

Pokročilá historická geologie

Multiproxy stratigrafie

(petrofyzika a chemostratigrafie)

Zástupné proměnné (z angličtiny **proxies**, *sing.* proxy)

- interpretace proměnných, které není možné měřit přímo
- Statistický koncept zástupných proměnných
- proxy parametry musí s interpretovanou proměnnou vykazovat **statisticky významnou korelaci**, například lineární, nelineární, pozitivní či negativní

Příklady:

- životní úroveň se posuzuje pomocí hrubého domácího produktu na obyvatele (proxy parametr)
- proxy maximální teploty během pohřbení sedimentu - odraznost vitrinitu nebo krystalinita illitu
- výpočet teploty nebo úhrnu srážek; $\delta^{18}\text{O}$, pylová spektra ...

- moderní technologie - rychlý sběr velkého množství dat (petrofyzikálních, geochemických)
- integrace více proxy parametrů - **multiproxy analýza**
 - velmi detailní a často složité interpretace
- Renaissance stratigrafie od konce 20. století: využití multiproxy analýzy v paleoklimatických, paleoceanografických, paleohydrografických, paleotektonických a dalších interpretacích

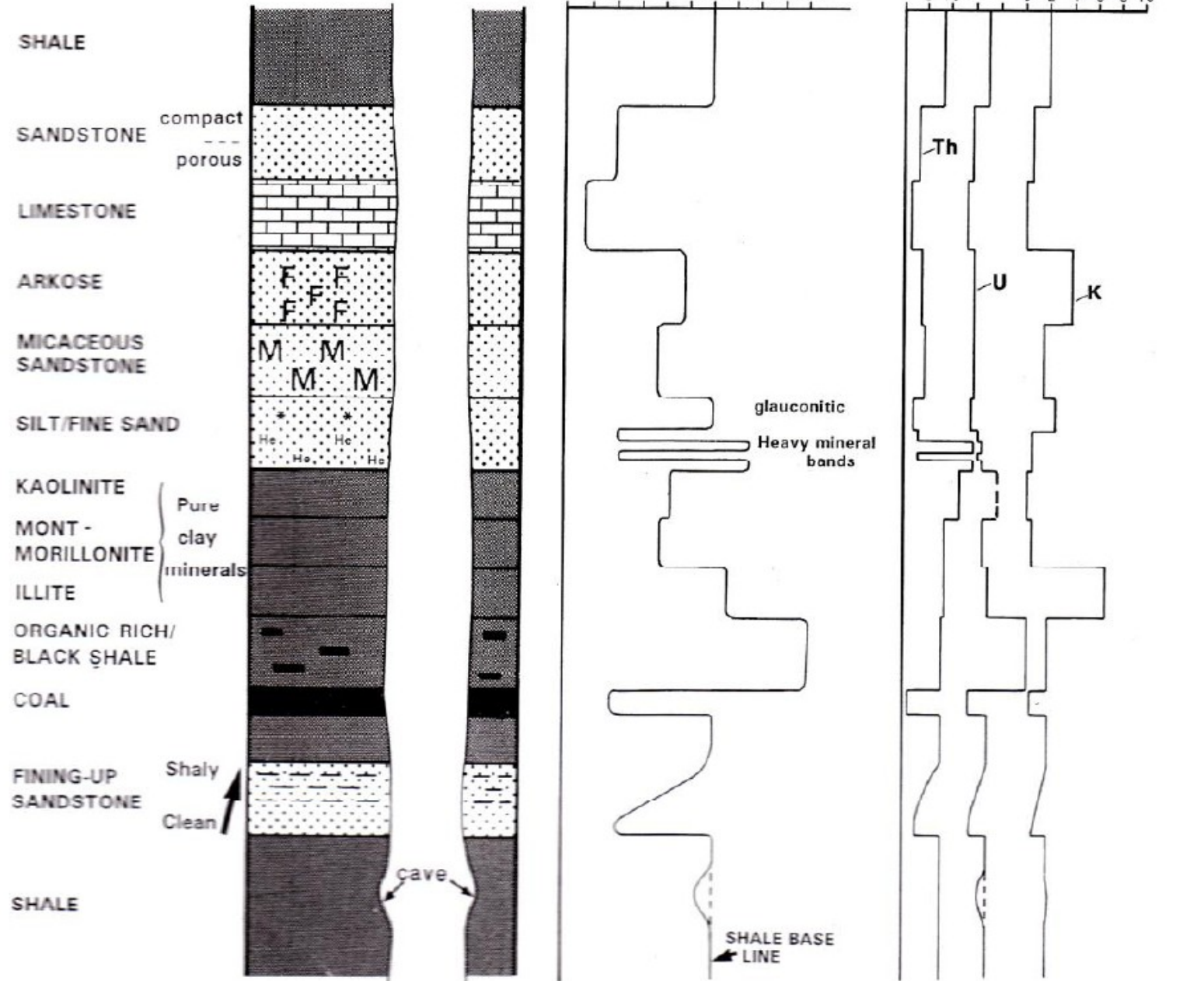
Gamakarotážní a gamaspektrometrické metody

- měří **přírozenou radioaktivitu** hornin

- Přírozená radioaktivita tří izotopů
- **draslík** (izotop ^{40}K)
- **uran** (izotopy ^{234}U , ^{235}U a ^{238}U)
- **thorium** (izotop ^{232}Th)

Gamaspektrometrie

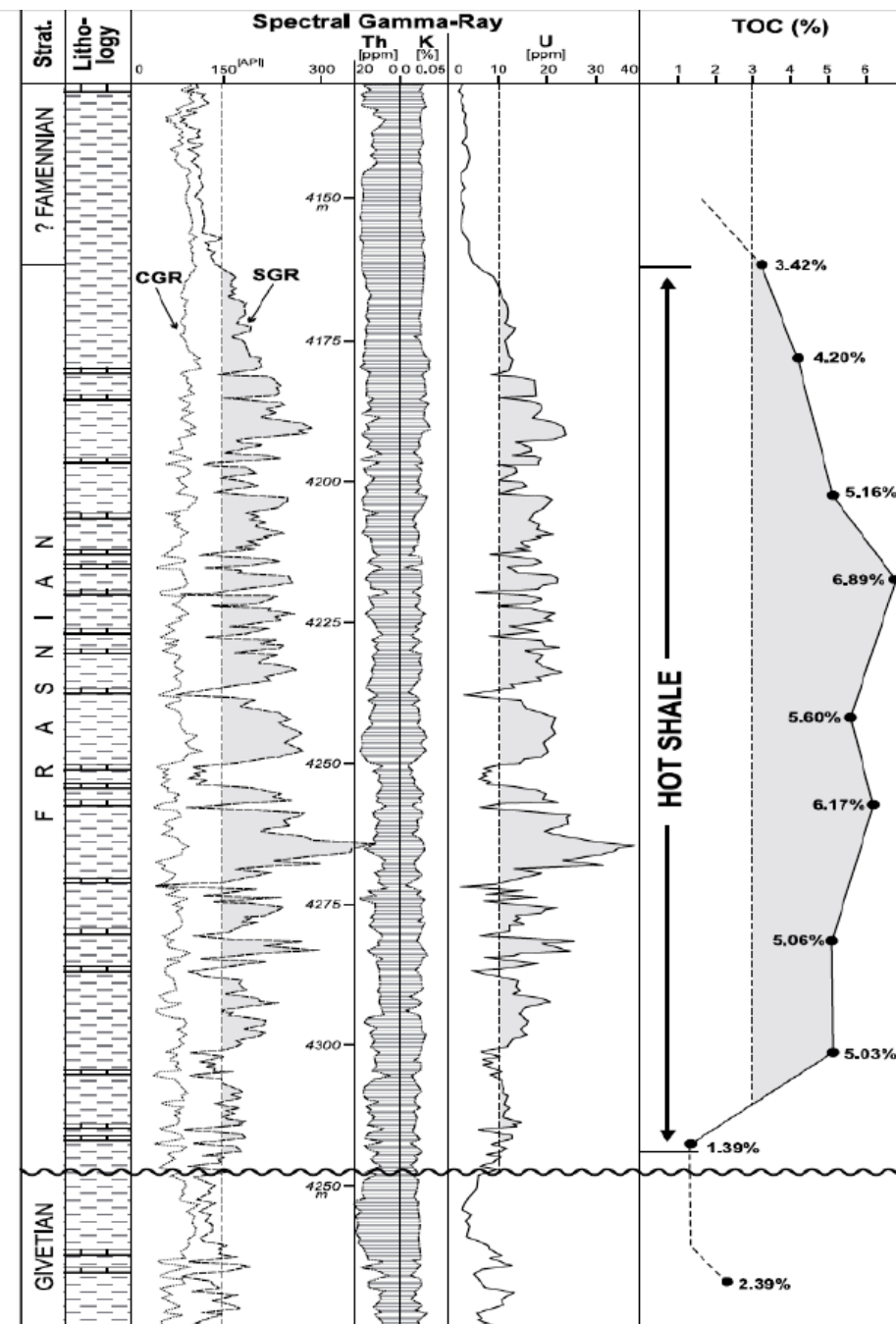
- Gamakarotážní křivky úzce souvisí s litologií hornin
- **proxy minerálního složení hornin**
- Používají se k litostratigrafické korelaci, interpretaci facií a faciálních sledů a v posledních desetiletích také v sekvenční stratigrafii.



- **Draslík** - součást **fylosilikátů, draselných živců, draselných solí ...**
- vyšší koncentrace K v jílových minerálech = vysoké obsahy K v jemnozrnných klastických sedimentech (jíly a jílovce)
- křemenné písky a pískovce - obsahy K nižší
- arkózy a psamity bohatých na draselné živce - obsahy K stoupají
- Obsahy draslíku lze proto s určitým omezením využít jako indikátory zrnitosti

• Uran

- v některých **těžkých minerálech** (monazit, xenotim, thorit, zirkon, apatit), **minerály uranu**,
- **jílové minerály** – U adsorbovaný na povrch jílových minerálů (vyšší U v jemnozrnných klastických sedimentech)
- **organická hmota** - adsorpce ve formě urano-organických komplexů
- izomorfní příměs ve **fosfátech**
- poměrně dobře mobilní i v podmínkách diagenéze (v oxickém prostředí, v redukčních podmínkách se váže)

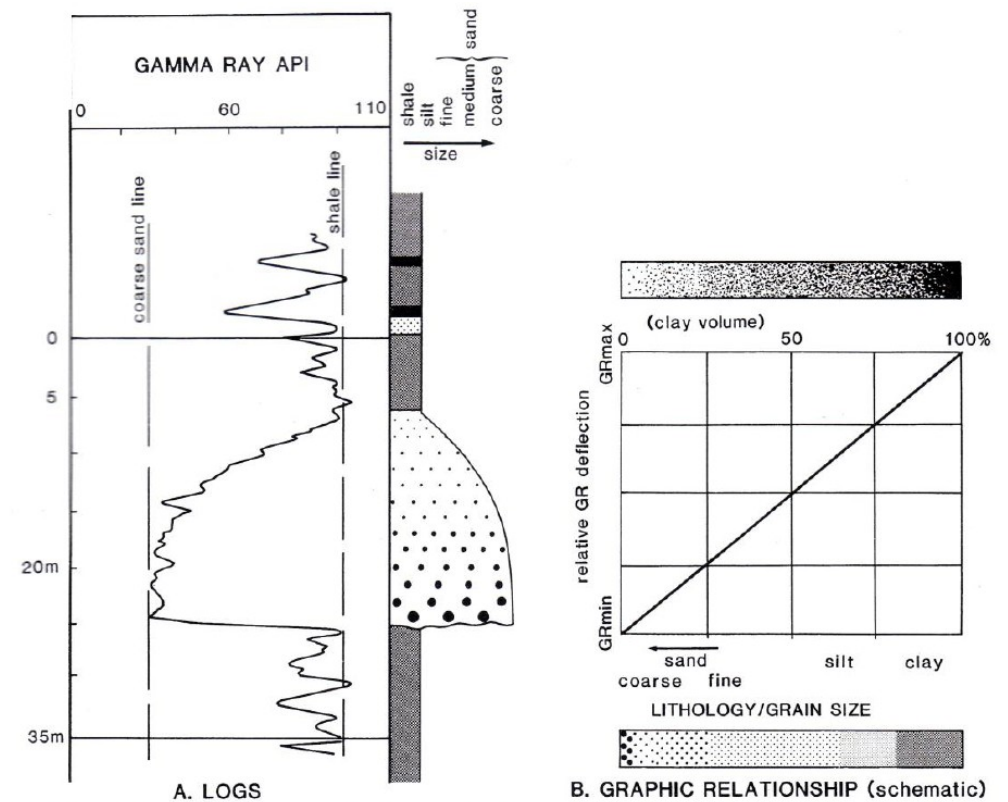


Obrázek 16. Vysoké koncentrace uranu ve svrchnodevonských jílovcích Alžírsko vázané na

- **Thorium**

- Nejčastějšími nosiči thoria jsou **těžké minerály**
- v akcesorických minerálech kyselých a intermediárních magmatitů (thorit, allanit(Ce), monazit, epidot, apatit, zirkon a titanit)
- **povrch jílových minerálů**, podobně jako uran.
- chemická stabilita

- Radioaktivita **klastických sedimentů** je většinou závislá na **zrnitosti**
- Obsah jílových minerálů a těžkých minerálů je přímo úměrný zrnitosti
- jemnozrnnější klastika - vyšší radioaktivita
- Nižší radioaktivita psamitů - vyšší obsahy neradioaktivního křemene
- Radioaktivita sedimentů je však ovlivněna také **minerálním složením** písčité a prachové frakce (arkózy, černé břidlice)
- Záleží však i na zdrojové hornině klastik: budou-li písčítá zrna derivována z více radioaktivních hornin, „zrnitostní“ pravidlo platit nemusí

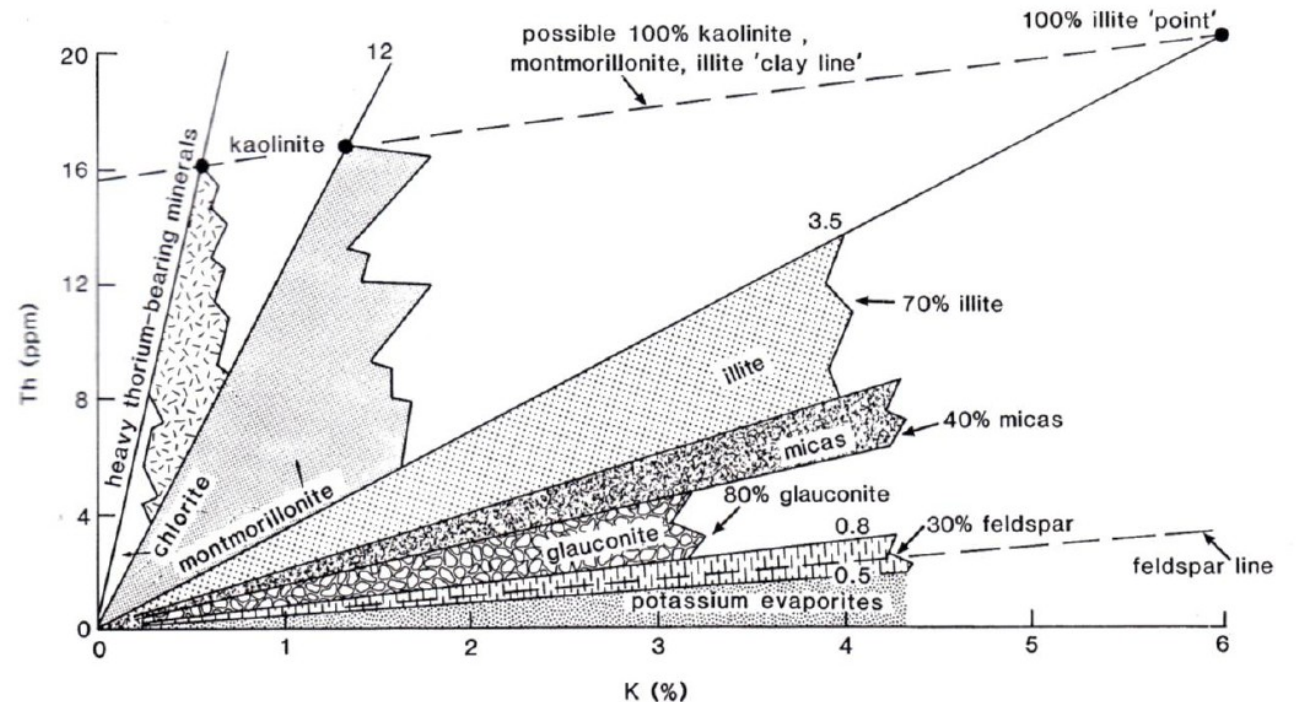


Obrázek 15. Interpretace zrnitosti ze základní gama křivky. Změny v zrnitosti pískovce se odrážejí ve změnách radioaktivity. Grafické znázornění vztahů mezi litologií, zrnitostí a hodnotami gamazáření. Upraveno podle: Rider (1999).

poměry K/Th

K a Th vázány převážně na detritickou složku

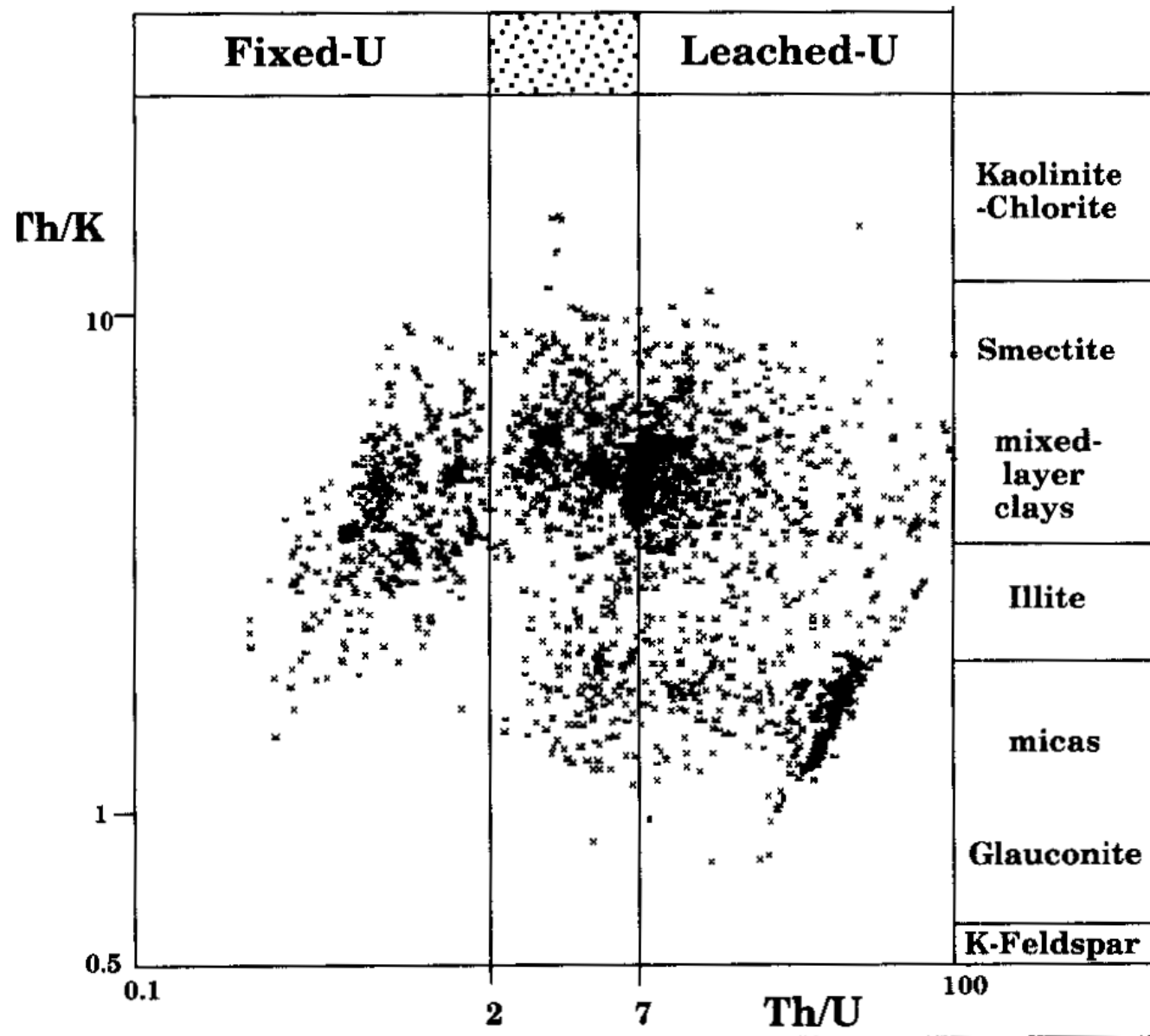
- Poměru K/Th lze použít pro **identifikaci** hlavních **nosičů radioaktivity** a zdroje sedimentu (provenience) a styl zvětvování
- Vysoké poměry K/Th - draselné soli, draselné živce, glaukonit
- Nízké poměry - smektit, kaolinit nebo těžké minerály



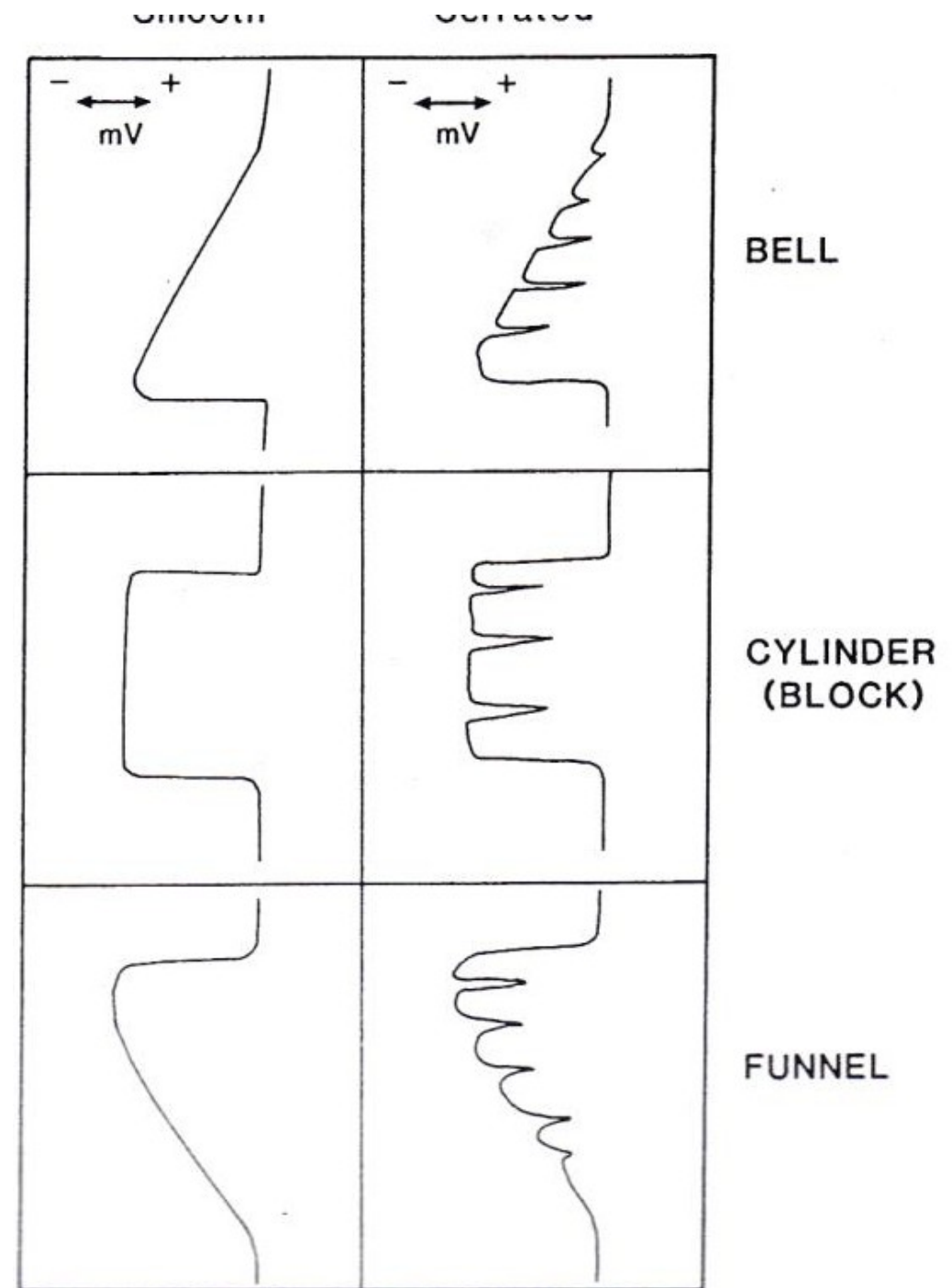
Obrázek 14. Použití poměru K/Th: teoretická distribuce draslíku a thoria v jílových minerálech, těžkých minerálech, draselných živcích a evaporitech. Upraveno podle: Rider (1999).

poměry U/Th

- U + Th v jílových minerálech
U v organické hmotě
- Vysoké poměry U/Th - jílové břidlice s vysokým obsahem organické hmoty
- potenciální matečné horniny pro uhlovodíky
- Anomálně vysoké poměry U/Th
- **kondenzované horizonty** nebo **anoxické/dysoxické podmínky**

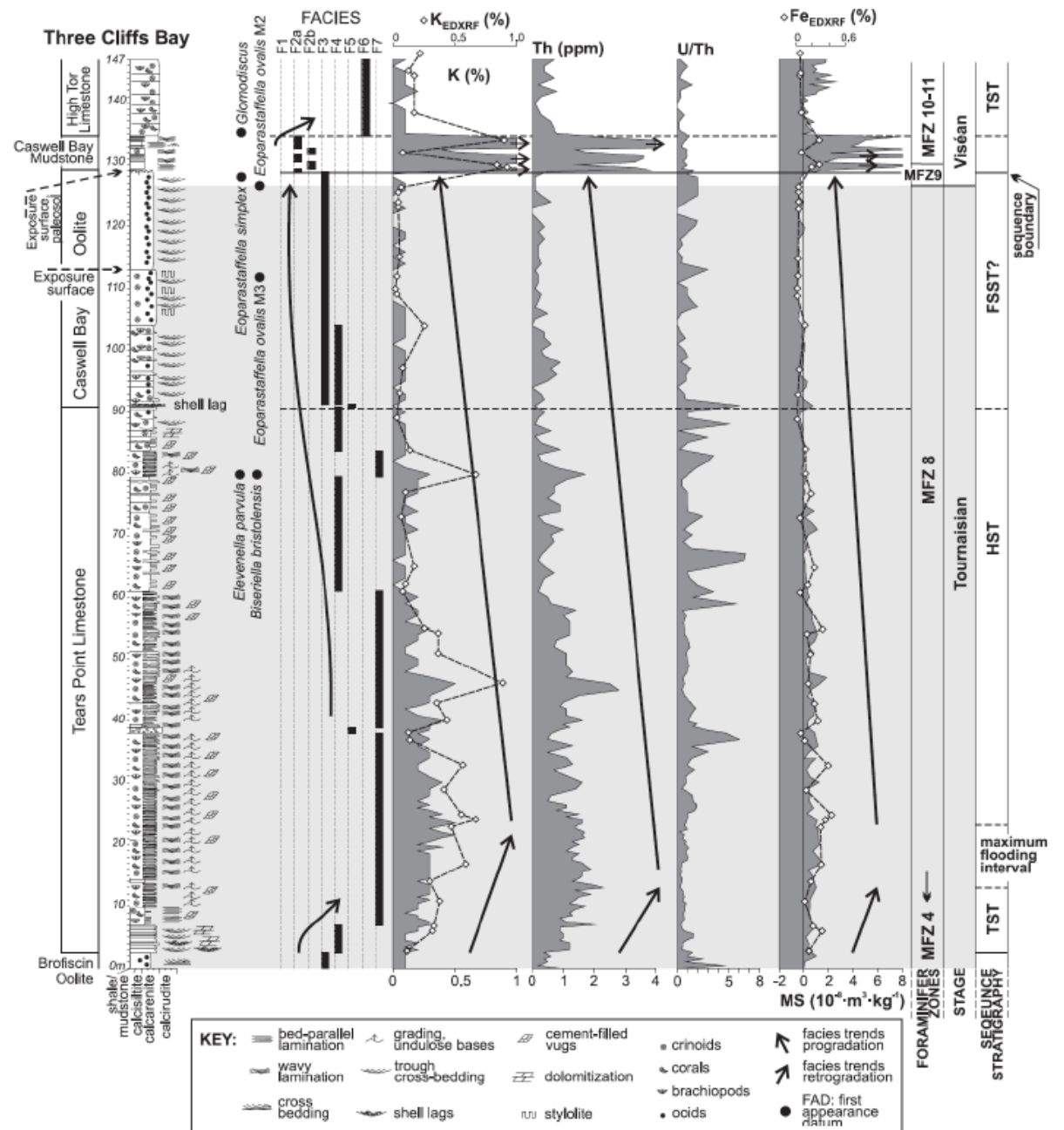


- Tvary spektrálních gama křivek:
 - do nadloží zjemňující (retrogradační) zrnitostní trendy (zvoncovitý tvar křivek)
 - do nadloží hrubnoucí (progradační) trendy (nálevkový tvar).



Použití gamaspektrometrie pro stratigrafickou korelaci a sekvenční stratigrafii

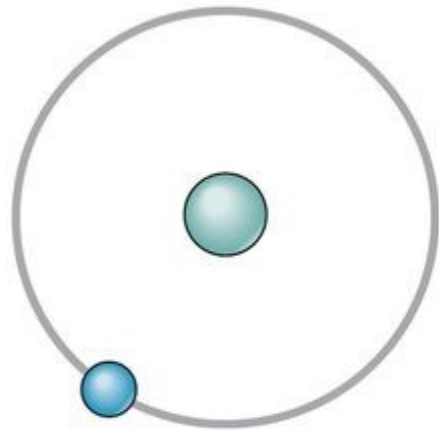
- **genetické povrchy** - náhlé zvraty hodnot na gamaspektrometrických křivkách
- **sekvenční hranice** (problematická): zpravidla posun facií do pánve (prudkým vzestupem zrnitosti a poklesem hodnot K, Th)
- **Transgresní povrchy**: náhlý vzestup hodnot radioaktivity
- **Povrch maximální záplavy**: podle maximálních hodnot K, U i Th, vysoké poměry U/Th (v důsledku kondenzace).
- Nálevkovité tvary gama křivek - progradační systémové trakty (**trakt nízké hladiny** - LST, **trakt vysoké hladiny** – HST, **trakt padající hladiny** - FSST)
- Do nadloží zjemňující trendy – retrogradace (**transgresivní systémový trakt** - TST).



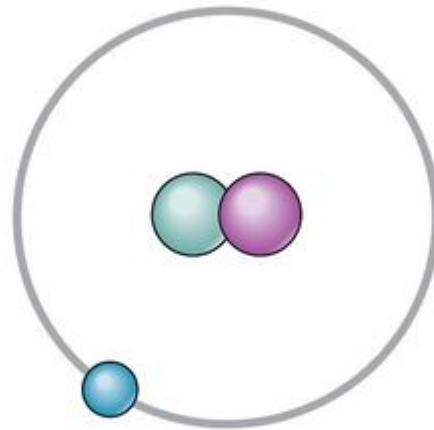
Obrázek 20. Progradační a retrogradační trendy facií rampových karbonátů jižního Walesu, tvary spektrálních gama křivek a interpretace systémových traktů (transgresivní, TST; vysoké hladiny, HST a padající hladiny, FSST). Upraveno podle: Bábek et al. (2013).

Izotopová chemostratigrafie

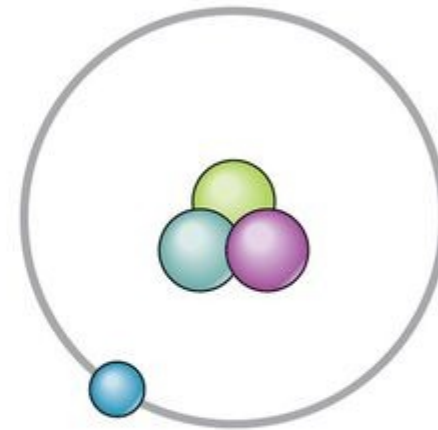
- Využívání poměrů stabilních izotopů
- **Izotopy** - jádra atomů izotopů prvku se stejným počtem protonů, ale různým počtem neutronů
- stejné atomové číslo / rozdílná atomová hmotnost



Protium (${}^1_1\text{H}$)



Deuterium (${}^2_1\text{H}$)



Tritium (${}^3_1\text{H}$)

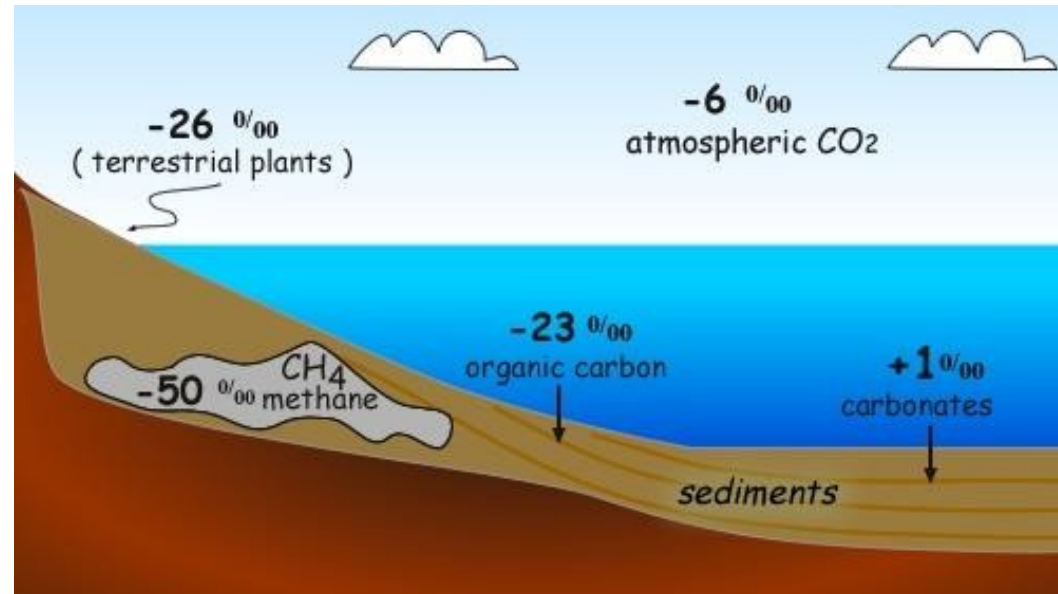
Izotopová chemostratigrafie

- přirozené změny v poměrech stabilních izotopů (nejčastěji $^2\text{H}/^1\text{H}$, $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ a $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$) v přírodních materiálech
- změny jsou způsobeny při **frakcionaci** malými rozdíly v jejich fyzikálních a chemických vlastnostech
- různé izotopy vstupují přednostně při reakcích do různých výsledných produktů

- měření izotopových poměrů **hmotnostními spektrometry**
- specifikace zdroje prvků, jejich stopování během fyzikálněchemických procesů, kvantifikace a bilancování sledovaných systémů

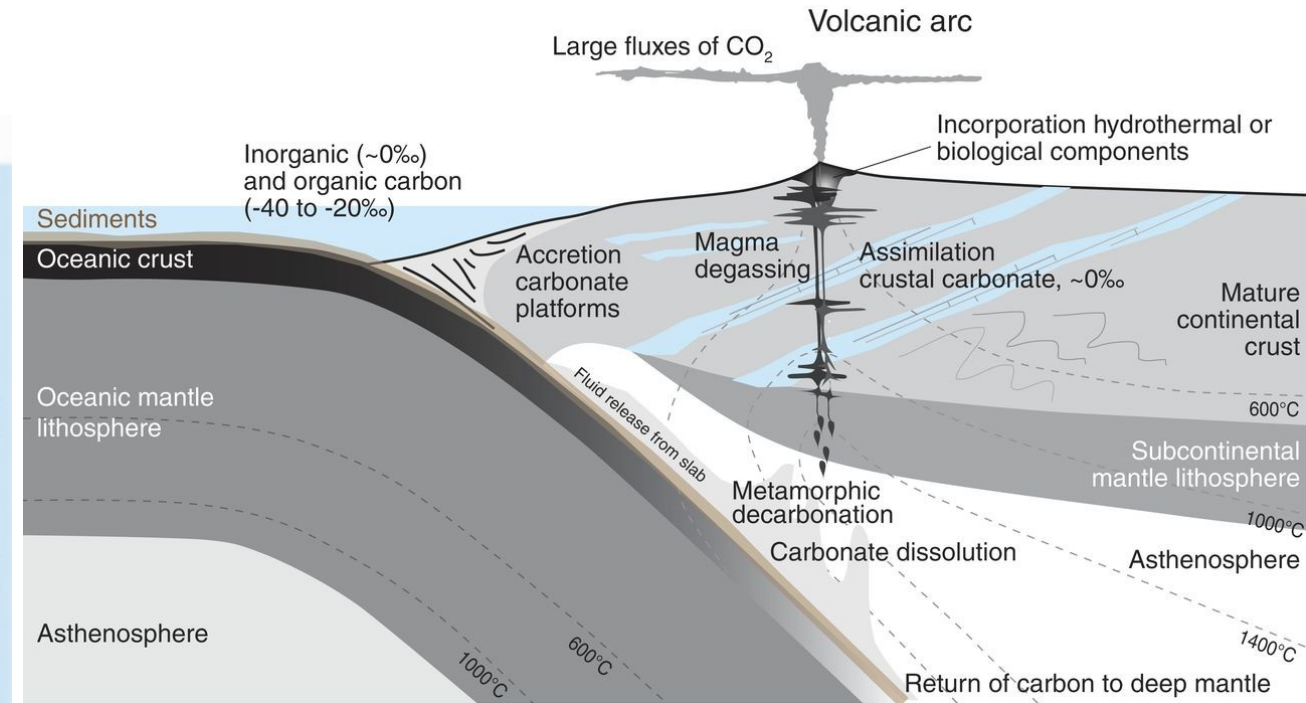
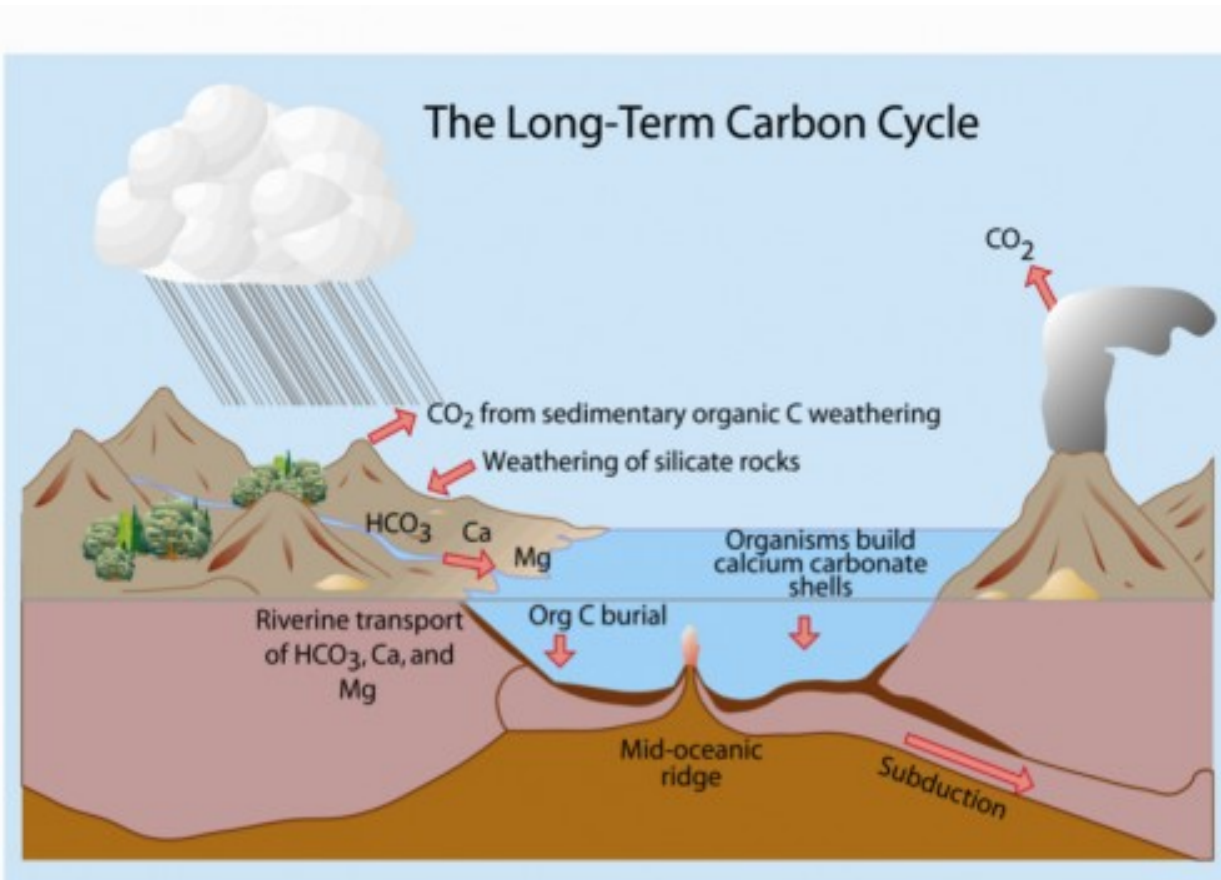
- Hlavním sledovaným parametrem je poměr mezi množstvím lehčích a těžších izotopů
- Poměr izotopů se uvádí jako malé písmeno delta (δ) s uvedením těžšího izotopu, např. $\delta^{13}\text{C}$ je poměr $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$
- Uvádí se jako promile ‰

- Hodnota poměru stabilních izotopů analyzovaného vzorku se vyjadřuje ve vztahu k referenčnímu materiálu, tzv. standardu, jehož izotopový poměr je známý a rovná se 0
- Materiály s těžším izotopovým složením než standard mají kladné hodnoty a naopak
- Př. Jako standard pro $\delta^{13}\text{C}$ bylo vybráno rostrum belemnita *Belemnitella americana* z křídového souvrství Peedee, Jižní Karolína.
- Tento standard je označován jak PDB (Peedee Belemnite). Došlo však k spotřebování původního standardu, proto byl uměle vytvořen nový, který je uložený ve Vídni (VPDB = Vienna Peedee Belemnite)



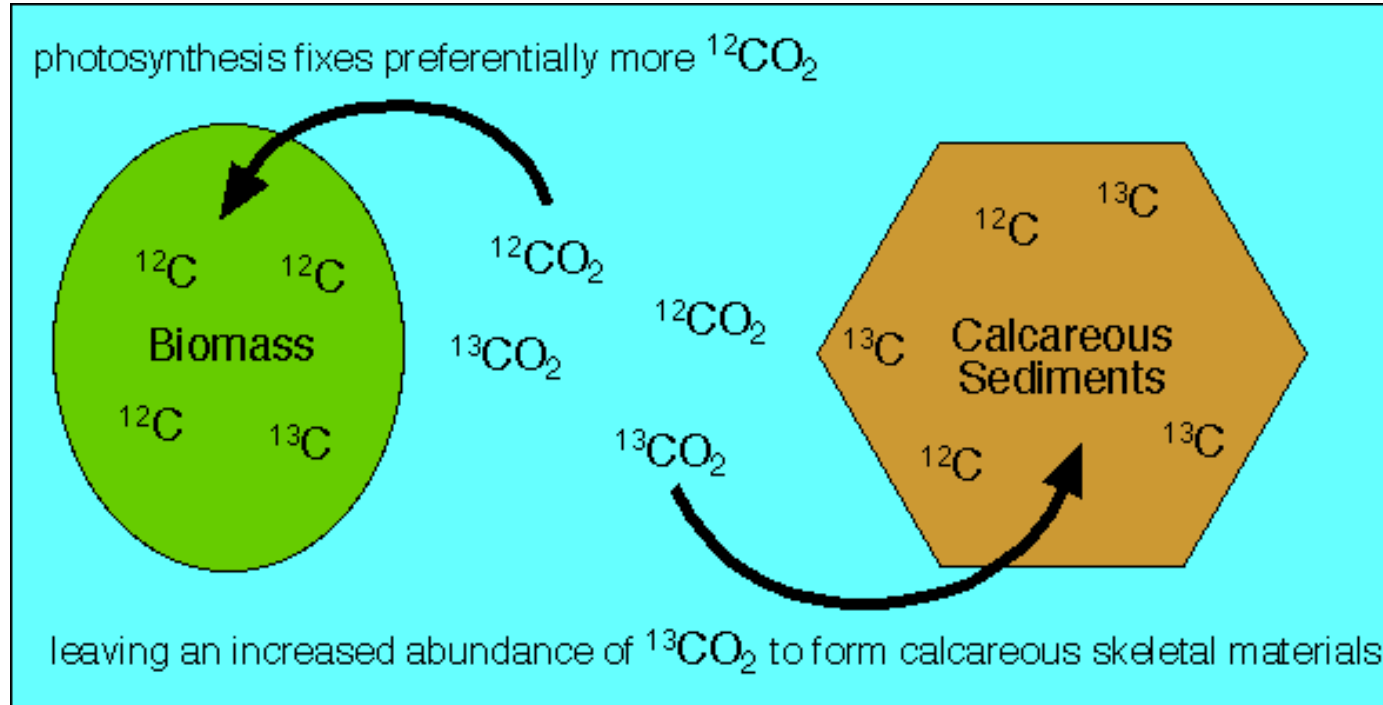
Stabilní izotopy uhlíku

- dva stabilní izotopy ^{12}C (tvoří 98,89% objemu C) + ^{13}C (1,11%).
- Cyklus uhlíku je jedním z nejvýznamnějších geochemických cyklů, který je spojen jak s oceánografickými, geologickými, atmosférickými tak biologickými cykly a procesy



Stabilní izotopy uhlíku

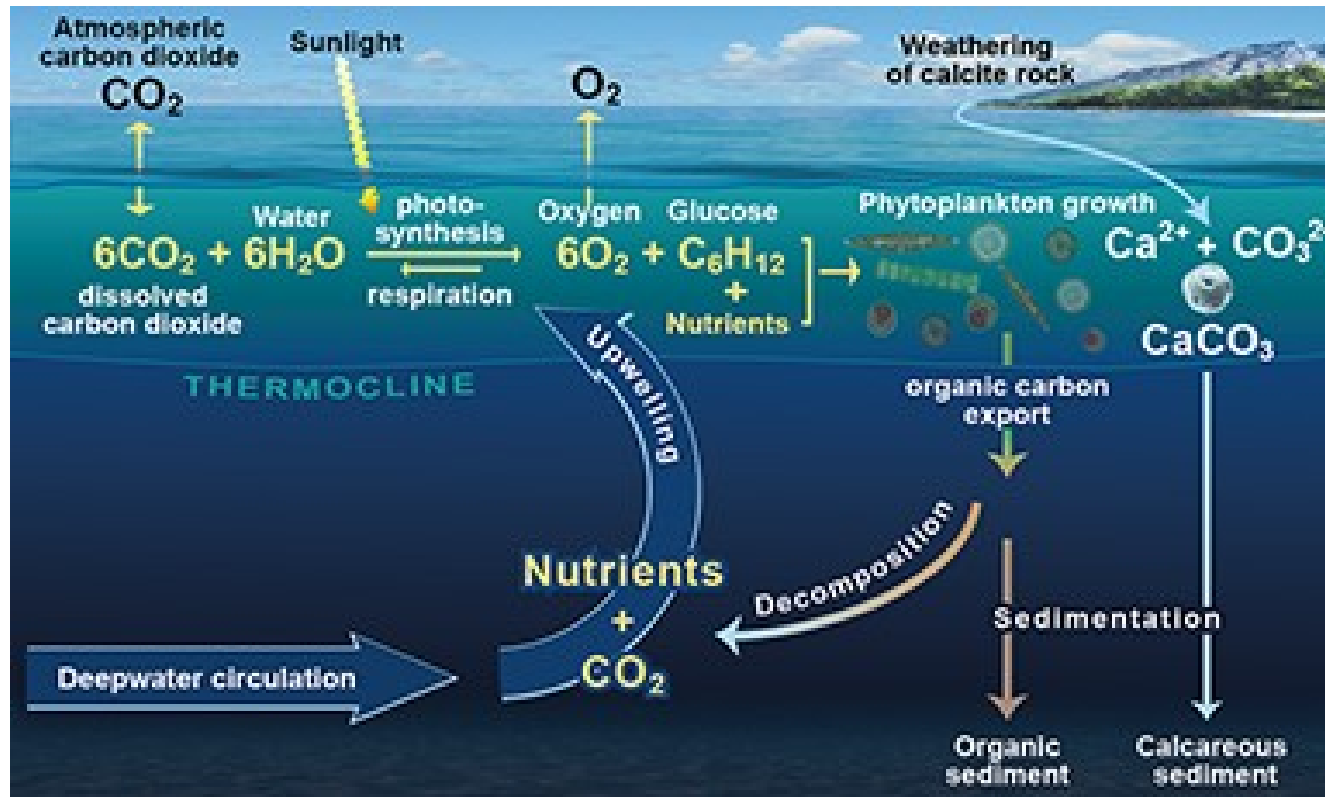
- karbonát schránek a koster organismů má uhlík v rovnováze s mořským a atmosférickým uhlíkem (CO_2)
- díky izotopické „homogenizaci“ či „zprůměrování“ v rámci vysokých rychlostí jejího míšení (v řádu prvních tisíců let)



- Lehčí „organický“ ^{12}C přednostně využívá biota (primárně při fotosyntéze – primární producenti) při vytváření organických sloučenin
- Těžší „anorganický“ ^{13}C přednostně vystupuje do karbonátových komponent organismů a sedimentu

Stabilní izotopy uhlíku

- Změny izotopického složení uhlíku mořské vody spojené s uhlíkovým cyklem mohou odrážet stav globálního ekosystému Země
- Poměr organického (^{12}C) a anorganického (^{13}C) uhlíku ovlivňuje rychlost pohřbívání organického uhlíku a bioproduktivita oceánů
- více pohřbené organické hmoty (s ^{12}C) = větší poměr zastoupení těžšího ^{13}C



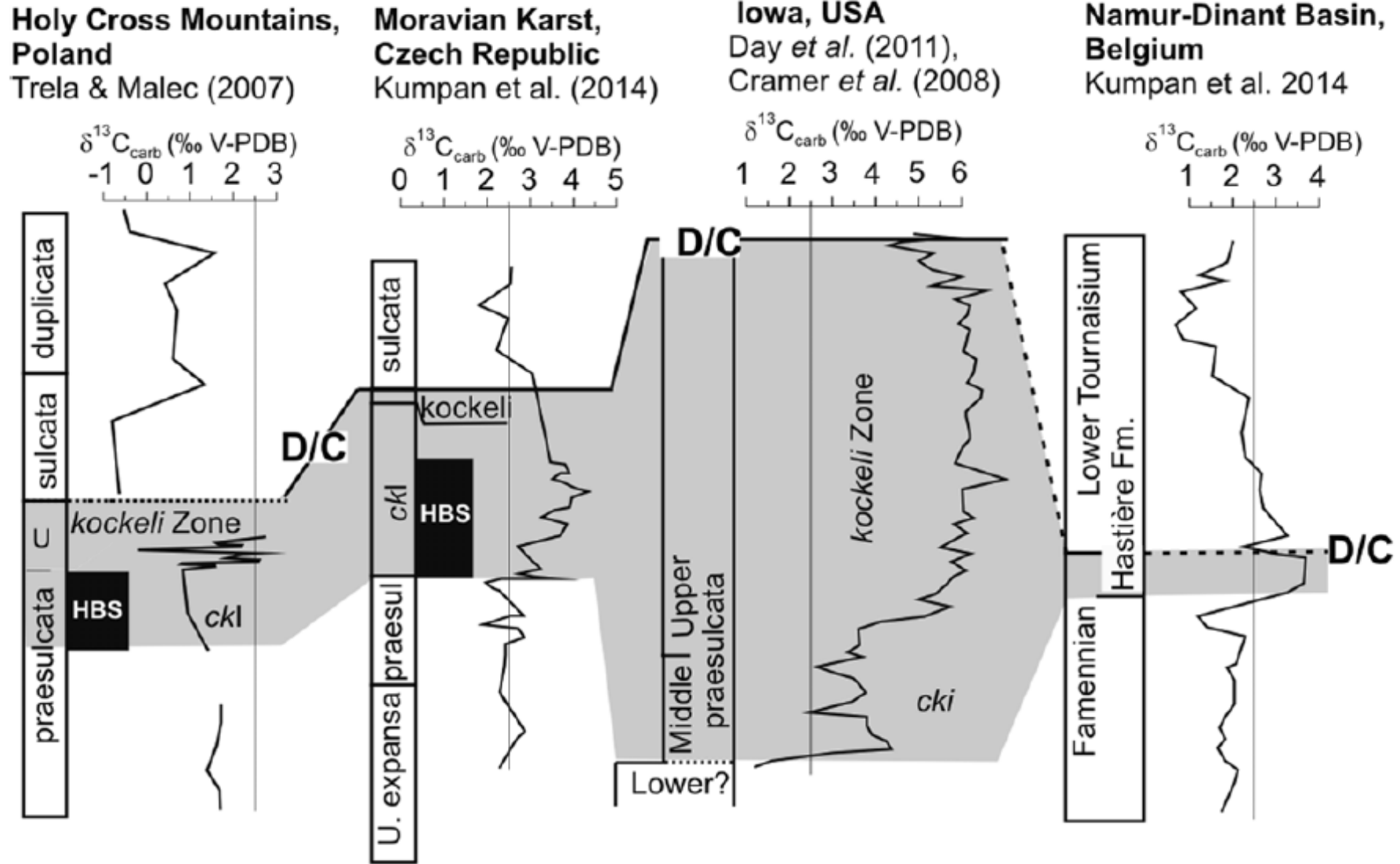
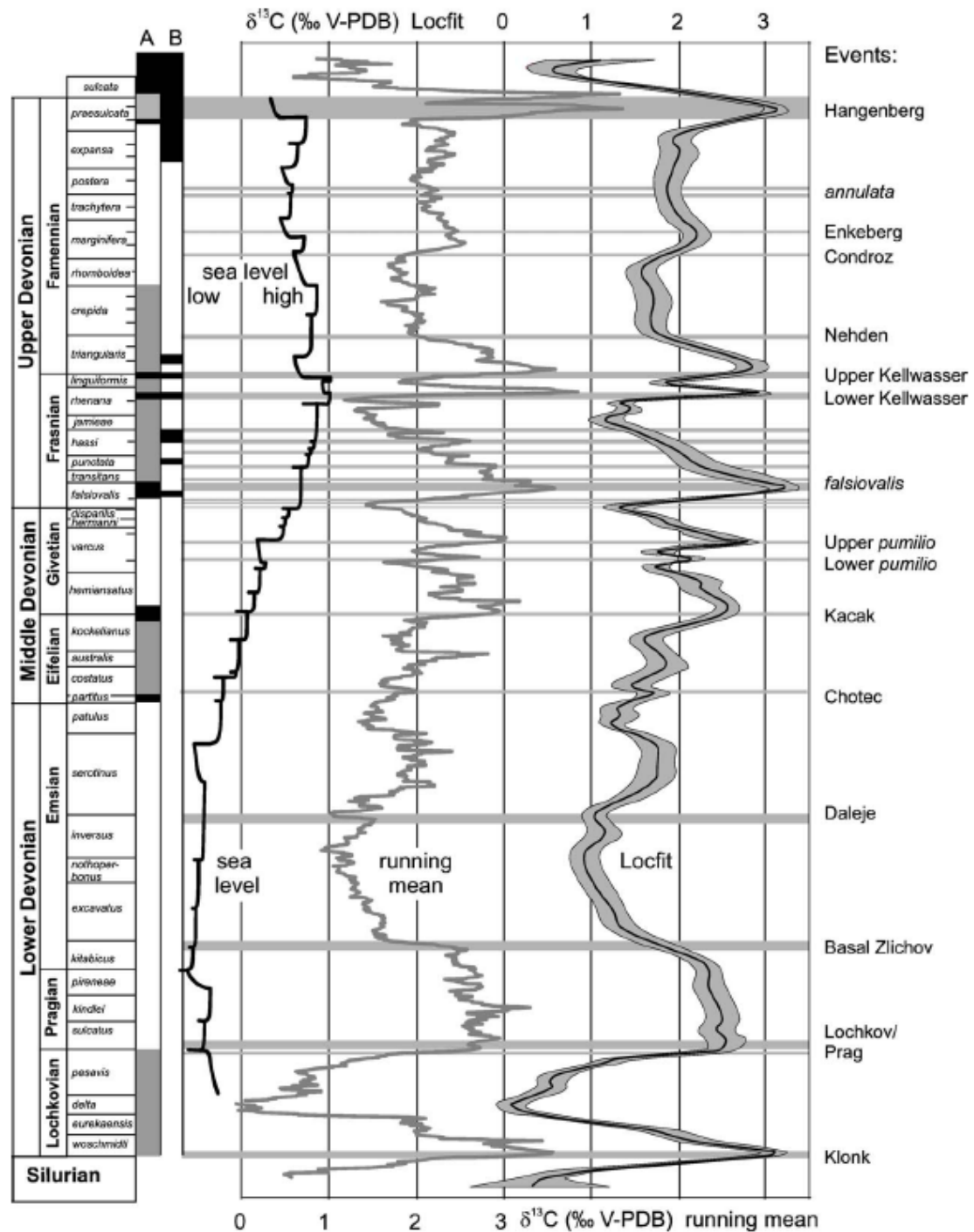
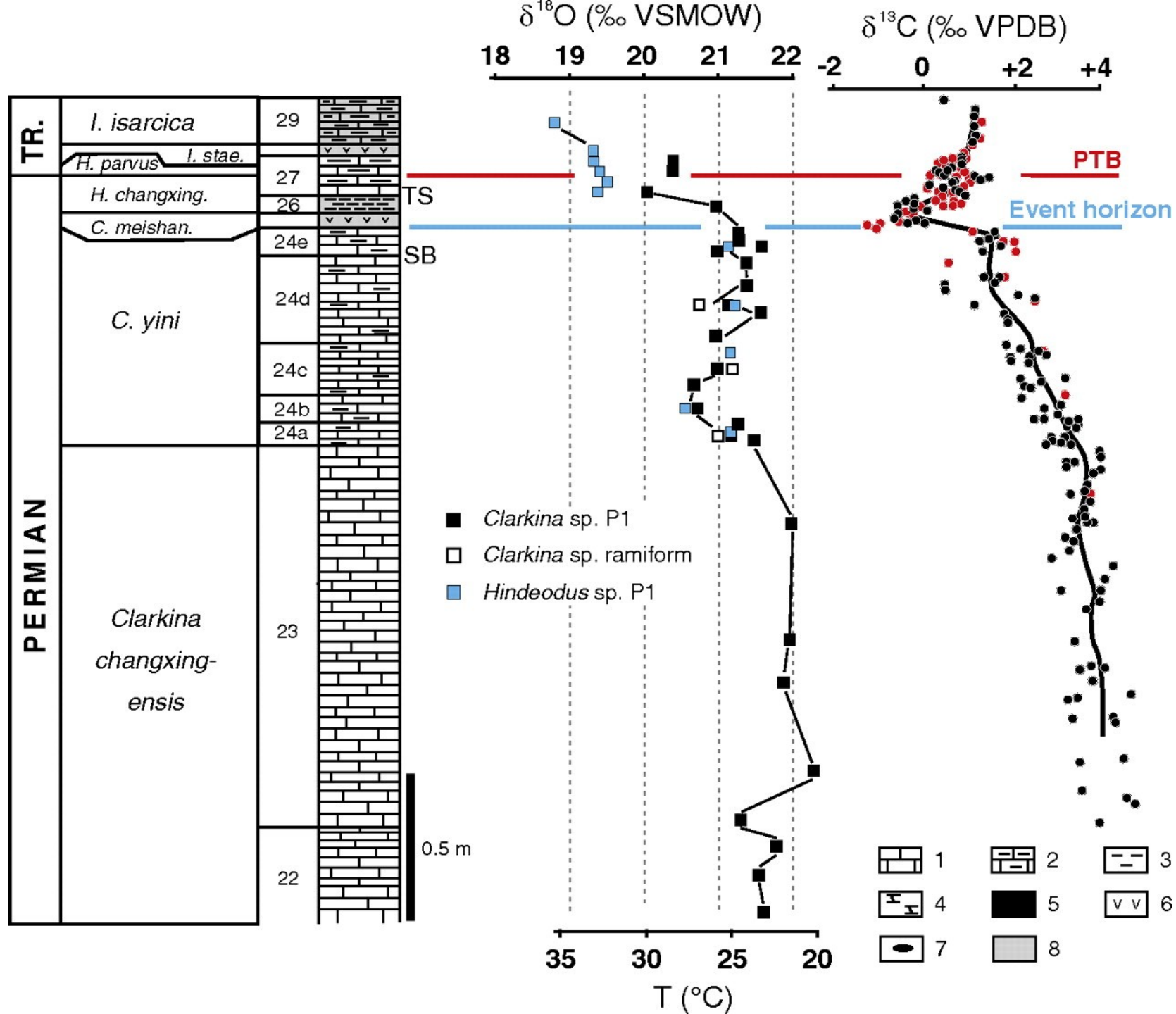


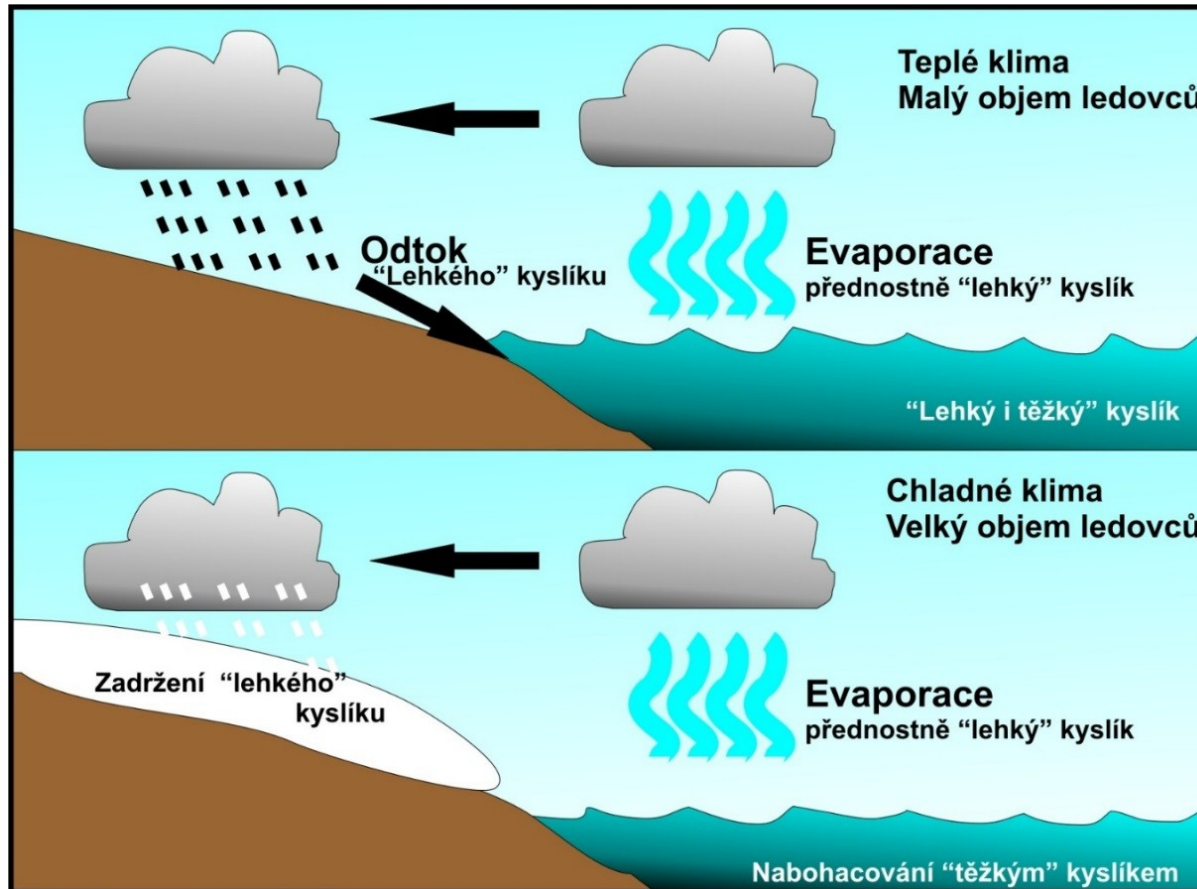
Fig. 14. Carbon isotopes ($\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$) from DCB sections in Europe and North America. Two distinct isotope excursions were found in the *ckl* and/or *kockeli* Zone during the Hangenberg Crisis.





Stabilní izotopy kyslíku

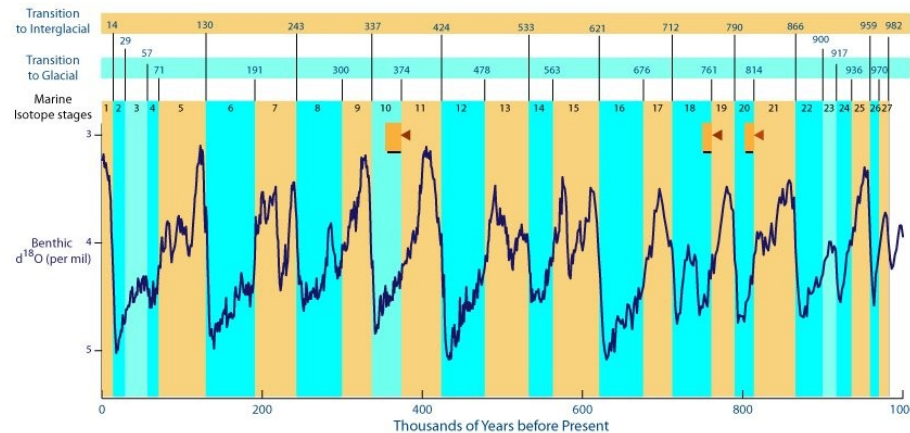
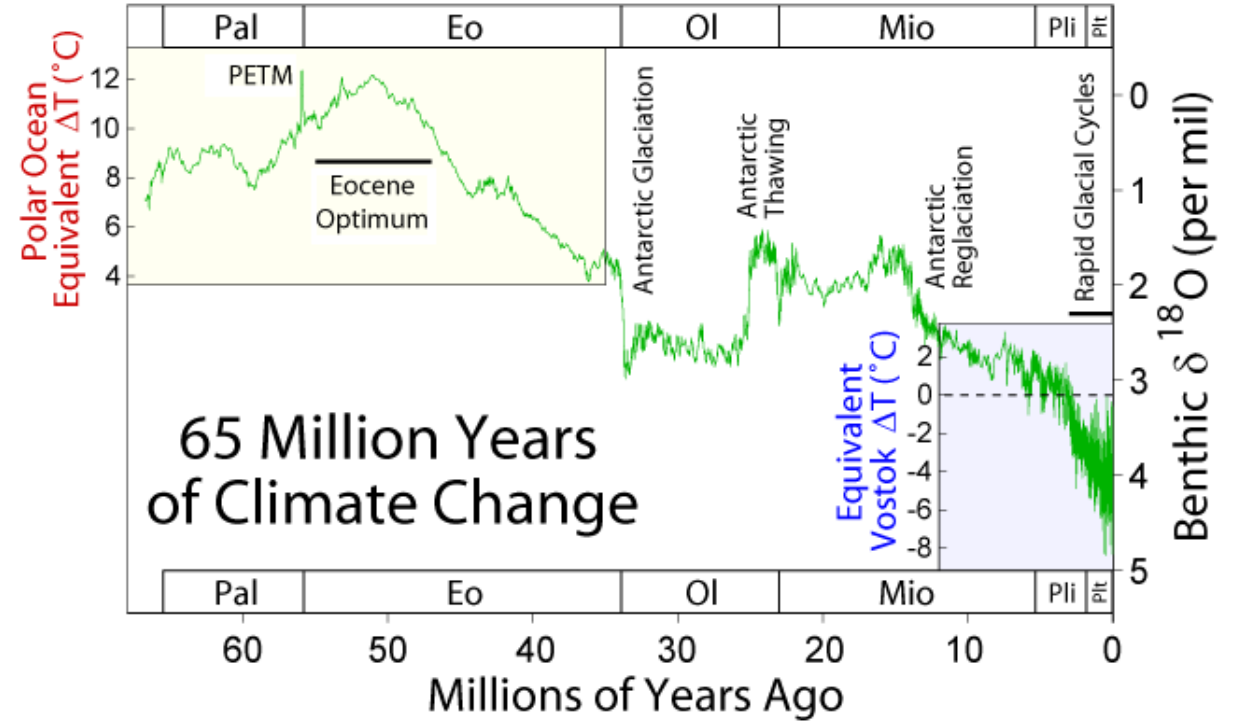
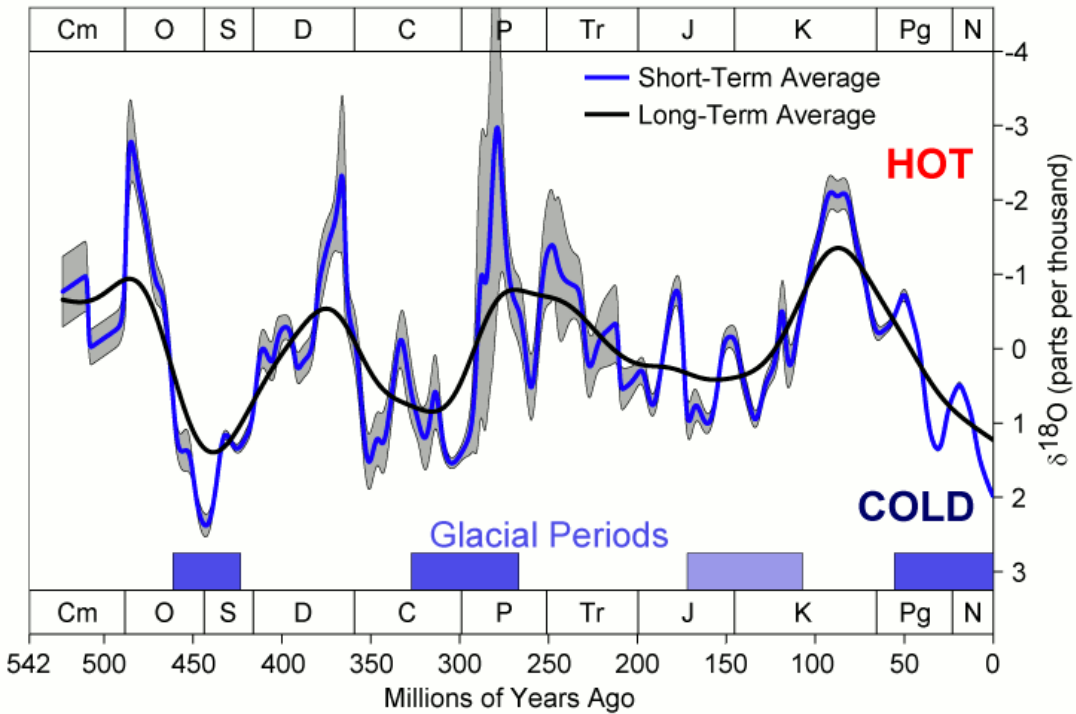
- Izotopické složení mořské vody je vázáno na frakcionační procesy spojené především s hydrologickým cyklem (evaporace, atmosférický transport par a jejich srážení)
- Dlouhodobé zadržování vod ve zvodních či ledovcích má velký vliv na izotopické poměry v oceánech
- Data z kalcitových schránek, z frankolitu kondontů, zubů;



- **Kyslíková paleotermometrie**

Význam izotopického signálu kyslíku

Phanerozoic Climate Change



- Global temperatures, Lisiecki and Raymo 2005
- Marine isotope stages, Lisiecki and Raymo 2005
- Delayed build-up of Arctic icesheet, Hao et al.

Stabilní izotopy stroncia

- $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ globálně uniformní
- poskytují informace o dlouhodobých procesech: orogeneze, klimatické změny nebo eustáze.
- růst $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ je spojen s regresemi, kdy jsou větší území exponována subaerickému zvětrání.
- změny $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ jsou řízeny interakcemi mezi fluviálním vstupem Sr (ze zvětralin) s materiálem z hydrotermální činnosti, spojené především s divergentními litosférickými rozhraními

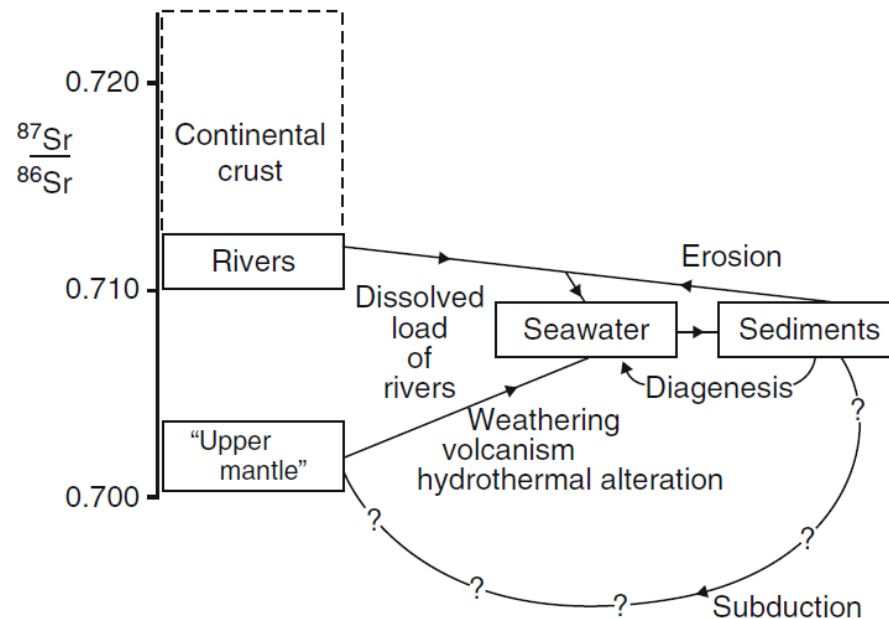
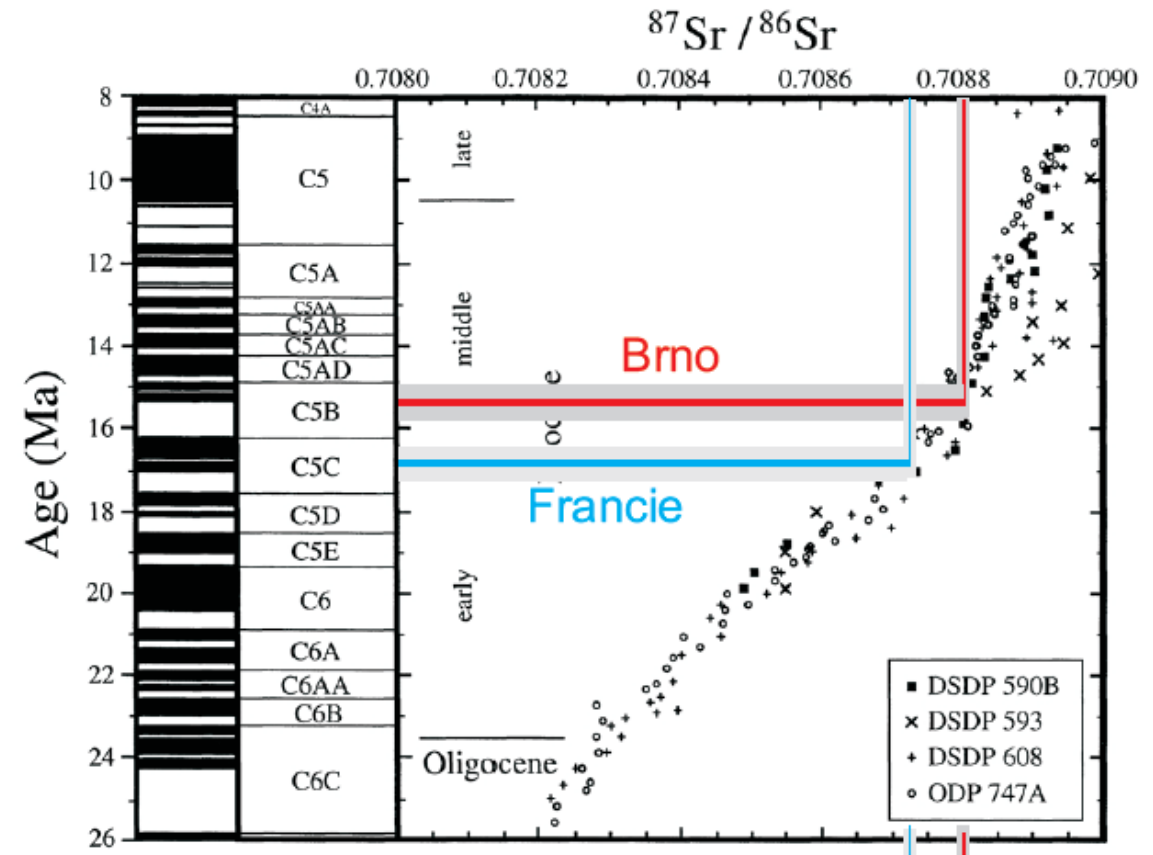
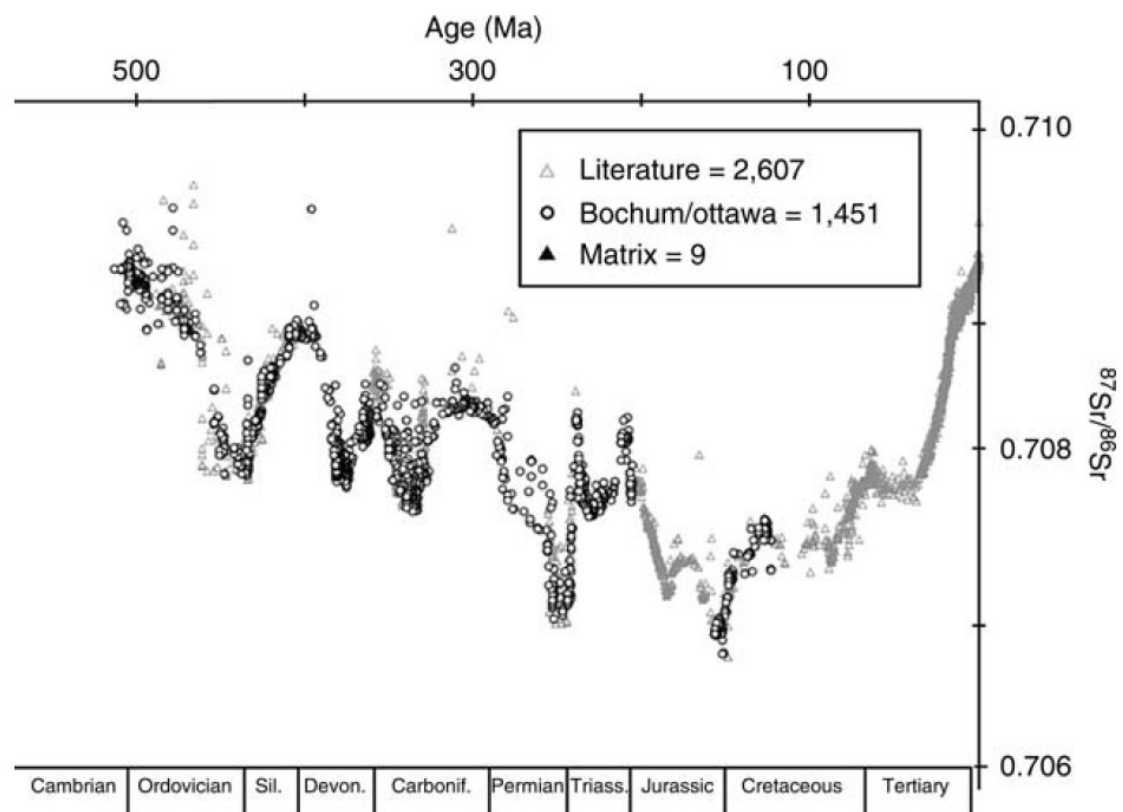


Figure S32 Schematic presentation of Sr isotopic surficial cycle (modified after Wadleigh, 1982).

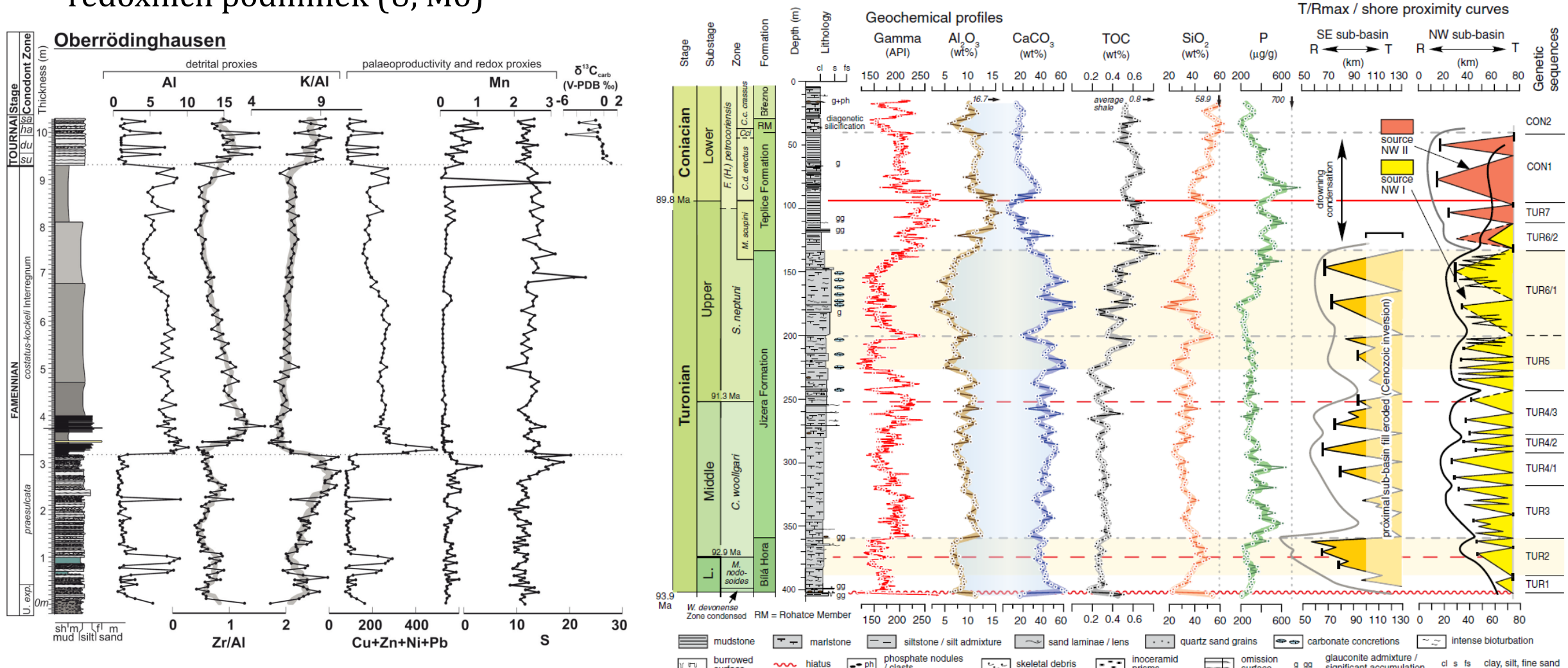
Stabilní izotopy stroncia

- Období nízkého $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ odráží zvýšenou hydrotermální aktivitou,
- zvýšení poměru je obecně vázáno na zvýšený přínos zvětralin
- Detailně vypracované křivky $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ mají, vedle paleoenvironmentálních rekonstrukcí velký korelační potenciál jak v mělkomořských tak v hlubokovodních sedimentech



Chemostratigrafie hlavních a stopových prvků

- Prvkové koncentrace a jejich poměry - paleoenvironmentální interpretace změn:
 - přínosu klastického materiálu (Al, K, Th, Zr, Rb)
 - mořské bioproduktivity (P, Cu, Zn, Ni, Pb)
 - redoxních podmínek (U, Mo)



Chemostratigrafie hlavních a stopových prvků

- prvkový ukazatel změn paleoredoxních podmínek: obohacení redoxně sensitivních stopových prvků (Mo, V, U, ...)
- V redukčním prostředí je Mn extrémně mobilní, zatímco v oxickém prostředí bývá Mn vázán v sedimentech v podobě oxidů a karbonátů.
- Cu, Ni, Zn a Pb se mohou do sedimentů dostat v redukčních podmínkách ve formě sulfidů (ať už jako samostatné sulfidické fáze nebo např. jako součást pyritu) nebo být adsorbovány na organickou hmotu

