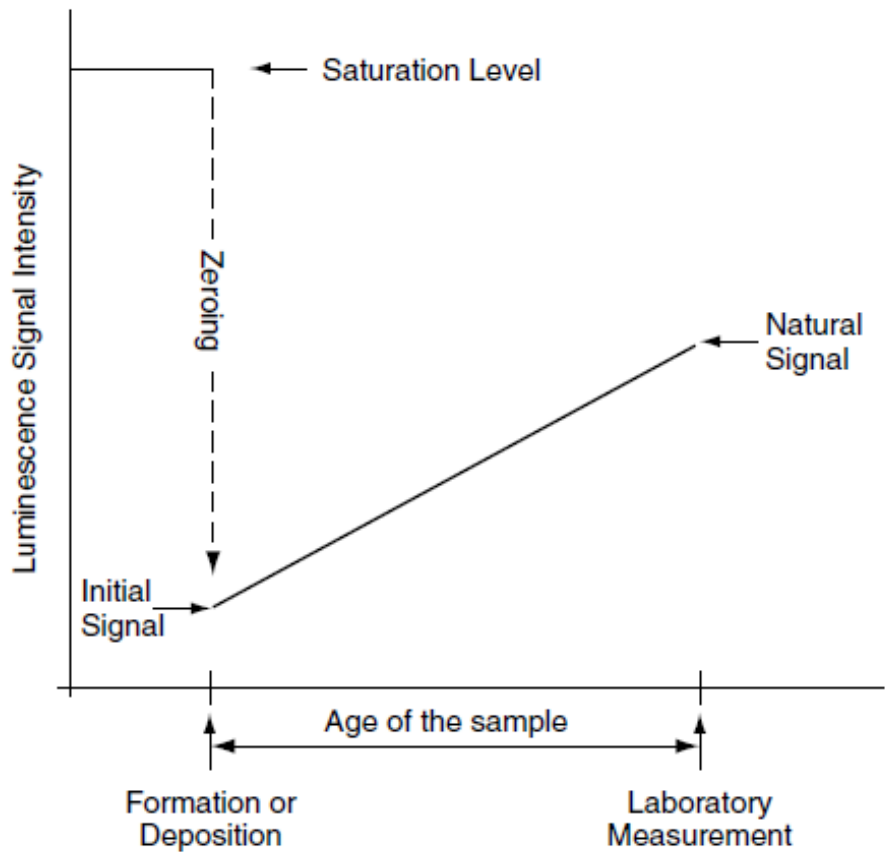
„Luminiscenční hodiny“ mohou být **vynulovány (přemazány) zahřátím** – např. výpalem keramiky nebo **expozicí vůči slunečnímu záření**. Tím se uvolní množství elektronových pastí, které mohou být následně zaplněny elektrony.

Přírodní luminiscenční signál tak poskytuje informace **o čase**, který uběhl **od vynulování luminiscenčních hodin (zahřátím/vypálením** nebo poslední **expozicí vůči slunečnímu záření**, než byl daný materiál pohřben).

Luminiscenční datovací metody

Pokud luminiscenci indukujeme tepelně, tak mluvíme o **termoluminiscenci**,
pokud ji indukujeme viditelným světlem, tak o **opticky indukované (optické) luminiscenci**

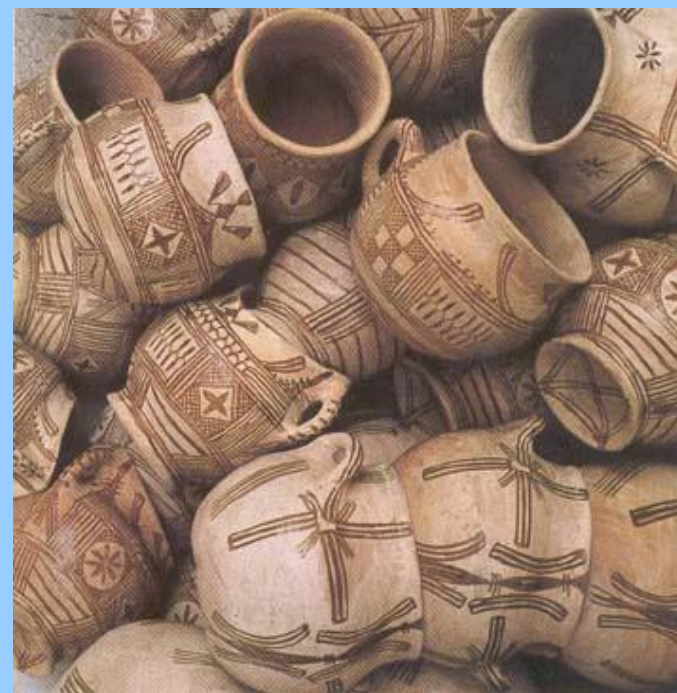
a pokud infračerveným zářením, tak o **infračervené luminiscenci**.



Luminiscenční datovací metody

Termoluminiscence (TL) – standardně měřen křemen nebo živce, ale principiálně mohou být použity i jiné minerály.

Datovatelný materiál: keramika, vypálené sedimenty, cihly, kachle, přepálené artefakty a kameny, vulkanické produkty, spraše, jezerní sedimenty a dokonce hlubokomořské sedimenty.



Laboratorní měření: separovaný křemen nebo živce je zahříván na $>500\text{ }^{\circ}\text{C}$ a vyzářené světlo je pomocí fotonásobičů převáděno na elektrické impulzy.

Intenzita TL je vynášena vůči teplotě – dostaneme **křivku záření**, v níž vrcholy odpovídají prožité termální historii jednotlivých populací elektronových pastí ve vzorku.

Přírodní TL signál je srovnáván s umělým signálem získaným tak, že část vzorku vystavujeme známým dávkám záření z kalibrovaného zdroje radioizotopů. To nám umožňuje stanovit **ekvivalentní dávku (paleodávka; D_E)**, která odpovídá množství záření, které by bylo zapotřebí k vytvoření stejného TL signálu, který daný vzorek získal během posledního vynulování.

Termoluminiscence (TL)

Pro zjištění luminiscenčního stáří potřebujeme stanovit ještě jeden parametr, tím je **hodnota dávky v prostředí** (nebo taky **roční dávka**). To je množství záření za jednotku času pohlcená použitým minerálem od vynulování luminiscenčních hodin vypálením nebo slunečním zářením. Tato dávka se stanoví měřením koncentrací radioaktivních prvků (U, Th, ^{40}K) v daném vzorku (*hodnota vnitřní dávky*) a v jeho okolí (*hodnota vnější dávky*).

$$\text{TL/OSL stáří} = \frac{\text{ekvivalentní dávka}}{\text{roční dávka}}$$

aplikace

- dnes téměř výhradně na datování výpalu (keramiky, cihel, sedimentu, přepálení artefaktů či kamene obecně)
- sedimenty jsou dnes téměř výhradně datovány OSL a IRSL metodami

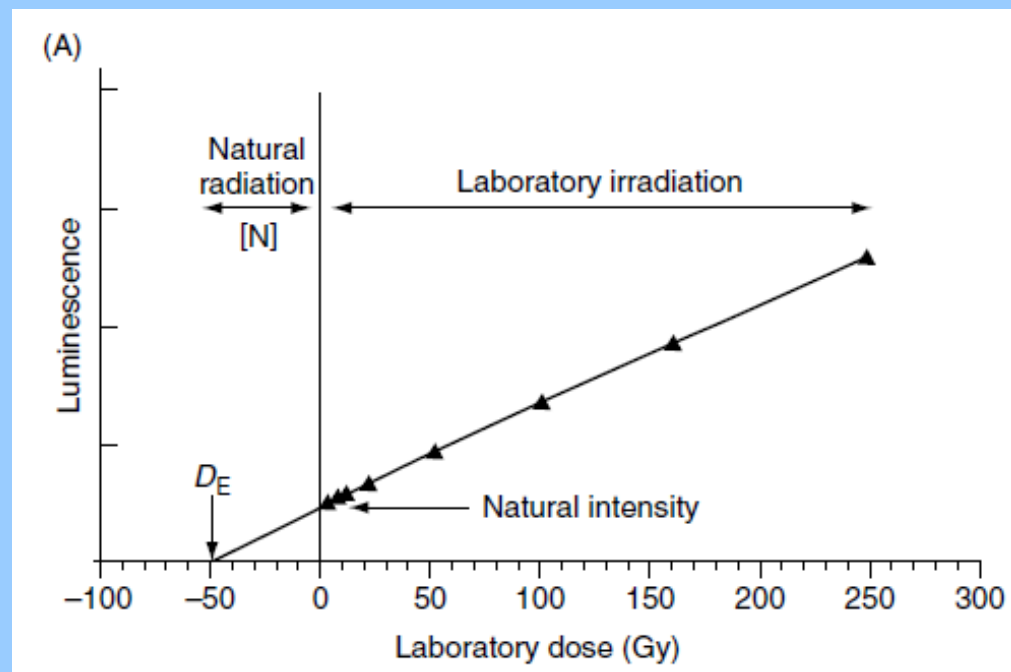
Optická luminiscence (OSL)

- obdobný přístup, jen luminiscence je indukována zeleným světlem,

- dnes pro datování sedimentů již TL skoro není používána,

- v poslední době se významně využívá **datování jednotlivých křemenných zrn**, které umožňuje zjistit, jestli všechna zrna v daném vzorku mají stejná zdánlivá stáří. Tato zdánlivá stáří mohou být různá, protože

např. některá z nich nebyla vůbec vystavena slunečnímu záření po dostatečně dlouhou dobu, aby byl vynulován jejich luminiscenční signál a nebo protože sediment obsahuje různě starý materiál.



Infračervená luminiscence (IRSL)

- pouze pro živce

- IR záření generuje mnohem silnější luminiscenční signál, což je speciálně pro živce důležité, protože živce se obecně výrazně hůře nulují, než křemen

OSL, IRSL

aplikace

- eolický transport a sedimentace
- říční transport a sedimentace
- mořská sedimentace
- (svahoviny, jezerní sedimenty)

zdroje chyb

sedimentační procesy, během kterých nedochází k vynulování a nebo dochází k vynulování jen části materiálu

- svahový transport,
- říční dnové splaveniny u toků s vysokým množstvím unášených plavenin (kalná voda),
- resedimentace materiálu,

živce se obecně neradi nulují... často až 10 x hůře než křemen!

reziduální luminiscence v daném materiálu

Elektronová spinová rezonance (ESR)

Podobný princip jako u luminiscenčních metod (také je třeba stanovit **ekvivalentní a roční dávku**). Ale tato **metoda je nedestruktivní** a nedochází při měření k uvolnění elektronů zachycených v krystalové mřížce. Je stanovováno jejich množství na základě jejich paramagnetických vlastností. Vzorek je měřen **v silném magnetickém poli** a vystaven **vysokofrekvenční elektromagnetické radiaci**. Magnetické pole se pomalu mění a **při určité frekvenci** se začnou **elektrony excitovat a rezonují**.

Rezonance je měřena ESR spektrometrem, kde počet rezonujících elektronů, který udává stáří vzorku, měříme absorpcí elektromagnetické energie.

Datovatelný materiál: speleotémy, zubní sklovina, koráli, měkkýši, přepálené artefakty, vulkanity

Dosah metody: od pár tisíců let až teoreticky do 2 miliónů let. Ale přesnost metody je poměrně nízká, chyba bývá obvykle >10 %.

Štěpné stopy v minerálech a datování termálních událostí

Je založena na **rozpadu jader atomů ^{238}U** (poločas rozpadu $\sim 10^{16}$ let), štěpení je spojeno se vznikem neutronů a štěpných produktů. Tyto štěpné úlomky získávají značnou energii a při průchodu nabitě částice hmotou (krystalem minerálu) způsobují štěpné produkty trvalé poškození – tzv. **latentní štěpnou stopu**. Pro určení stáří vzorku je nutné stanovit objemovou hustotu spontánních latentních štěpných stop ^{238}U , která je funkcí obsahu uranu a stáří. Štěpné stopy mohou být zviditelněny a studovány pod mikroskopem.

Nejčastější metodou ke zjištění koncentrace uranu je **objemová hustota indukovaných štěpných stop ^{235}U** , které lze získat při bombardování jader tohoto izotopu pomalými (termálními) neutrony v jaderném reaktoru. Stáří jednotlivých zrn je vypočteno z poměru spontánního a indukovaného počtu štěpných stop a neutronového toku. Metoda spontánního štěpení ^{238}U je nejčastěji kalibrována pro studium časově-teplotního záznamu vývoje hornin pro zirkony a apatity v rozmezí $\sim 60\text{--}125\text{ }^{\circ}\text{C}$ pro apatity a $210\text{--}310\text{ }^{\circ}\text{C}$ pro zirkony.

aplikace

- stanovení časově-teplotního modelu výzdvihu/subsidence sediment. pánví
- stanovení provenience detritického materiálu

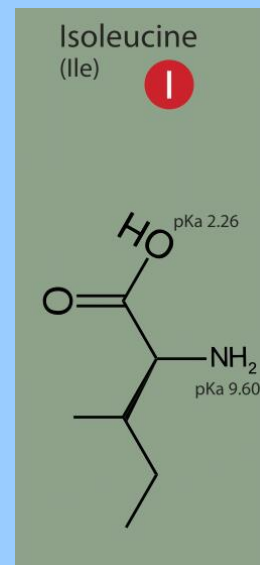
Racemizace aminokyselin

Datovací technika využívající **změn aminokyselin od jejich vzniku**. Všechny aminokyseliny kromě glycinu (nepolární) jsou díky přítomnosti chirálního uhlíku opticky aktivní (stáčivé) a mají schopnost stáčet rovinu polarizovaného světla vlevo (L-) nebo vpravo (D-) a tvoří zrcadlově odlišné páry. Až na výjimky tvoří **živé organismy levotočivé aminokyseliny**. **Po smrti** daného **organismu** se **aminokyseliny** postupně mění na **pravotočivé**, čemuž se říká racemizace. Stanovení **poměru L- a D- aminokyselin** lze proto určit ke stanovení **doby**, která proběhla **od smrti** daného **organismu**.

Rychlost přeměny je ovlivněná především *teplotou*, *vlhkostí* a *kyselostí substrátu*, což ovlivňuje jak časový dosah metody, tak i její přesnost. V běžných podmínkách je dosah až 2 Ma a chyba ~20 %, při záporných teplotách se časový dosah může prodloužit až na 10 Ma.

Nejčastěji se používá **L-iso-leucin**, kapalinovou chromatografií lze sériově stanovovat větší množství aminokyselin, které lze použít pro různá časová rozpětí.

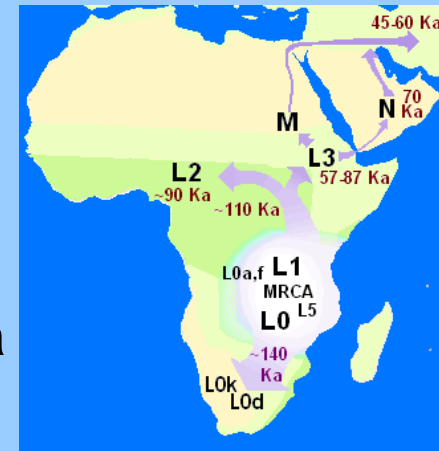
Nejvhodnějším datovatelným materiálem jsou kosti a ulity.



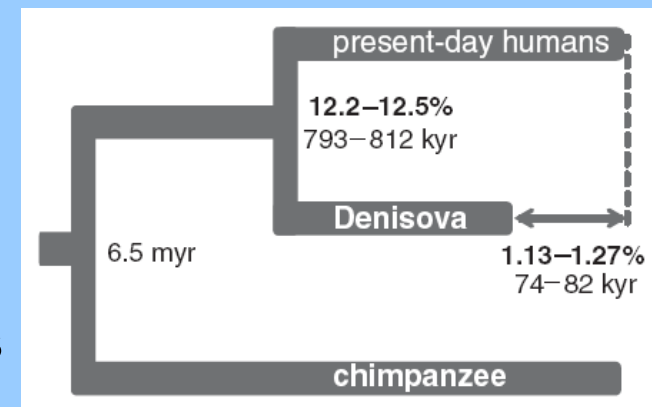
Molekulární (DNA) hodiny

Metoda založená na předpokladu, že míra mutací v mtDNA je za určitý čas konstantní. Díky tomu je možné stanovit **evoluční vzdálenost** mezi dvěma druhy. Mutace mtDNA se projeví odlišnou stavbou aminokyselin. Nejedná se o absolutní datování, lze tak jen kvantifikovat rozdílné časové úseky evoluční vzdálenosti mezi dvěma druhy. Kalibraci pomocí nezávislých chronologických metod je pak nutné odvodit vlastní stáří.

Mitochondriální Eva – tak označujeme ženu, která je v mateřské linii **společným předkem** všech **dnes žijících lidí**. Její MtDNA se postupným děděním rozšířila na veškerou lidskou populaci na světě. Žila zhruba před 200 ka někde ve východní Africe. Nejstarší nalezený *Homo sapiens* je ~160 ka starý (*H. sapiens idaltu*)



Homo denisoviensis* (Hominin X)** – mtDNA z prstního článku z vrstvy staré 48–30 ka v Denisově jeskyni (Altaj) ukázala, že se nejedná o neandrtálce, ani o moderního člověka. Od linie vedoucí k modernímu člověku se podle mtDNA ***Homo denisoviensis oddělil před ~800 ka a je tak pro nás vzdálenější, než neandrtálec, jenž se o od předchůdců moderního člověka oddělil před ~470 ka.



K dalšímu čtení a studiu:

Aitken M.J. (1998): *An Introduction to Optical Dating*. Oxford University Press.

Blaauw M. (2010): Methods and code for “classical” age-modelling of radiocarbon sequences. *Quaternary Geochronology*, 5, 512–518.

Bradley R.S. (2015): *Paleoclimatology. Reconstructing Climates of the Quaternary*. Third Edition, Academic Press.

Dunai T.J. (2010): *Cosmogenic Nuclides: Principles, Concepts and Applications in the Earth Surface Sciences*. Cambridge University Press.

Gornitz V., Ed. (2009): *Encyclopedia of Paleoclimatology and Ancient Environments*. Springer.

Gosse J.C., Phillips F.M. (2001): Terrestrial in situ cosmogenic nuclides: Theory and application. *Quaternary Science Reviews*, 20, 1475–1560.

Nývltová Fišáková, M. (2012): Radiouhlíkové datování. *Přehled výzkumů*, 53, 89–99.

Reimer P.J. et al. (2013): Intcal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0–50,000 years Cal BP. *Radiocarbon*, 55, 1869–1887.

Světlík I., Dreslerová D., Limburský P., Tomášková L. (2007): Radiouhlík v přírodě a jeho použití pro datovací účely. *Archeologické rozhledy*, LIX, 80–94.

Walker M.J.C. (2005): *Quaternary Dating Methods*. Wiley & Sons.

Wolff, E.W. (2007). When is the „present“? *Quaternary Science Reviews*, 26, 3023–3024.

That's all for this term, folks...