



Klimatické změny a jejich odraz ve vývoji života na Zemi

Část 2.

Paleoklimatologie a paleoklimatické archivy

Tomáš Kumpan

kumpan@sci.muni.cz

Ústav geologických věd PŘF MUNI

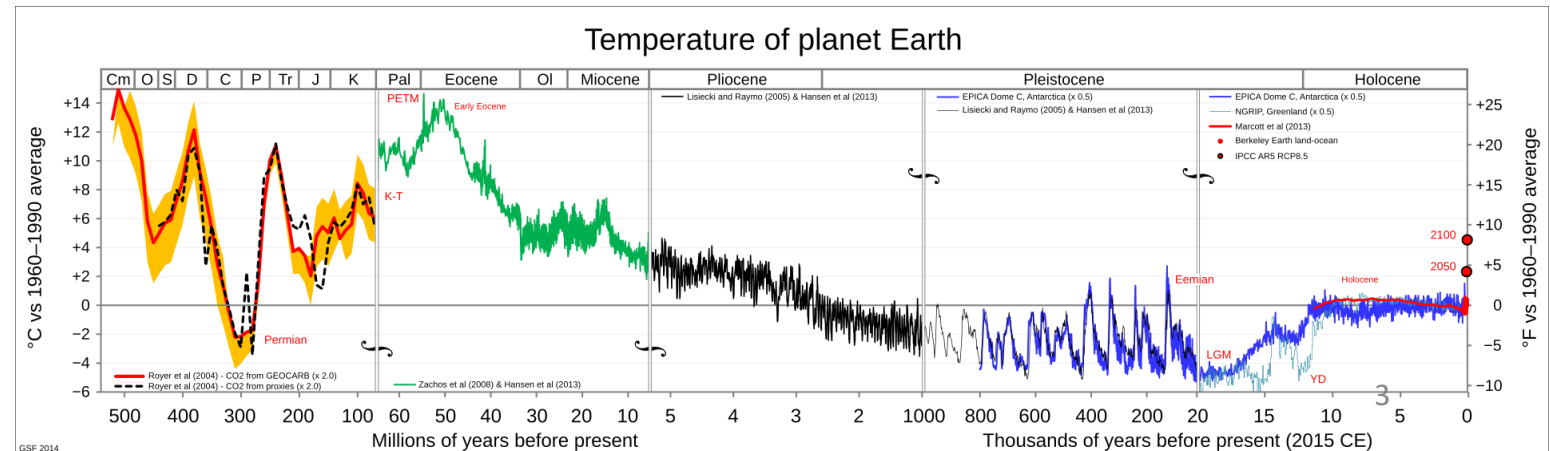
2024

- procesy řídící klima v krátkých i dlouhých časových intervalech jsou známé
- stále je však mnoho detailů, kterým plně nerozumíme
 - *způsobí rostoucí globální teploty zpomalení Golfského proudu a rapidní ochlazení severní Evropy?*
 - *i když se globální klima otepluje, lokálně se některé regiony mohou ochladit a zatímco některá místa se mohou stát sušší, jiná zažijí extrémní deště - podrobnosti a příčiny jsou ale zatím nejisté*
- přímá měření klimatologických parametrů jen z krátké minulosti
- **studium klimatických změn v minulosti je nezbytné, abychom porozuměli tomu, jak se klimatické změny vyvíjejí**
- **studium změn klimatu v dlouhých časových řadách (až stovky milionů let)**
- poskytuje kontrolu správnosti klimatických modelů
- Zlepšování klimatických modelů
- Vhodné modely a znalost scénářů vývoje klimatu umožňují přesnější projekce budoucího klimatu
 - zásadní pro přizpůsobení infrastruktur novým klimatickým podmínkám

Paleoklimatologie

Palaeo – řec. starý

- Vědní obor, který se zabývá studiem klimatu v historii Země
- Při studiu současného klimatu můžeme všechny důležité parametry (teplota, vlhkost, tlak atd.) měřit přímo, systematická měření vedena několik století (např. vynález teploměru v 17. stol)
- **Paleoklima** však nelze „měřit“ zpětně
- Klima v historických dobách lze sledovat na základě zpráv z různých písemných zdrojů, knihoven a archivů
- Z předpísemných dob žádné takové záznamy nemáme
- **Existují však přírodní paleoklimatické archivy, kde po sobě „paleoklima zanechalo různé stopy a otisky prstů, případně předměty doličné“**
- V těchto archivech můžeme nalézt **indikátory paleoklimatických podmínek** – zástupné proměnné neboli **paleoklimaticke proxy** parametry



Proxy

- Parametr, který můžeme změřit nám pomůže přiblížit (**aproximovat**) odhad jiného parametru, který změřit nemůžeme (protože to nejde nebo „už to nejde“)
- ukazatel
- např. v ekonomii – HDP je proxy životní úrovně ; archeologie – počet domů ve vesnici je proxy počtu obyvatel

- Paleoklimatologie využívá produktů chemických, fyzikálních, geologických a biologických procesů, které dobře známe ze současnosti a jejichž „otisky prstů“ můžeme nalézt v paleoklimatických archivech

- Využívá se **principu aktualizmu** = vztahy mezi klimatickými podmínkami, procesy a různými přírodními jevy byly v minulosti stejné jako v současnosti

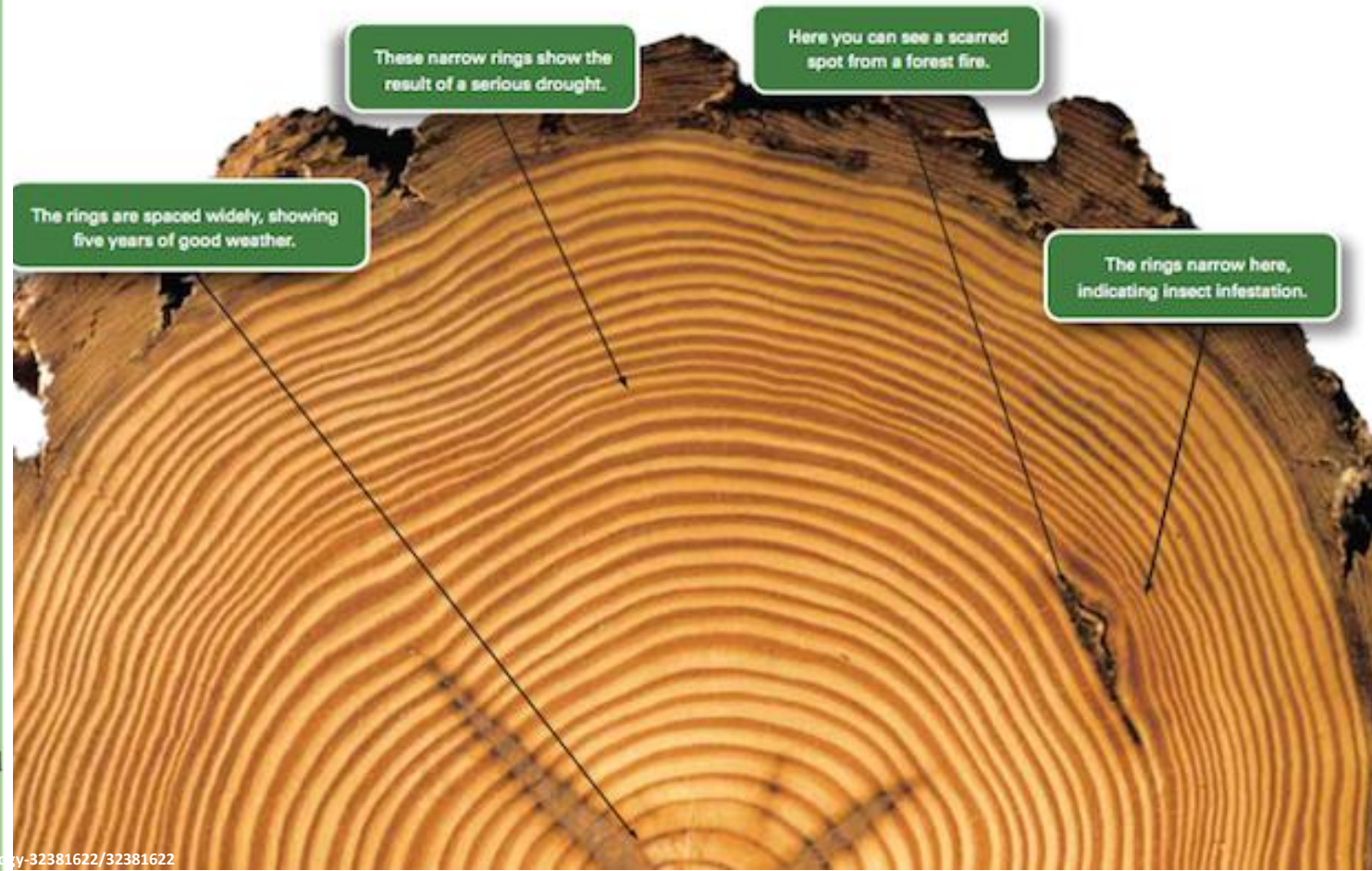
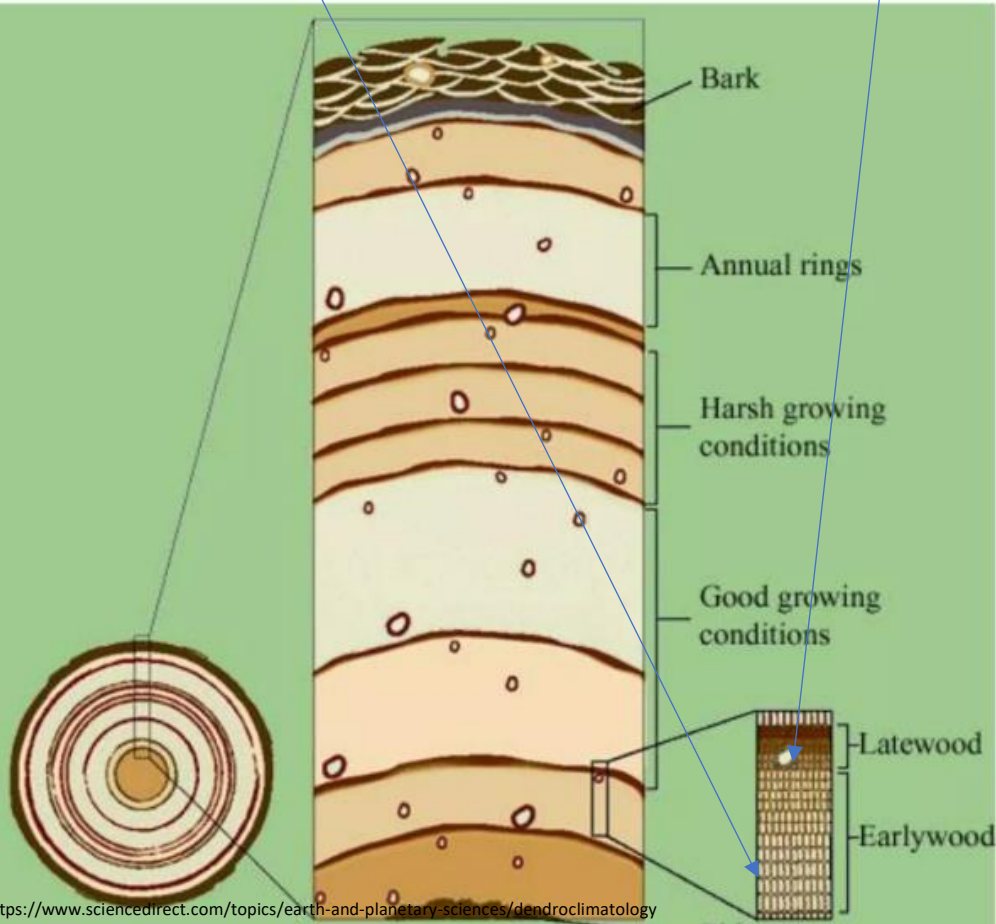
Paleoklimatické archivy

- Dřevo – letokruhy
- Ledovce
- **Usazené horniny**
 - **samotný druh horniny může být velmi vypovídající o klimatu, ve kterém vznikl**
 - **chemické složení**
 - **zkameněliny organismů**
 - **změny mořské hladiny**

Paleoklimatické archivy: Dřevo

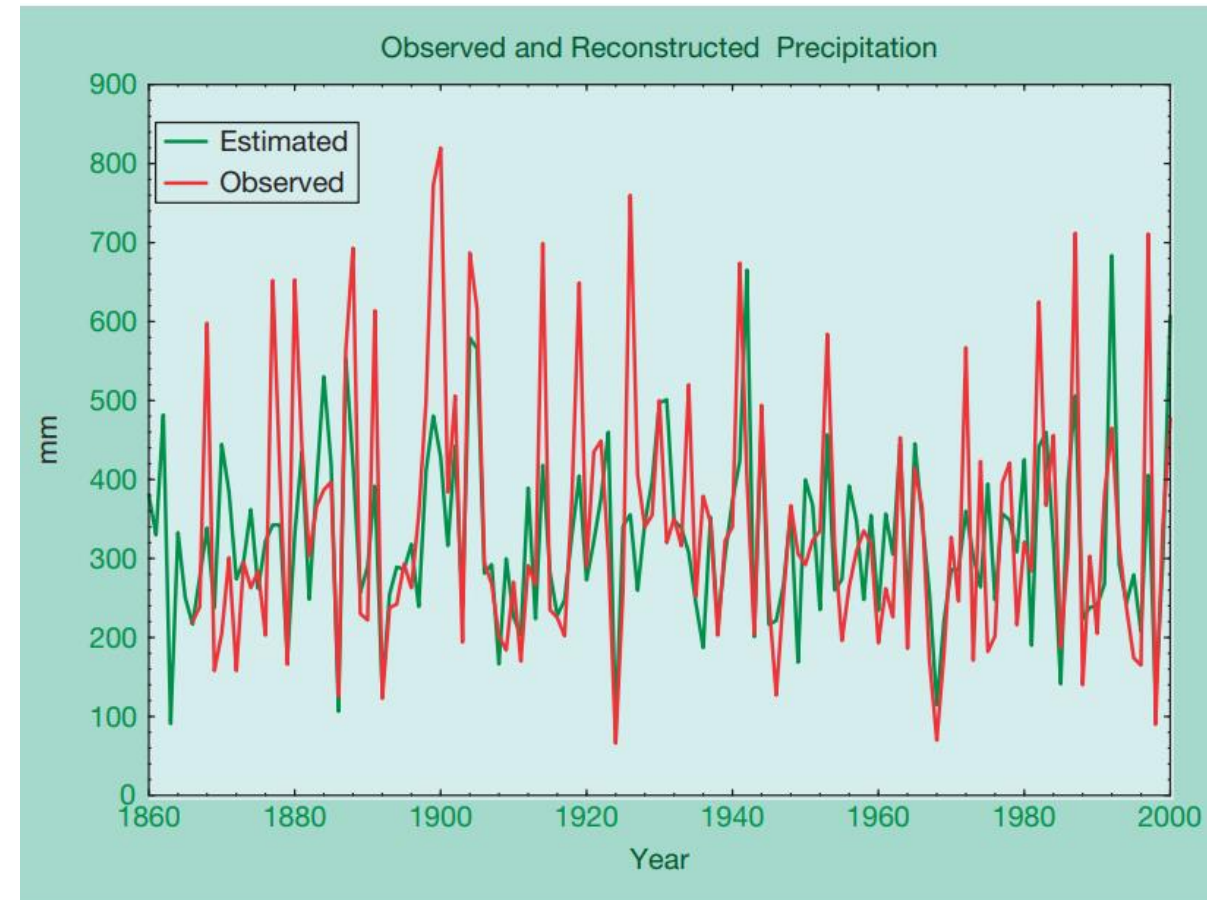
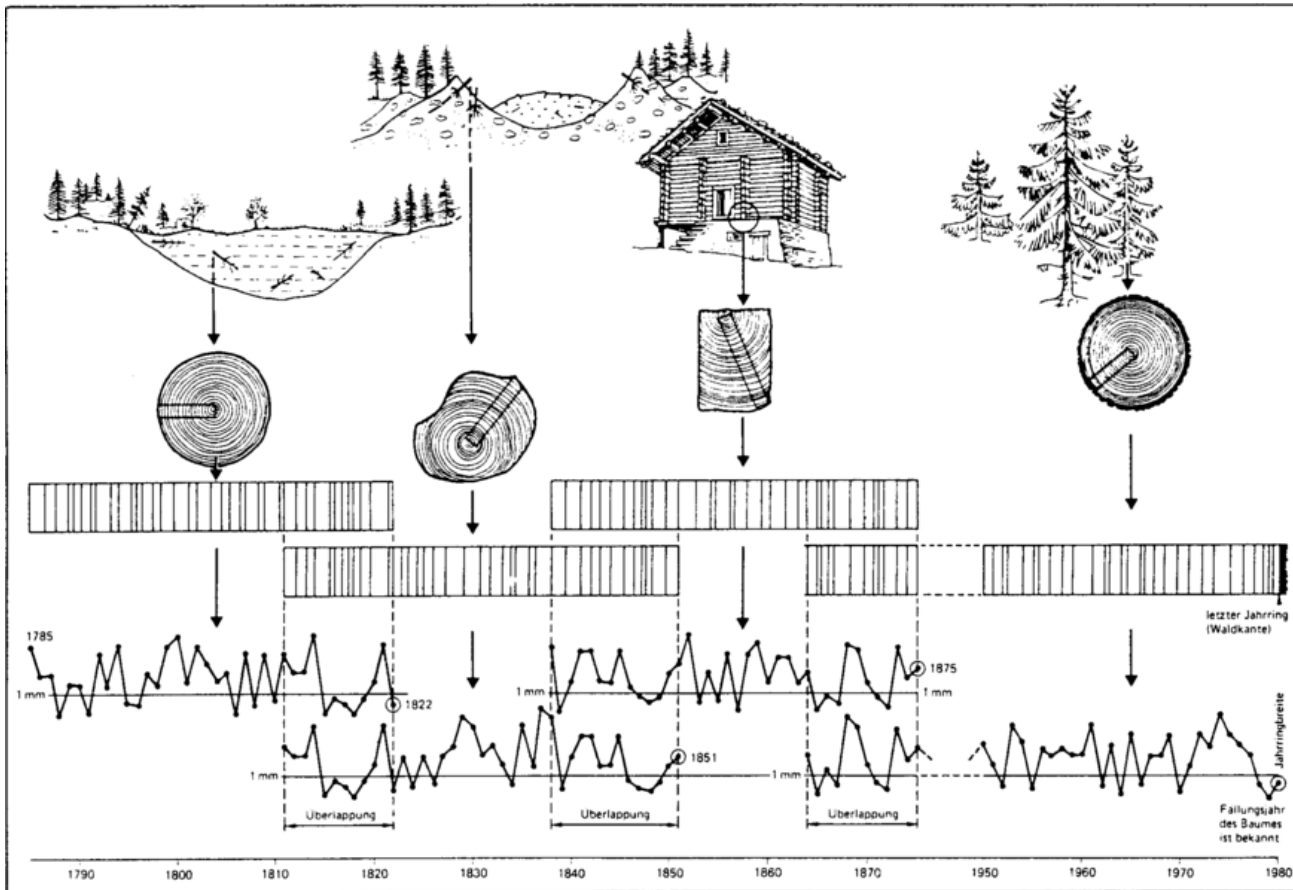
Letokruhy - dendroklimatologie

- světlé jarní, rychle rostoucí dřevo; tmavé letní, „husté“ dřevo
- Užítí pro holocén - nejstarší škála až 12 310 let do minulosti



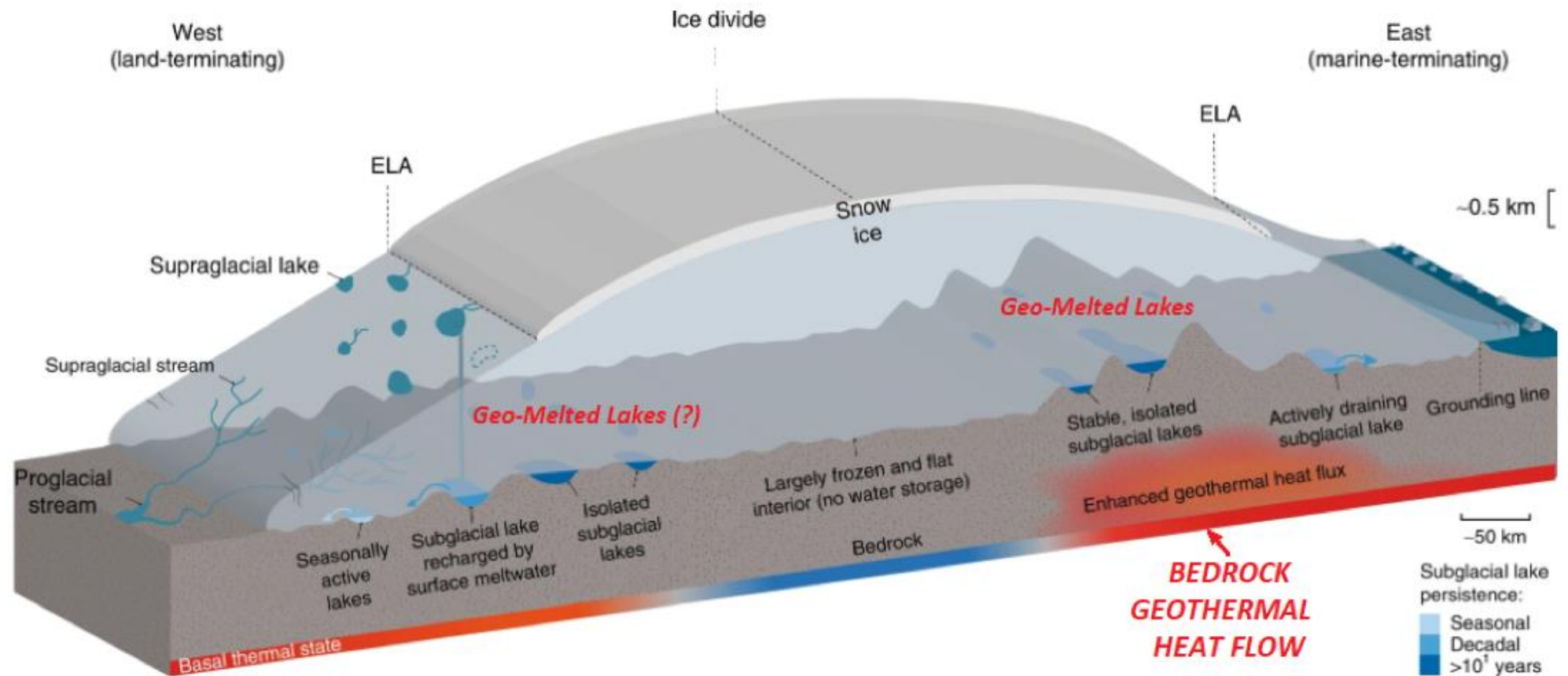


- Dendroklimatické řady se rekonstruují skládáním záznamu letokruhů z různých dřevěných materiálů
- Dendrologický záznam je vlastně jedinečný „čárový kód“ (každý rok je jiný poměr mezi světlým a tmavým dřevem)
- V první řadě se studují žijící staré stromy, vzor letokruhů se pak napojí na starší dřeva v historických stavbách, dále se mohou napojit velmi staré kmeny z náplavů řek

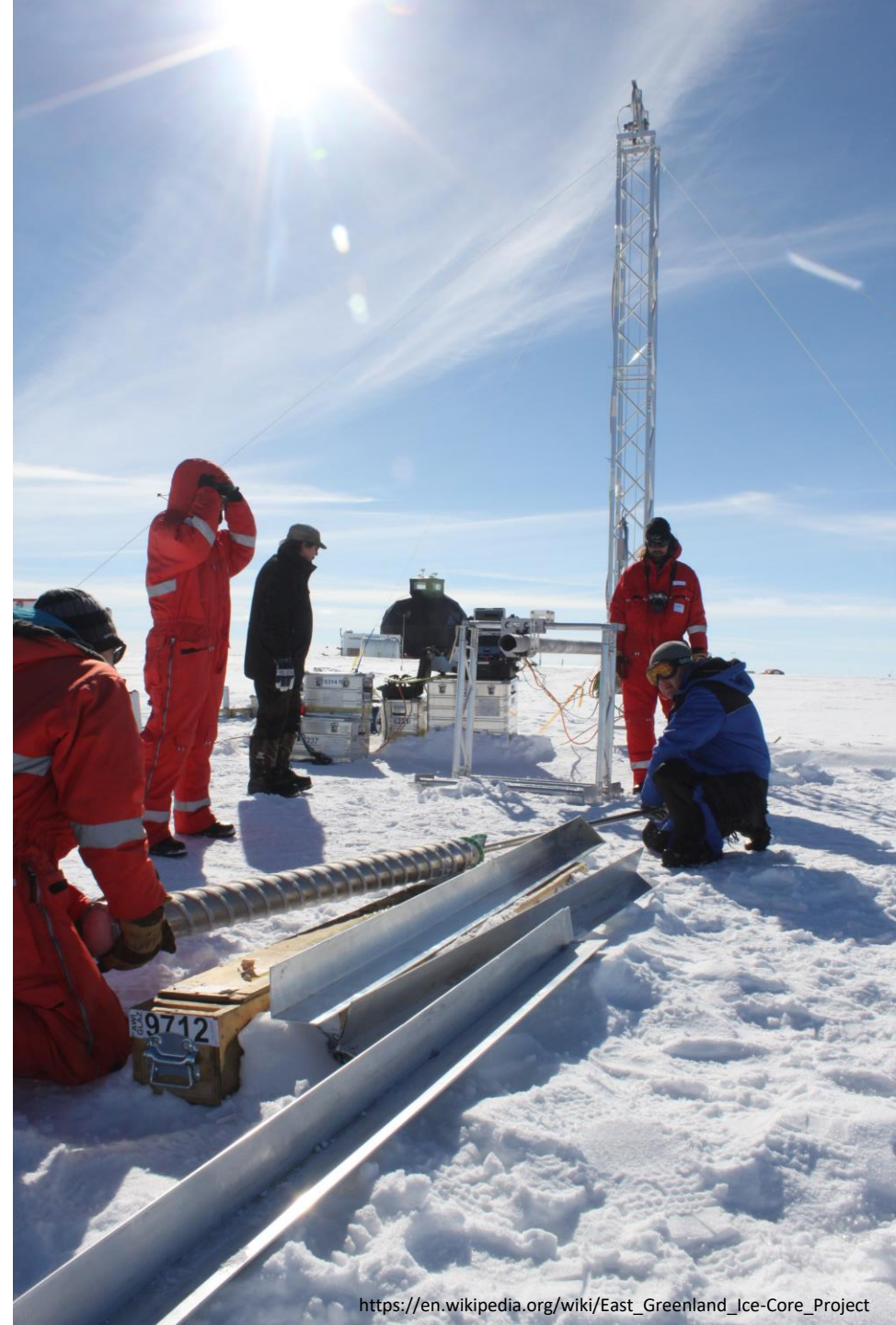
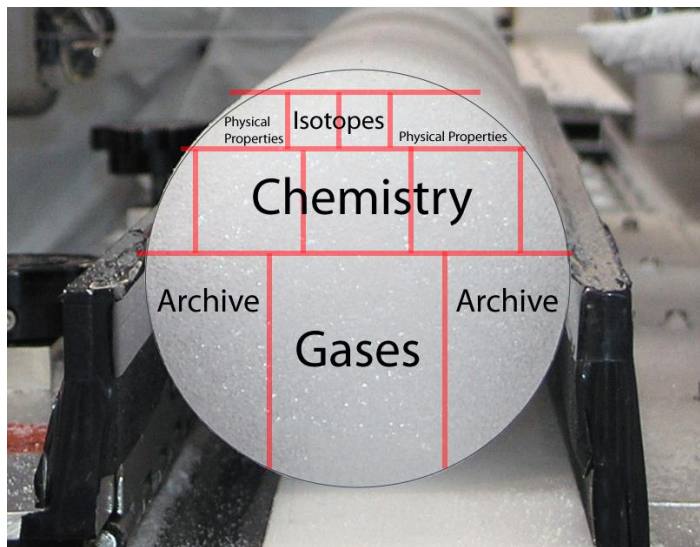


Paleoklimatické archivy: Ledovce

- Studium složení ledu z ledovců
- Led obsahuje informace o složení vody, ze které vznikl
- Voda (především srážková) je v mnoha chemických ohledech v rovnováze se složením atmosféry
- Měření fyzikálních parametrů a především chemického složení ledu

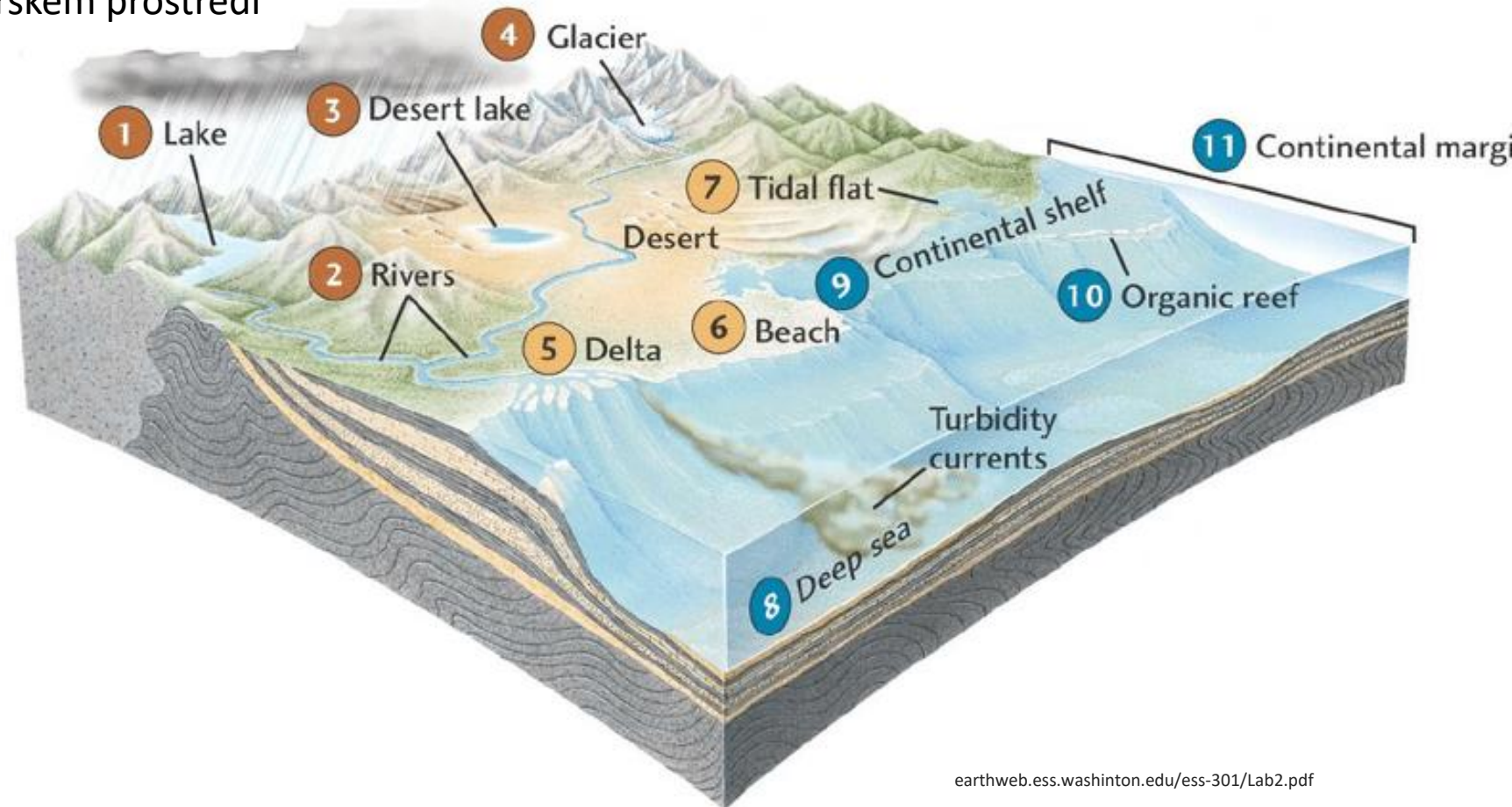


- Studují se vrtná jádra
- Nejstarší provrtané části Antarktického ledovce mají 6 milionů let



Sedimenty, sedimentární horniny

- Do hluboké minulosti klimatu nám umožňují nahlédnout pouze vrstvy sedimentárních (usazených) hornin
- **Nejstarší sedimenty mají stáří 3,9 miliard let** (stáří země 4,54 mld. let)
- Sedimenty a sedimentární horniny vznikají ve všech prostředích povrchu Země
- Většinou zaplňují „prohlubně“, sníženiny - **pánve**, např. mořské pánve, jezera, řeky
- Nejvíce jich vznikne a uchová v mořském prostředí



Sedimenty, sedimentární horniny



Sedimenty z úlomků starších hornin
(např. pískovce nebo slepence)

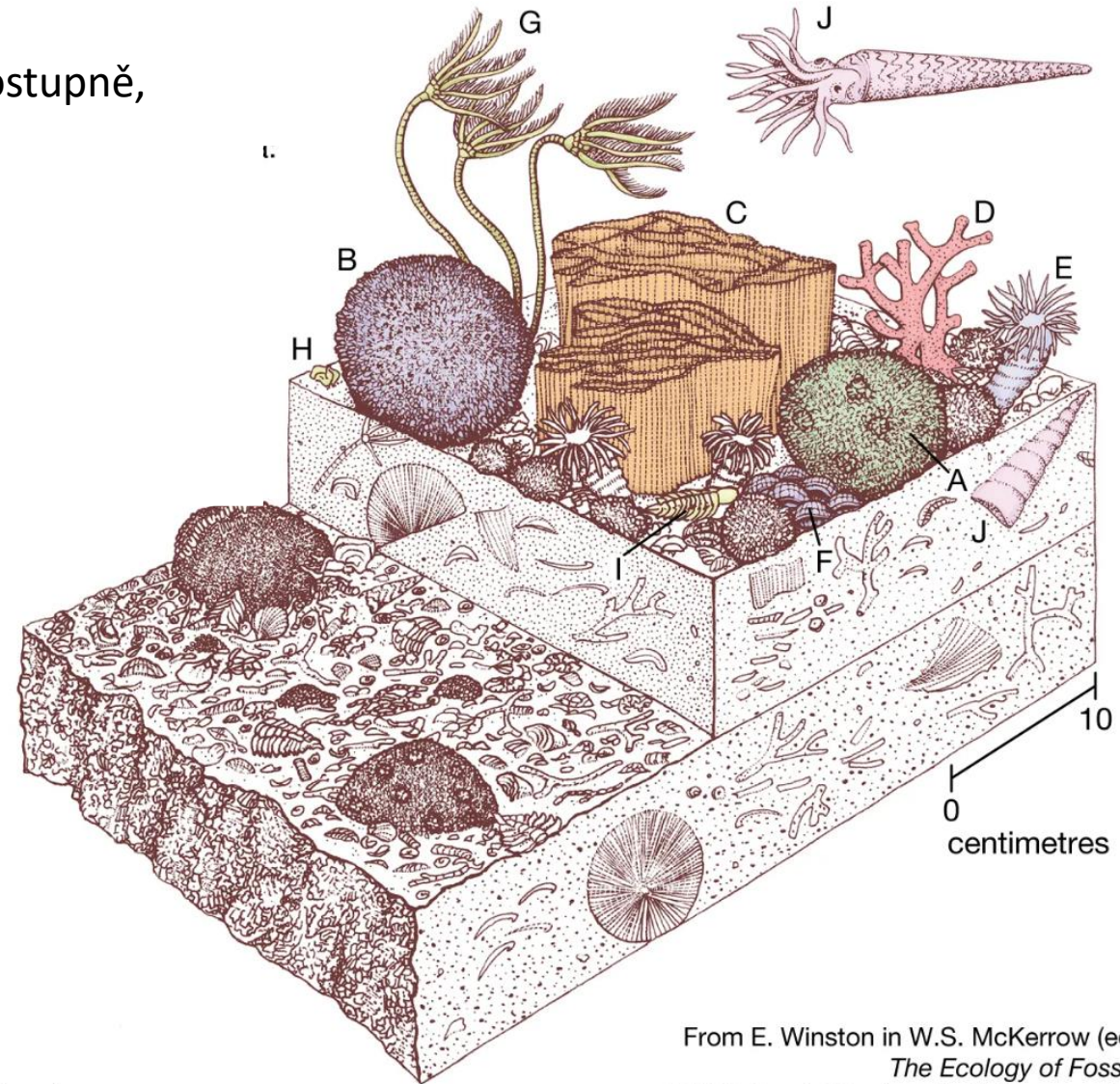
Sedimenty biogenní – vznik ze schránek
a koster organismů
(např. korálové vápence)



Sedimenty chemogenní –
vznik vysrážením z roztoku
(např. sůl kamenná)

Sedimentární archivy přírodního prostředí

- Sedimenty se v pánvích hromadí ve **vrstvách**, často postupně, po dlouhé miliony let
 - každá vrstva vlastně představuje záznam dna pánve z určitého krátkého období



© Encyclopædia Britannica, Inc.

From E. Winston in W.S. McKerrow (ed.),
The Ecology of Fossils,
©1982 Gerald Duckworth & Company Ltd.

Sedimentární archivy přírodního prostředí

- Vrstevní sled pak tedy konzervuje mnoho mořských, jezerních, říčních a dalších den, pohřebných jedno druhým nad sebou
- můžeme sledovat, jak se měnilo prostředí a klima v dané pánvi



Sedimentární horniny můžeme studovat a vzorkovat přímo ze skal, stěn lomů, případně z vrtných jader.



Klimatická proxy

Klimaticky specifické sedimenty

- Klimatické ukazatele v podobě hornin, které vznikají jen v určitých klimatických podmínkách

Vrstvy soli kamenné – teplé a suché klima, kdy dochází k odpařování vody a vzniku této chemogenní usazeniny



Bauxit – vznik v teplém a vlhkém klimatu



- tillity- ledovcové sedimenty – silně nevytříděné sedimenty

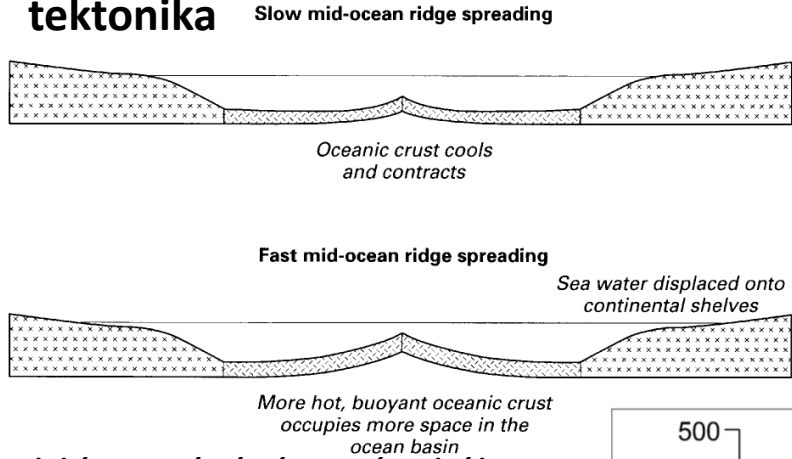
<https://www.antarcticglaciers.org/glacial-geology/glacial-landforms/glacial-depositional-landforms/moraine-formation/>

<https://denstoredanske.lex.dk/bauxit>

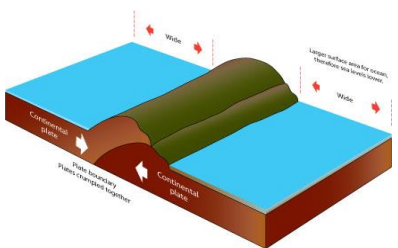
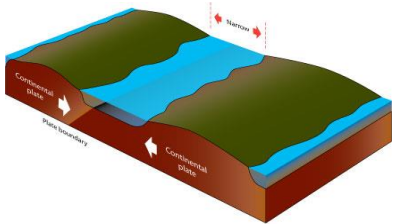
Globální (eustatické) změny úrovně mořské hladiny

- Eustatická hladina světového oceánu je řízena

1) změnou velikosti oceánských pánví – hlavní vliv desková tektonika



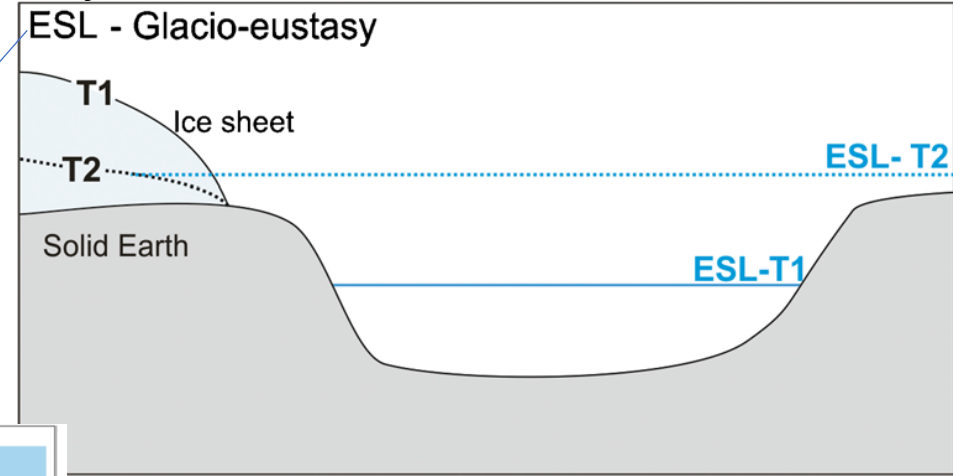
Rychlé rozpínání oceánského dna = vysoké středooceánské hřbety vytlačují vodu



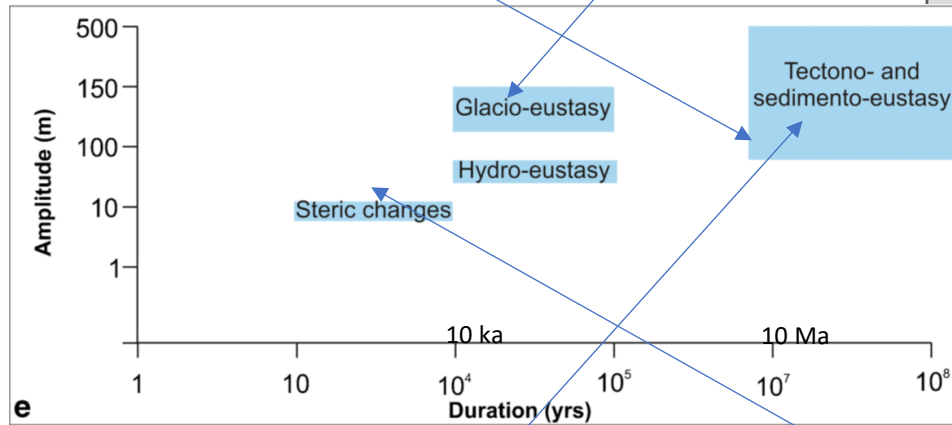
Srážka kontinentů uzavře úzké hluboké oceány = oceánské pánve jsou rozsáhlejší, hladina tak klesá

2) Změnou objemu oceánské vody – hlavní vliv má klima

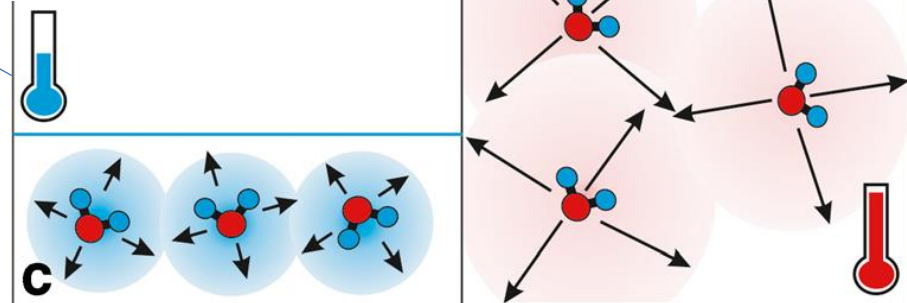
Glacioeustáze – vázání oceánské vody v ledovcích snižuje hladinu oceánů;



Teplotní roztažnost molekul vody. Čím tepleji, tím větší objem (při oteplení o 10°C růst hladiny o cca 10 m)



SL - Thermosteric changes

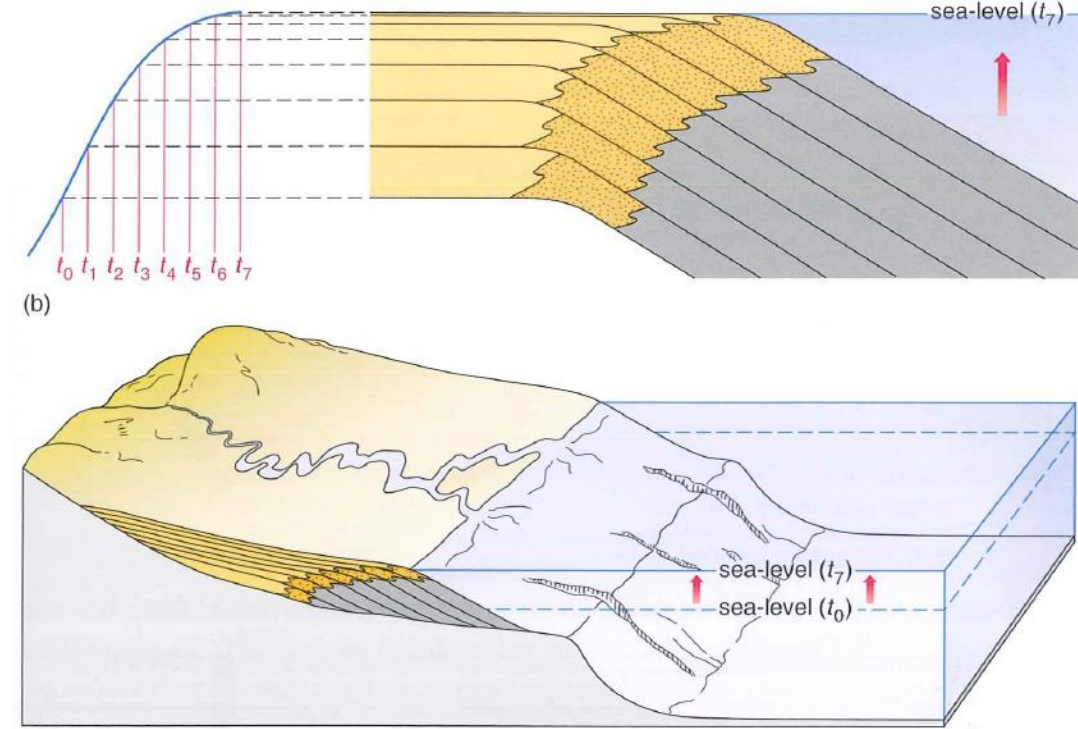


KVÍZ 3



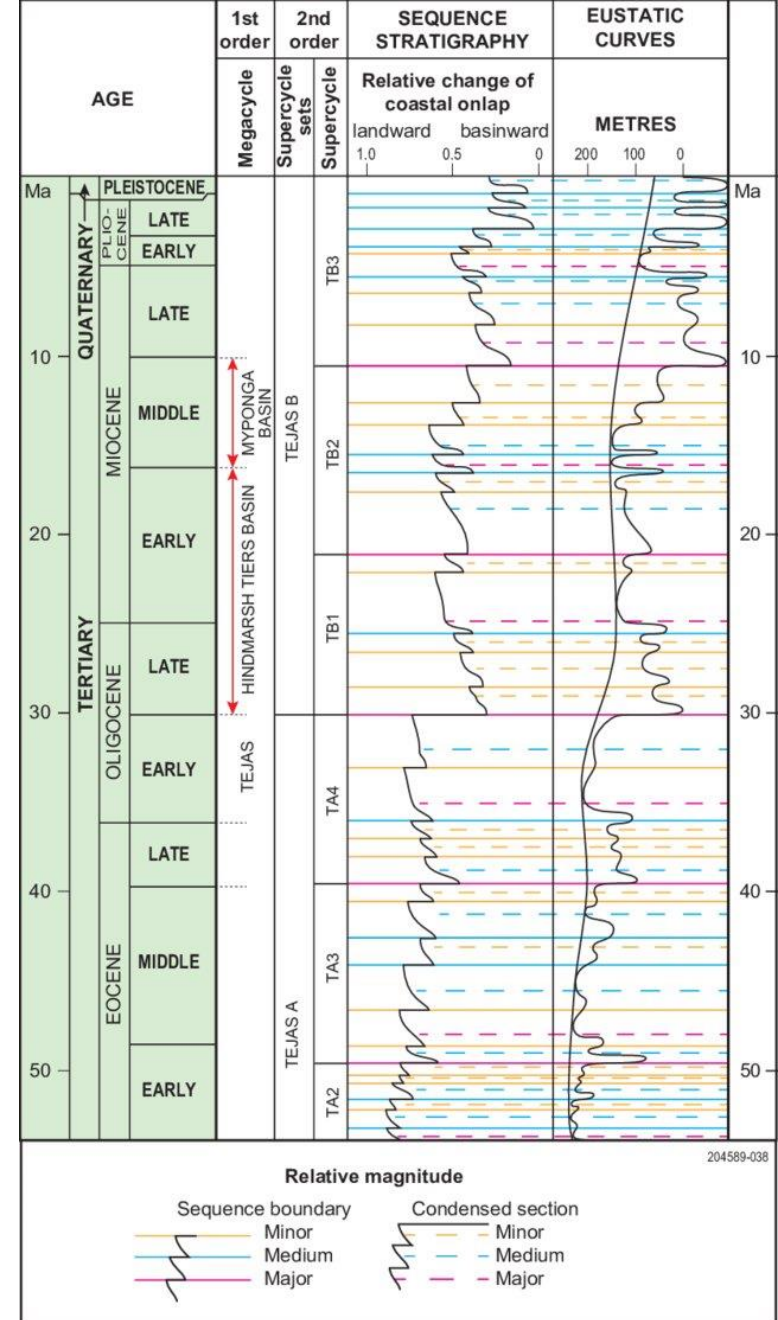
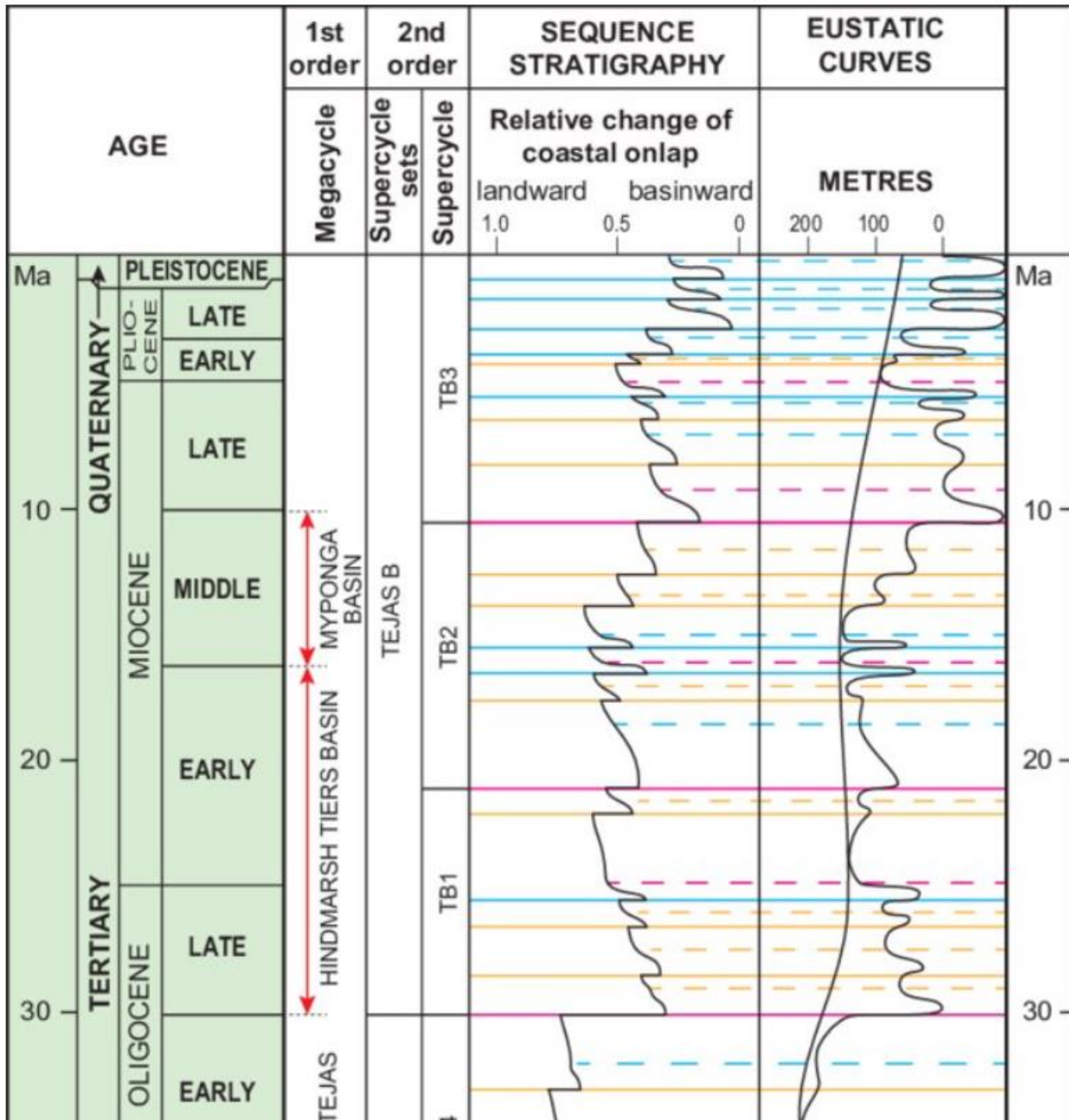
jílovec

pískovec



- vrstvy sedimentů zaznamenávají posun lokace různých přírodních prostředí – v mořských sedimentech velmi ovlivněno hloubkou a pozicí březní čáry
- V **profilu** vrstev jsou nad sebou sedimenty různých prostředí
 - jemnozrnný tmavý **jíl** v hlubokomořském klidném prostředí
 - **písek** v mělkomořském plážovém prostředí
- Tato prostředí byla v čase usazování v pánvi vedle sebe a jak se měnila hloubka a březní čára, prostředí měnila pozici a přesouvala se, zanechávajíc za sebou sediment
- Po analýze vrstev sedimentů pak lze rekonstruovat změny mořské hladiny





Fosilie (zkameněliny)

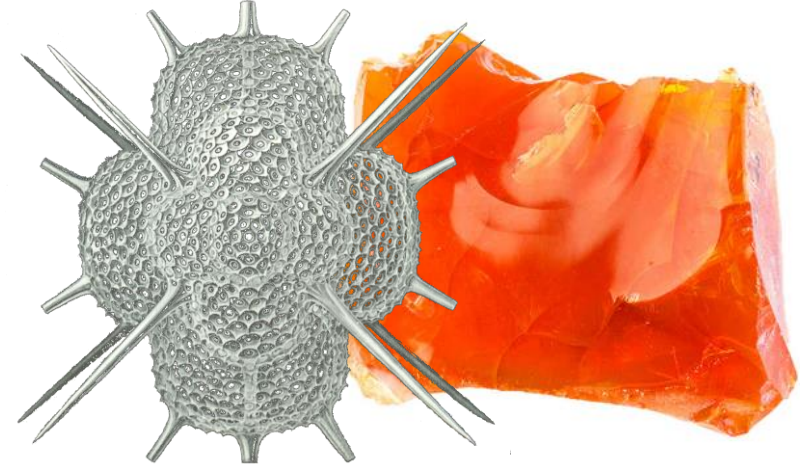
- Sedimentární horniny mohou obsahovat fosilie - pozůstatky vymřelých organismů
- Vyskytují se buď jako sedimentární částice nebo můžou kompletně horninu tvořit (vápenec, uhlí atd.)
- V naprosté většině se jedná o pevné součásti (kostry, schránky), které jsou nejběžněji tvořené z těchto materiálů:

- vápnité schránky a kostry z minerálů aragonitu a kalcitu



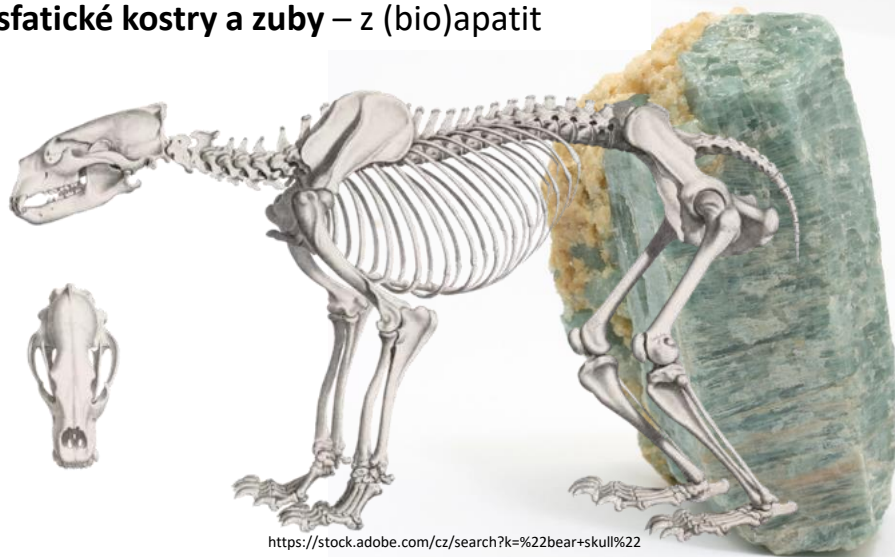
<https://pixabay.com/cs/photos/sko%C5%99%C3%A1pka-h%C5%99ebenatky-poutn%C3%AD-sko%C5%99%C3%A1pka-2479831/>

- křemité schránky z opálu



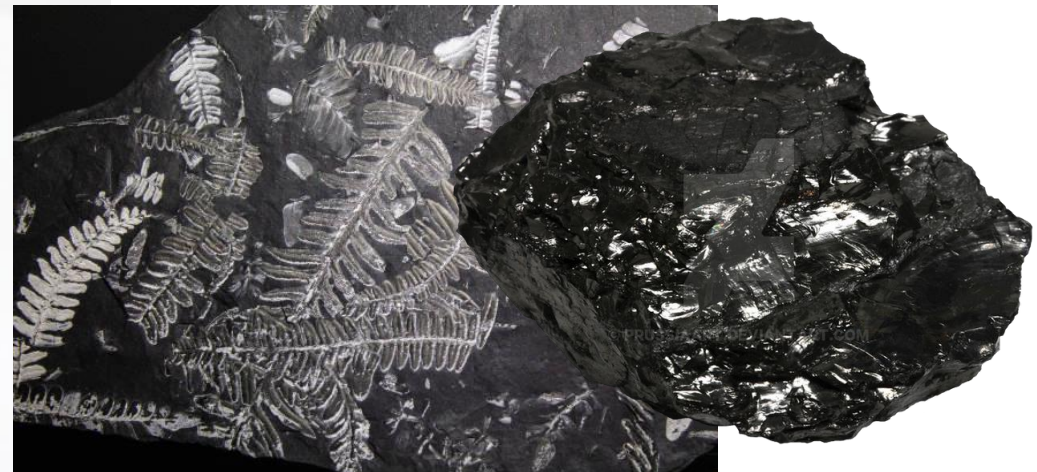
<https://en.wikipedia.org/wiki/Tholoniidae>

- fosfatické kostry a zuby – z (bio)apatit



<https://stock.adobe.com/cz/search?k=%22bear+skull%22>

- rostlinná pletiva z organické hmoty (s organickým uhlíkem)



<https://www.istockphoto.com/cs/search/2/image-film?phrase=plant+fossil>

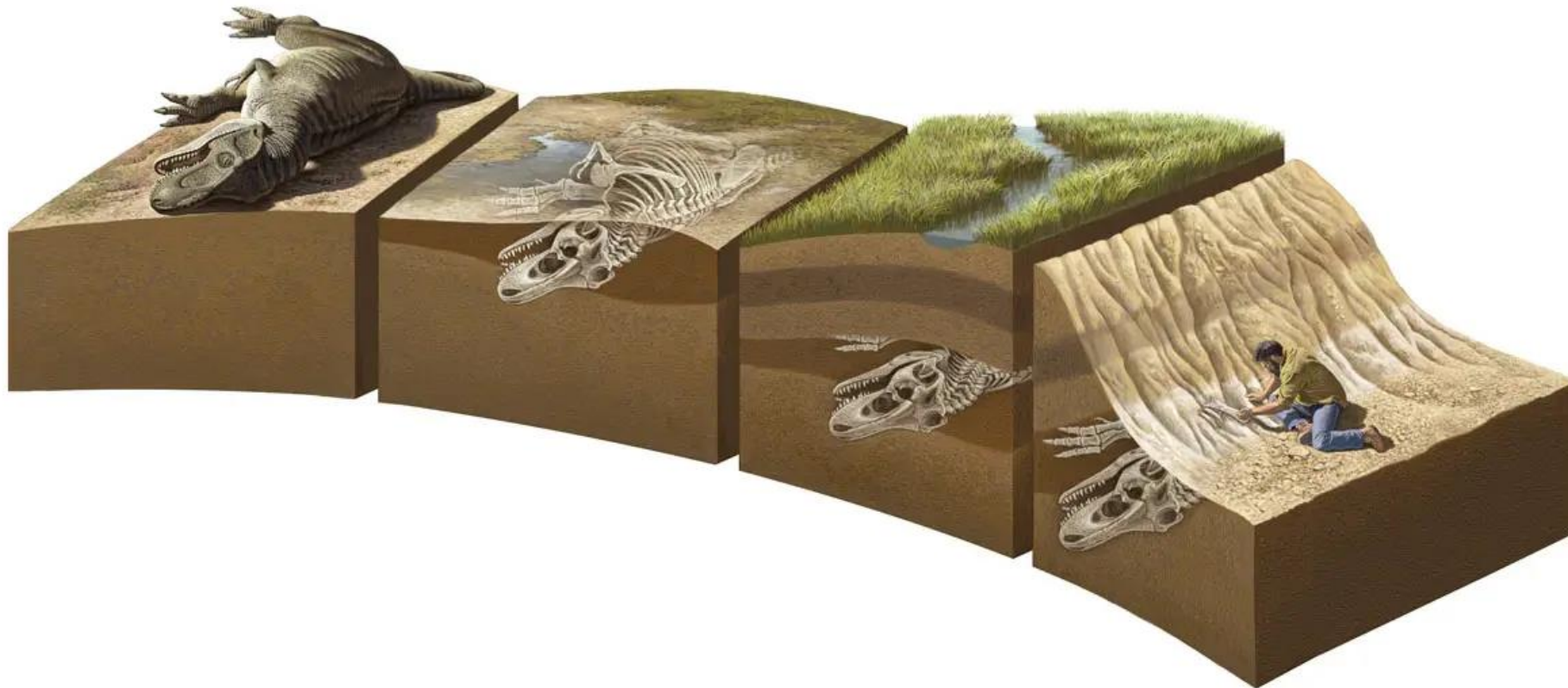
Fosilie

- Mohou se však zachovat i měkké tkáně
- Jedná se o vzácné případy, kdy došlo k souhře mnoha tafonomicky příznivých okolností
- Např. přírodní mumie a nebo extrémně dobré zachování v horninách (většinou jemnozrnných, jako jsou břidlice a jílovce), tzv. Lagerstätte; Často památky UNESCO



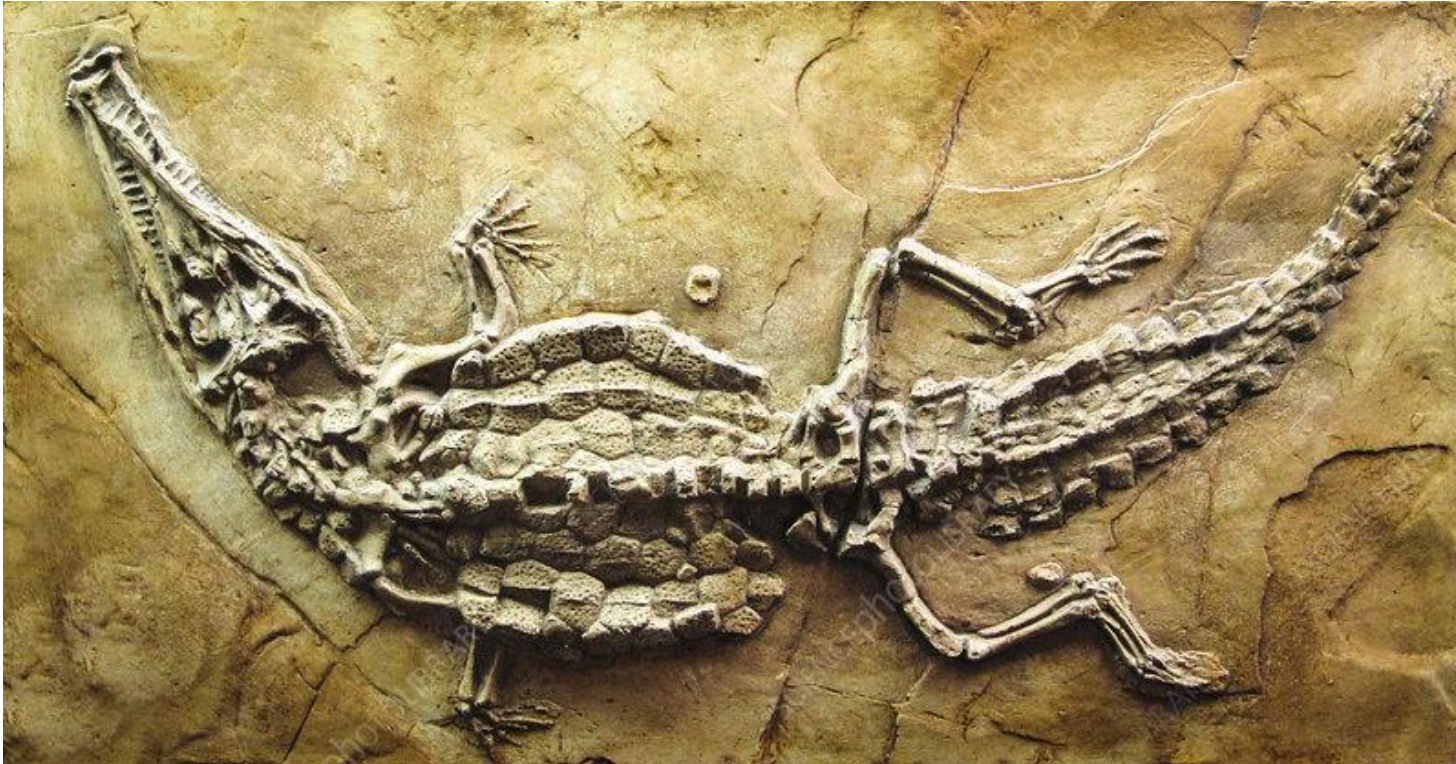
Fosilizace

- Proces fosilizace může probíhat mnoha způsoby
- Důležité je rychlé překrytí ostatků živočichů nebo rostlin sedimentem - čím rychlejší pohřbení a jemnozrnnější sediment, tím lepší zachování
- V pórech mezi zrnky, které tvoří usazené horniny, pomalu proudí podzemní voda a ta může zbytky rozpustit nebo s sebou přinést různé sloučeniny a změnit původní složení organického zbytku, např. tkáně mohou mineralizovat na anorganické minerály



Klimaticky specifické organizmy - fosilie

- Paleontologické klimatické ukazatele
 - např. nálezy zkamenělin organismů typických pro tropy/arktické klima
- Aligátoři se vyskytují pouze v tropických oblastech.



<https://www.sciencephoto.com/media/1221908/view/140-million-years-old-alligator-fossil>

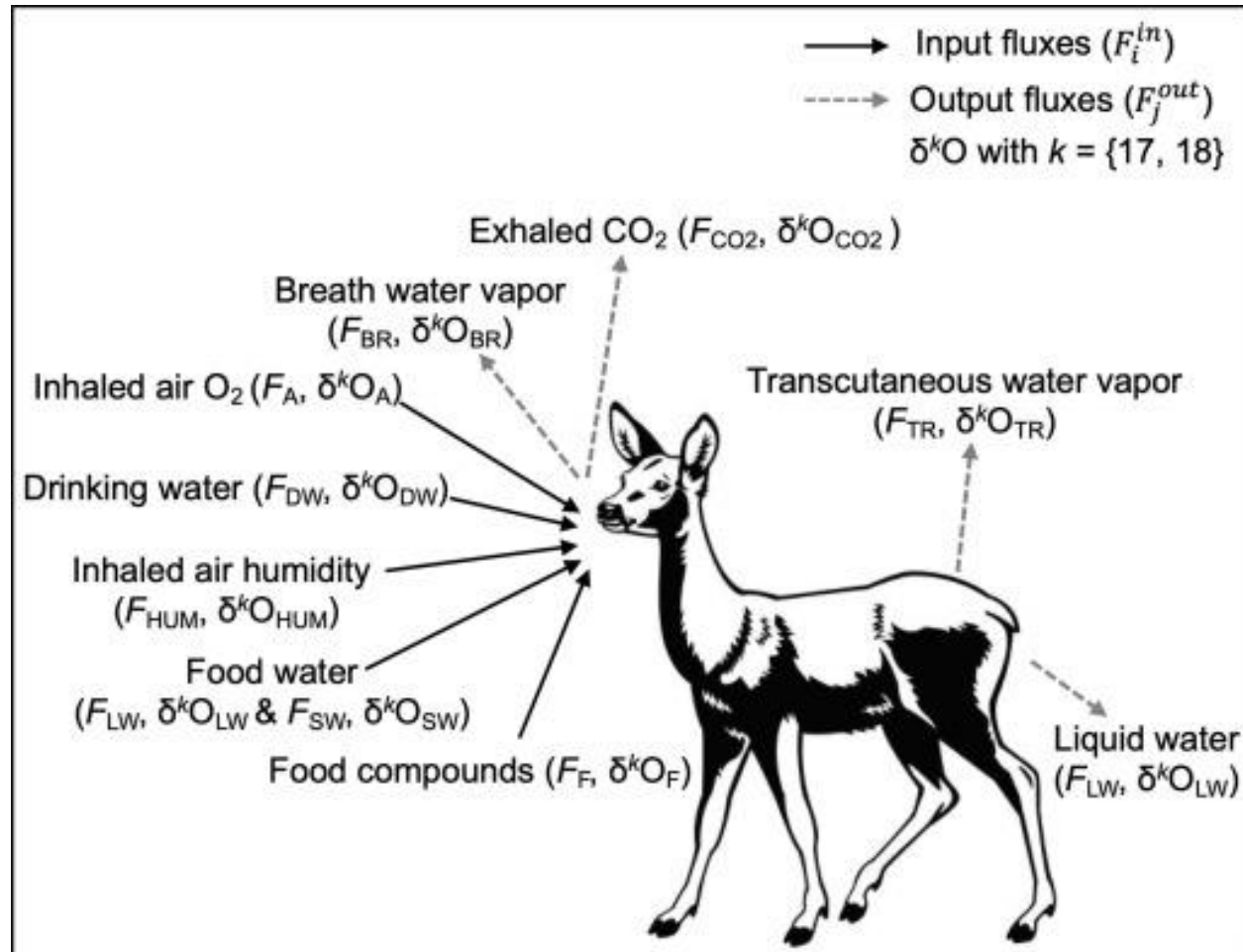
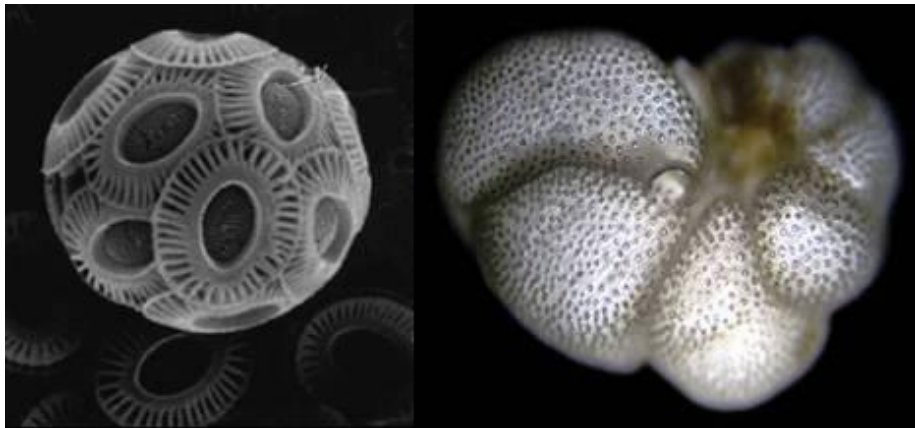
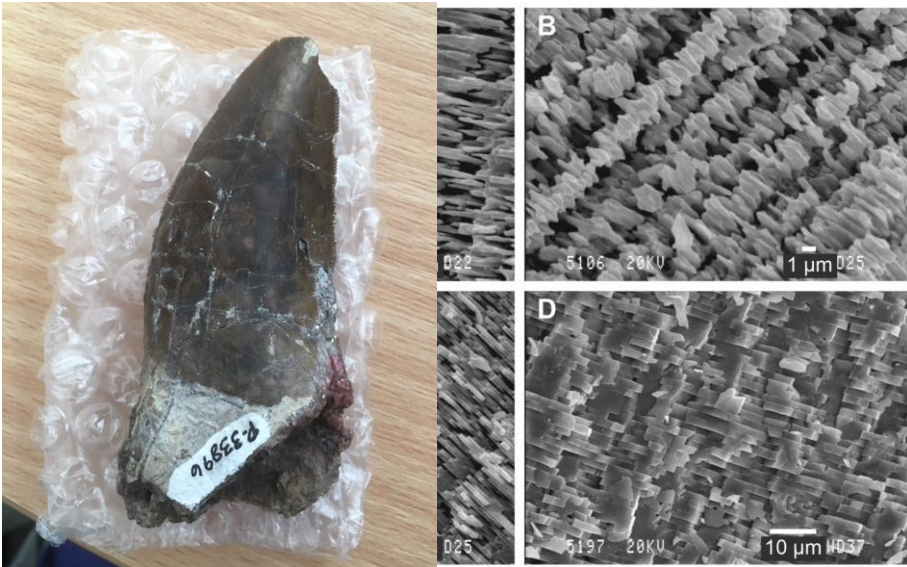
Mamuti obývali chladné stepi



<https://polarjournal.ch/en/2022/06/30/baby-mammoth-discovered-in-yukon-permafrost/>

Kyslíkový izotopický paleoteploměř

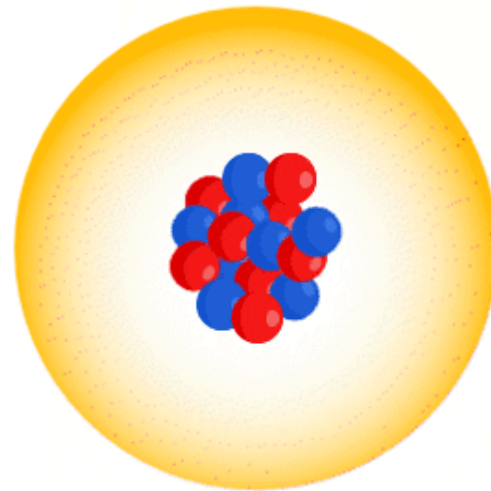
- fosilní schránky, kostry či zuby některých organismů mohou zachovat chemické složení prostředí (vody, atmosféry), ve kterém organizmy žily
- jedná se například o kyslík a jeho izotopické složení





Kyslíkový izotopický paleoteploměř

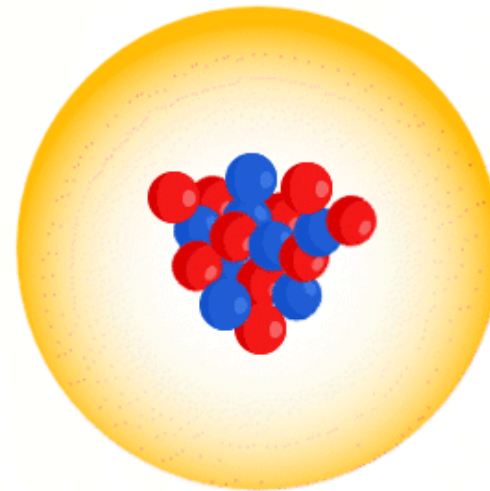
- 99,762 % kyslíku na Zemi patří „lehkému“ izotopu ^{16}O a 0,204 % „těžkému“ izotopu ^{18}O
- Jedná se o stabilní izotopy – nerozpadají se a tak je jejich množství v čase stabilní a konečné
- Mají stejný počet protonů, ale rozdílný počet neutronů

Oxygen 16



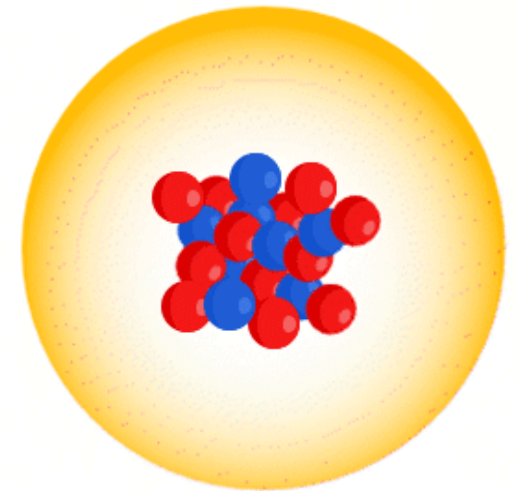
8 Protons 
8 Neutrons 
Mass Number 16

Oxygen 17



8 Protons
9 Neutrons
Mass Number 17

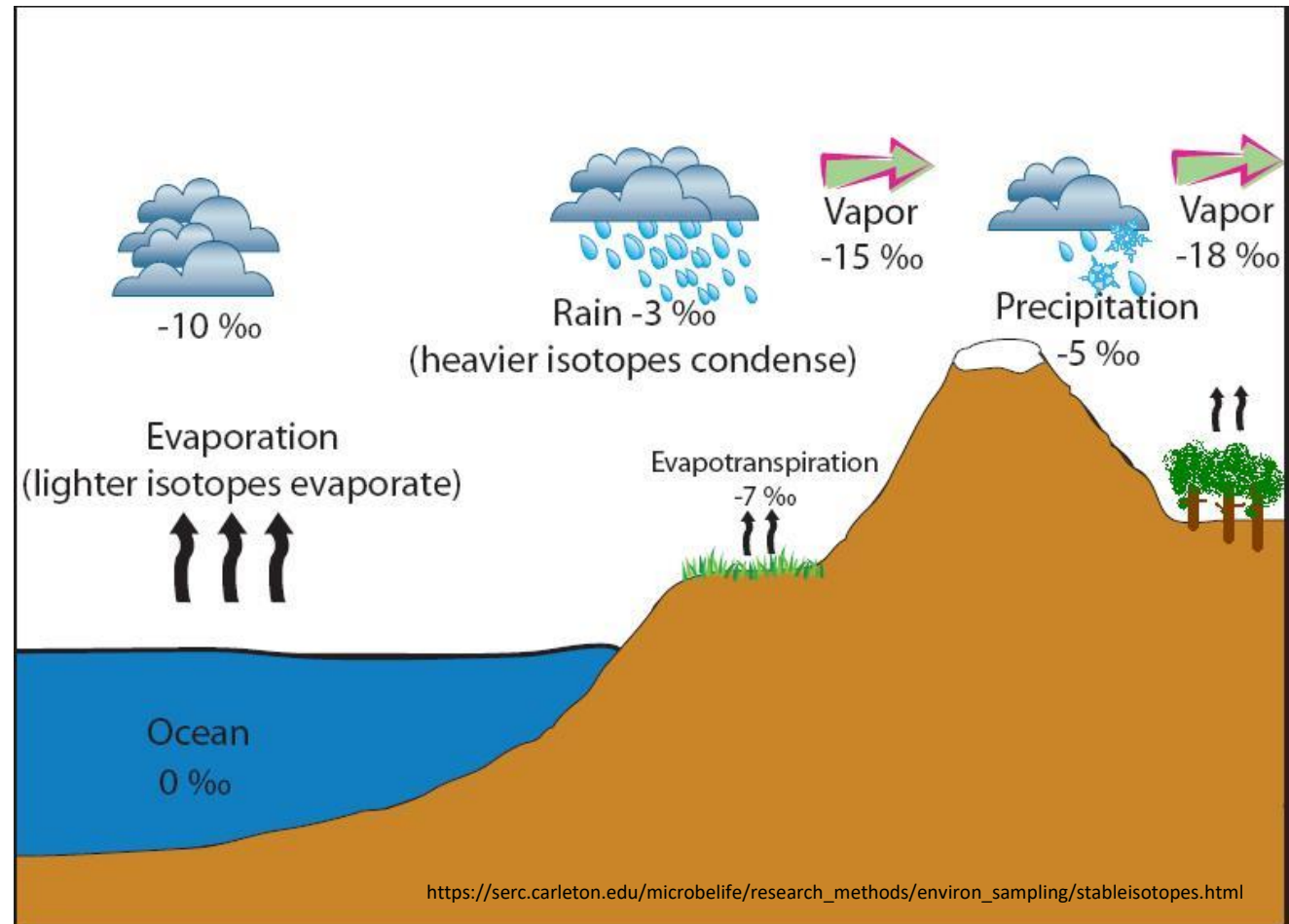
Oxygen 18



8 Protons
10 Neutrons
Mass Number 18

Kyslíkový izotopický paleoteploměř

- Kvůli rozdílné hmotnosti se chovají v chemicko-fyzikálních reakcích, do kterých vstupují, rozdílně
= při reakci dochází k jejich **frakcionaci** („izotopovému síťování“)
- Termodynamika reakcí upřednostňuje pro vstup do reakcí „lehčí“ izotopy (potřeba méně energie), proto jsou produkty reakcí izotopicky lehčí a to co zbyde (reaktant) naopak těžší
- Do páry z vody se přednostně (ale nikoli výhradně!) dostává lehký ^{16}O , ve vodě zůstává těžký ^{18}O

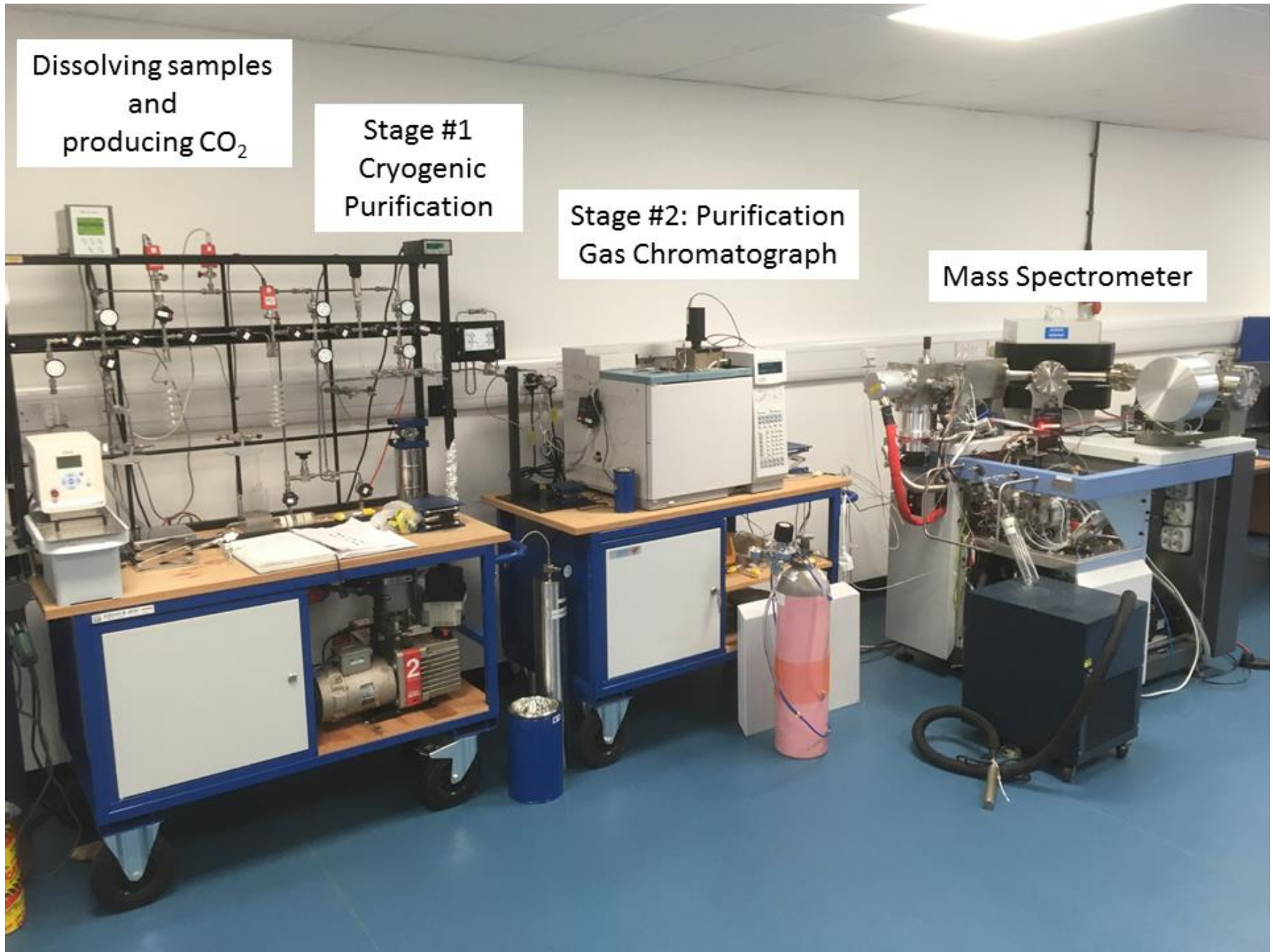


Dissolving samples
and
producing CO₂

Stage #1
Cryogenic
Purification

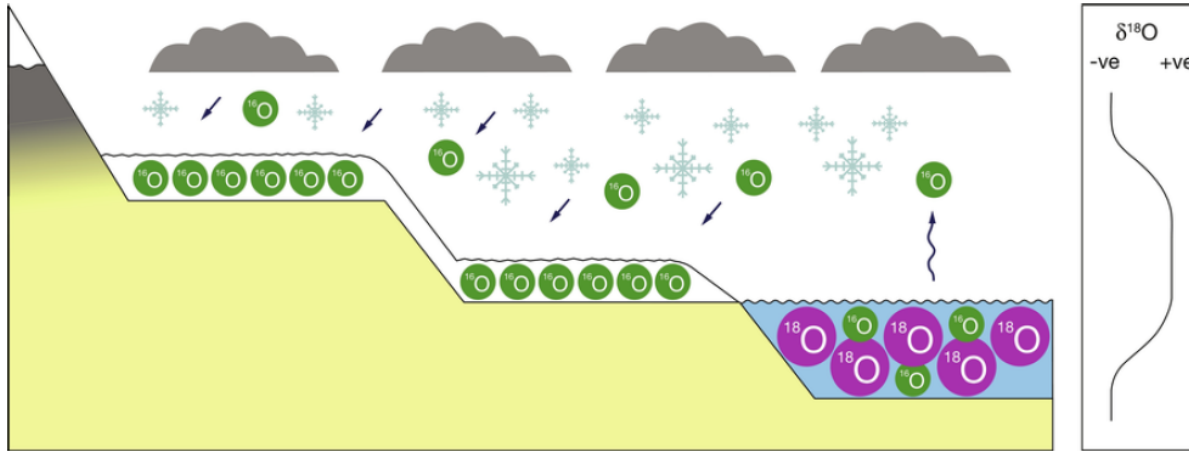
Stage #2: Purification
Gas Chromatograph

Mass Spectrometer

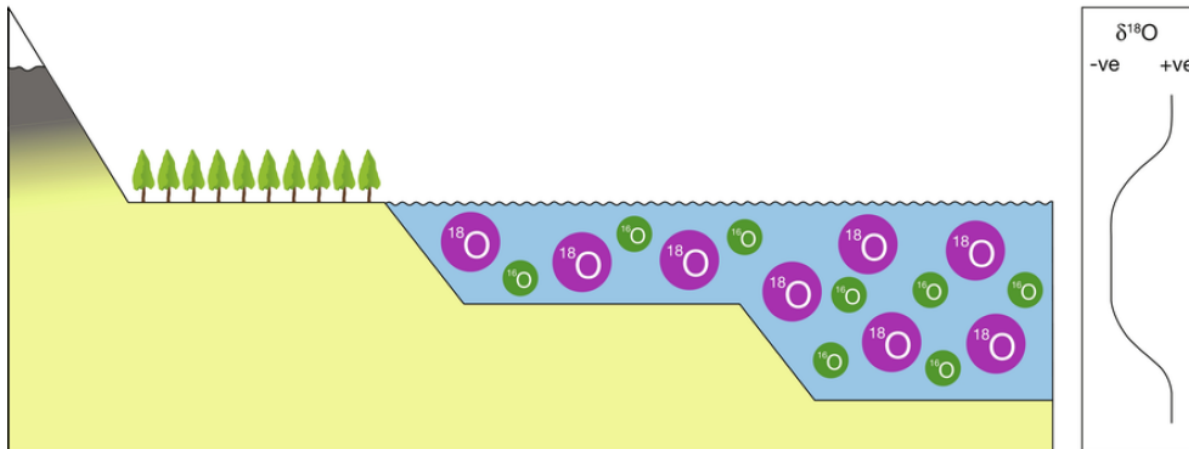


Kyslíkový izotopický paleoteploměř

- Izotopické složení kyslíku v oceánech a atmosféře je ovlivněno klimatem
- Měření izotopického složení kyslíku lze využít pro rekonstrukci změn teplot (a výpočet teploty v místě života organismu)



Pokud v koloběhu vody vznikne „překážka/zdržení“ ve formě zamrznutí v polárních ledovcích, ^{16}O se do oceánu nevrací a v poměru izotopů tam začne přibývat těžší ^{18}O

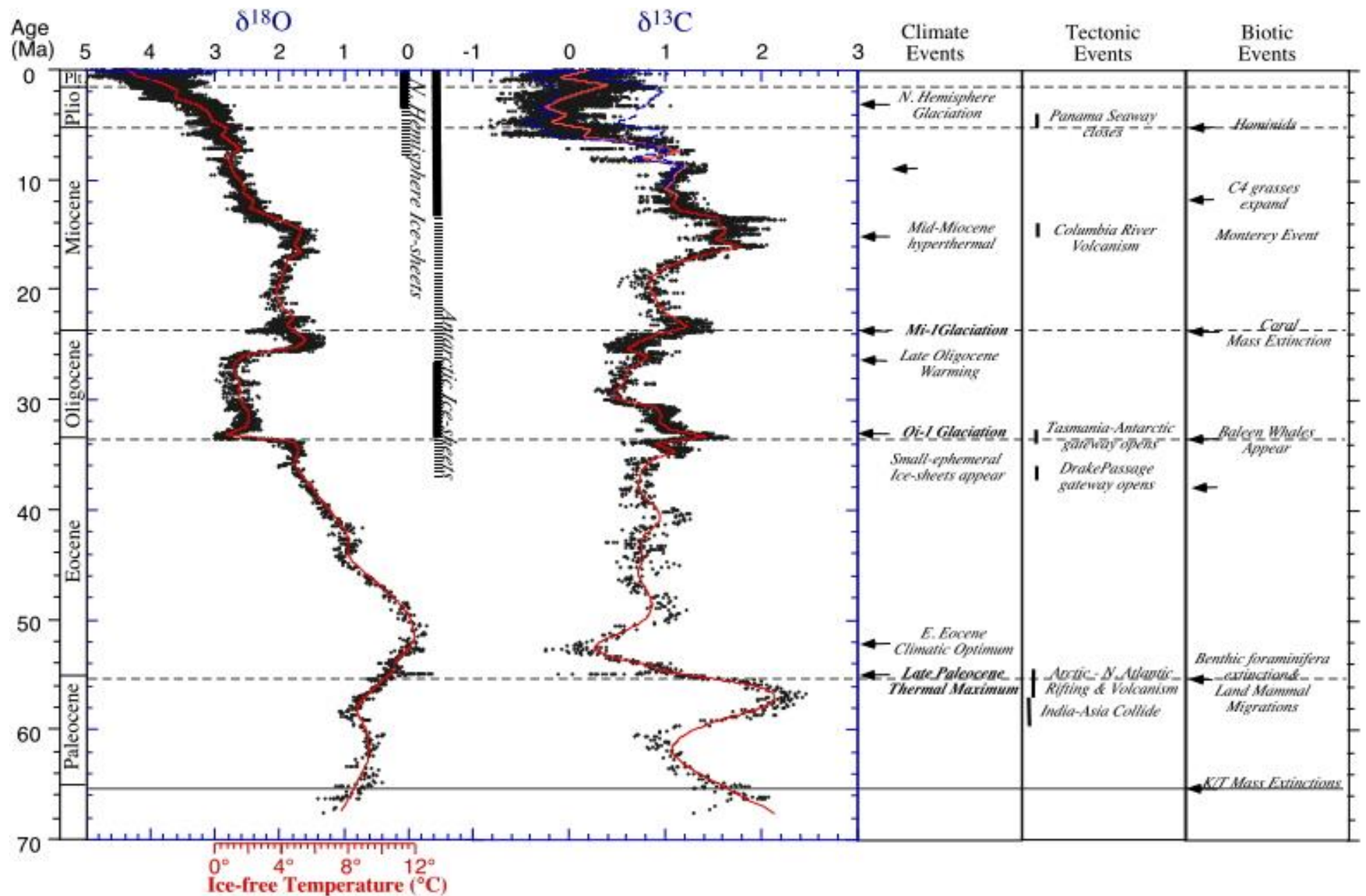


Bez zalednění je lehký ^{16}O odpařený ve formě srážek z atmosféry navrácen do oceánu

<https://www.gsoc.org/news/2020/10/16/oxygen>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128243602000103>

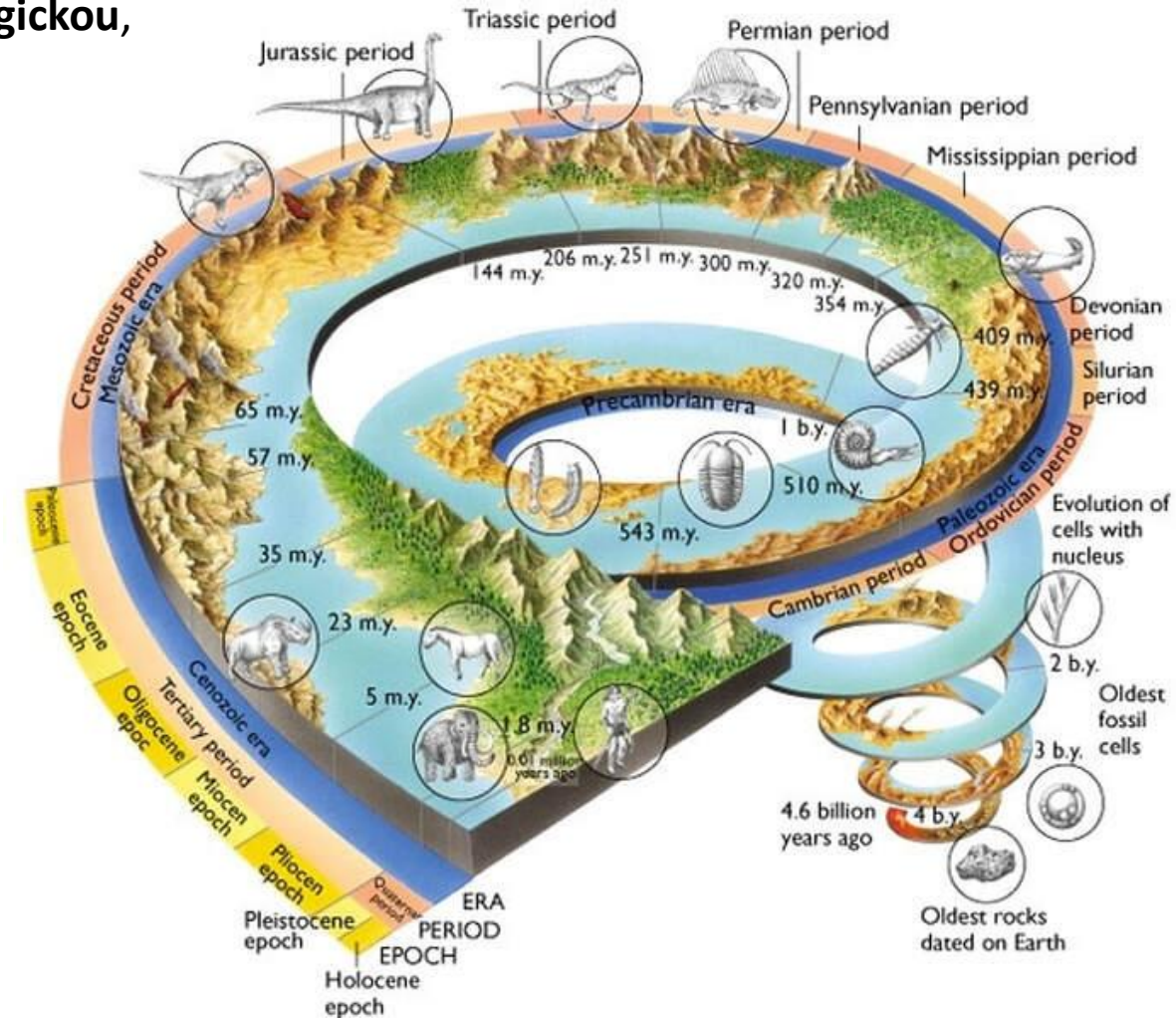
Kyslíkový izotopický paleoteploměř



Geologický čas

Geologický čas

- Stejně jako nelze měřit paleoklima, miliardy let uplynutého času také nemůžeme přímo měřit
- Existují však doklady o událostech, které v tomto čase proběhly
- **Zaznamenané v horninách, minerálech a fosiliích – geologických objektech**
- Proto označujeme tak vzdálenou minulost jako **minulost geologickou**, kterou dělíme na **jednotky geologického času**
- Jejich začátky a konce jsou dané právě různými **událostmi**, po kterých nalézáme v horninách indicie

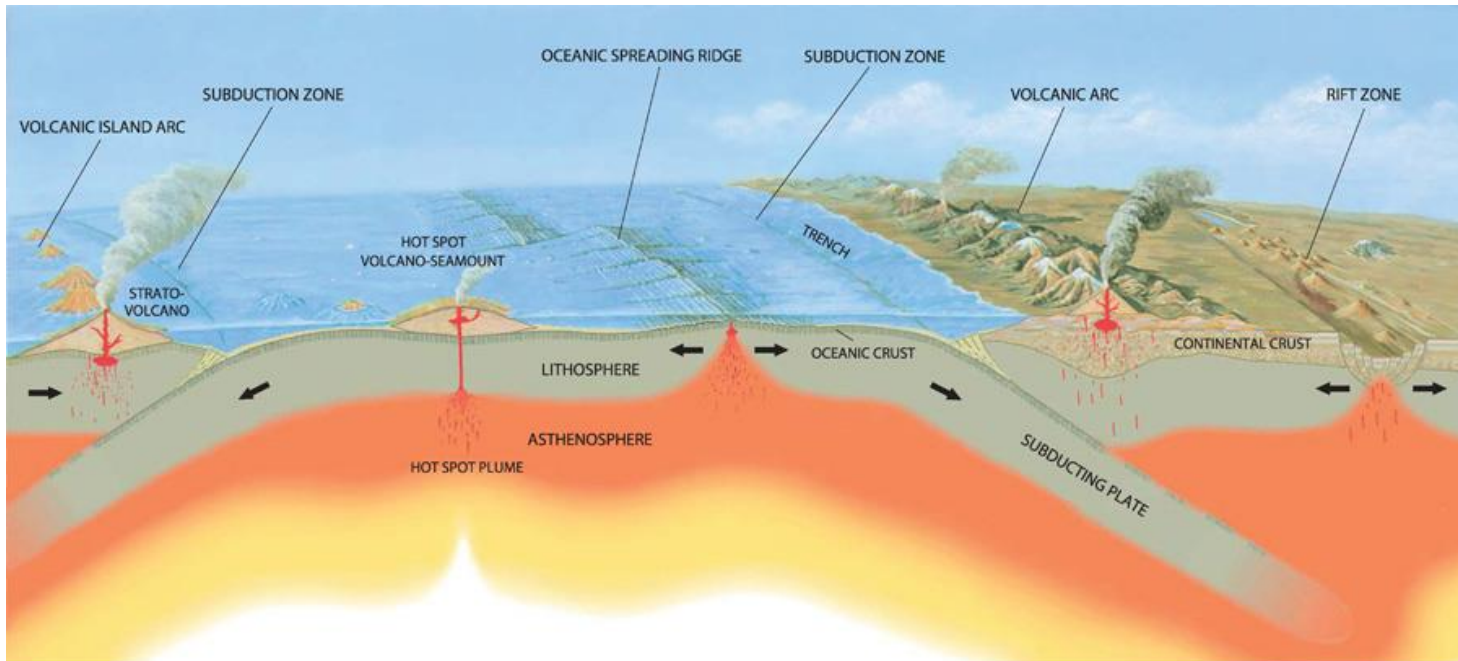


Přírodní události (eventy) v geologickém záznamu

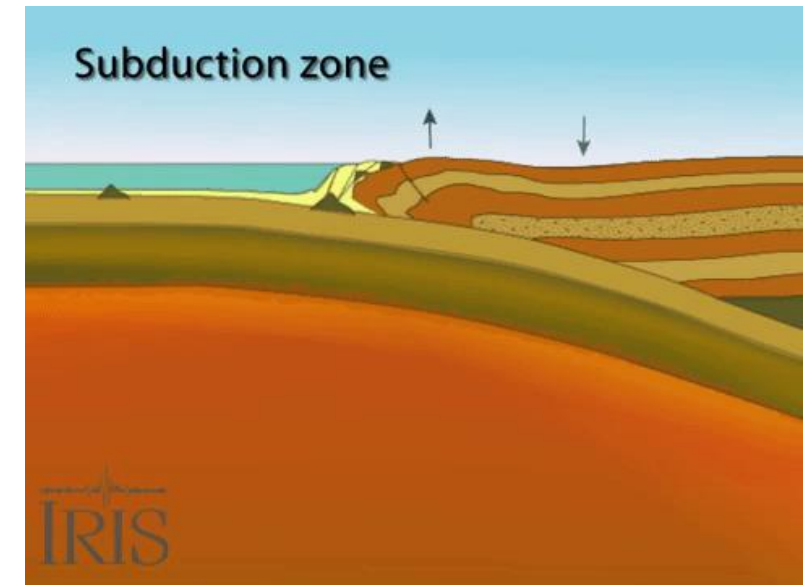
Geologické události jsou spojené jak s fungováním samotného tělesa planety, tak s přírodními procesy velkých geografických i časových rozsahů. Můžeme je dělit na:

endogenní události

- geologické události samotného tělesa Země, s přesahem na její povrch
 - desková tektonika
 - deformace hornin při vrásnění (srážce kontinentů)
 - samotné změny poloh kontinentů, vznik a zánik oceánů
 - magmatické události, vulkanické události



<https://pubs.oregon.gov/dogami/ims/ims-028/tectonics.htm>



Přírodní události (eventy) v geologickém záznamu

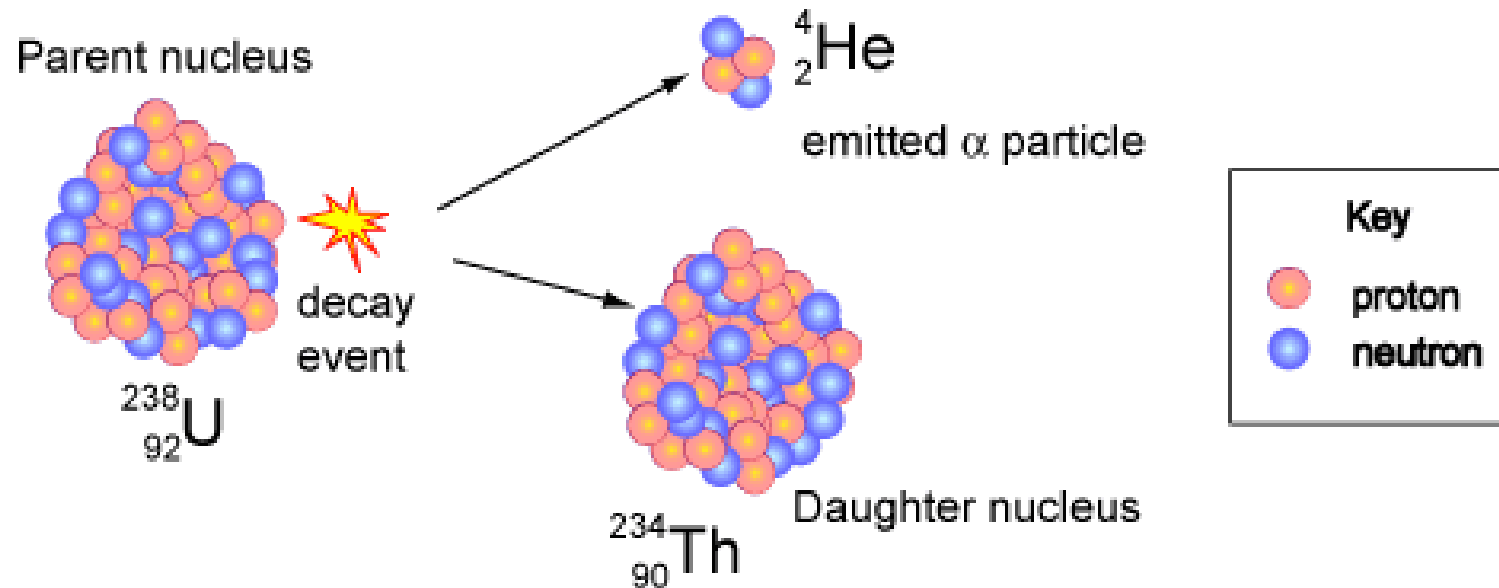
exogenní události

- události probíhající na povrchu Země v interakci s atmosférou, hydrosférou a biosférou
(nelze ovšem tvrdit, že by endogenní procesy byly od hydrosféry, atmosféry a biosféry zcela oddělené!)
 - **sedimentární události** (změny typu sedimentu v závislosti na změně prostředí)
 - **paleoceánografické události** (zaznamenané v sedimentech a fosiliích)
 - **biologické události** – evoluce - vznik nových druhů, vymírání druhů, hromadná vymírání (zaznamenané fosiliemi)
 - **paleoklimatické události**

Zjišťování stáří hornin I - radiometrické datování

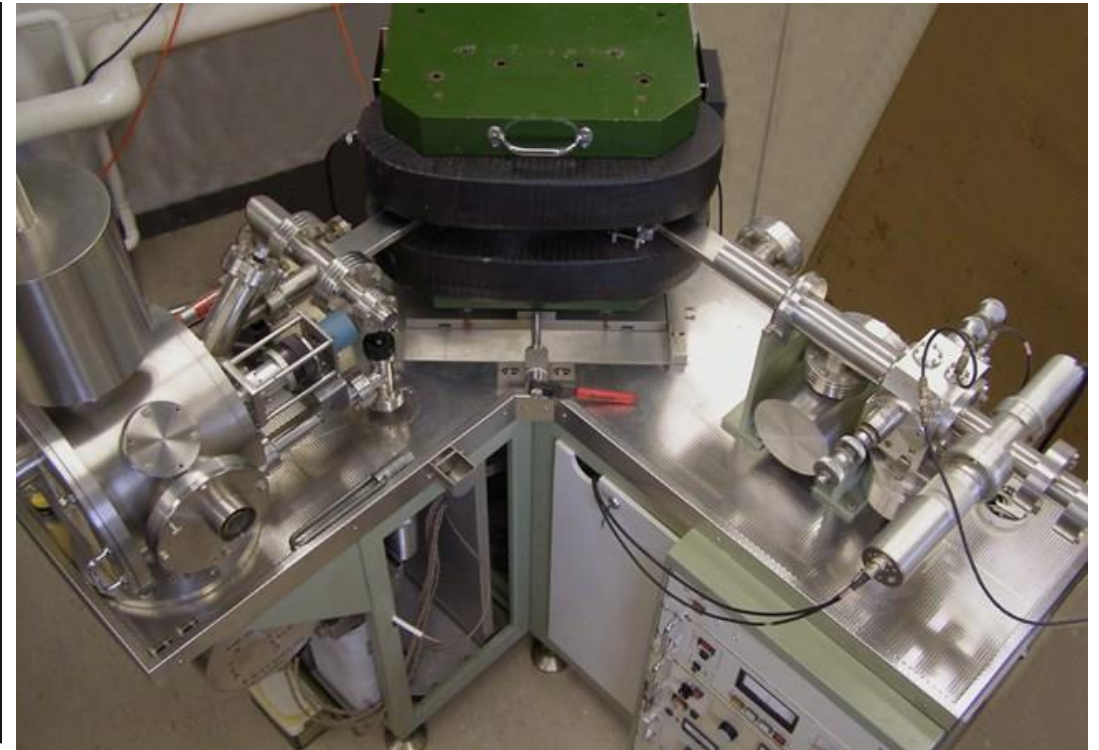
- Stabilní izotopy kyslíku se používají jako „paleoteploměř“ – můžeme dostat odhad (aproximaci) teplot v C°
- Některé **nestabilní (radioaktivní) izotopy** mohou posloužit jako „paleohodiny“ a můžeme tak získat stáří horniny v letech
- Poločas radioaktivního rozpadu - použitý pro stopování času, který uplynul od krystalizace určitých minerálů

Alpha Decay of a Uranium-238 nucleus



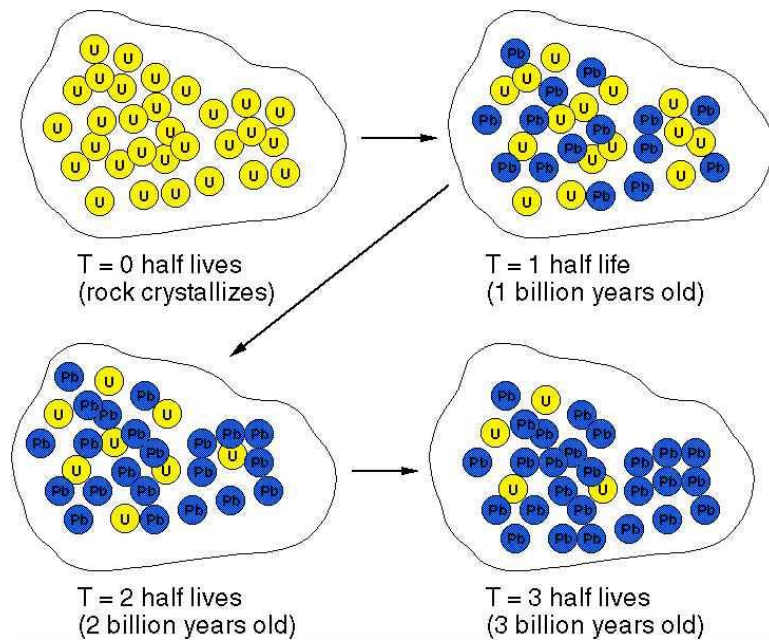
Zjišťování stáří hornin I - radiometrické datování

- využití znalosti **poločasu rozpadu** radioaktivních izotopů a jejich **rozpadových řady** (např. $^{238}\text{U} - ^{206}\text{Pb}$; $^{232}\text{Th} - ^{208}\text{Pb}$)
- Měření množství **radioaktivních izotopů** v minerálech (např. hmotnostními spektrometry)

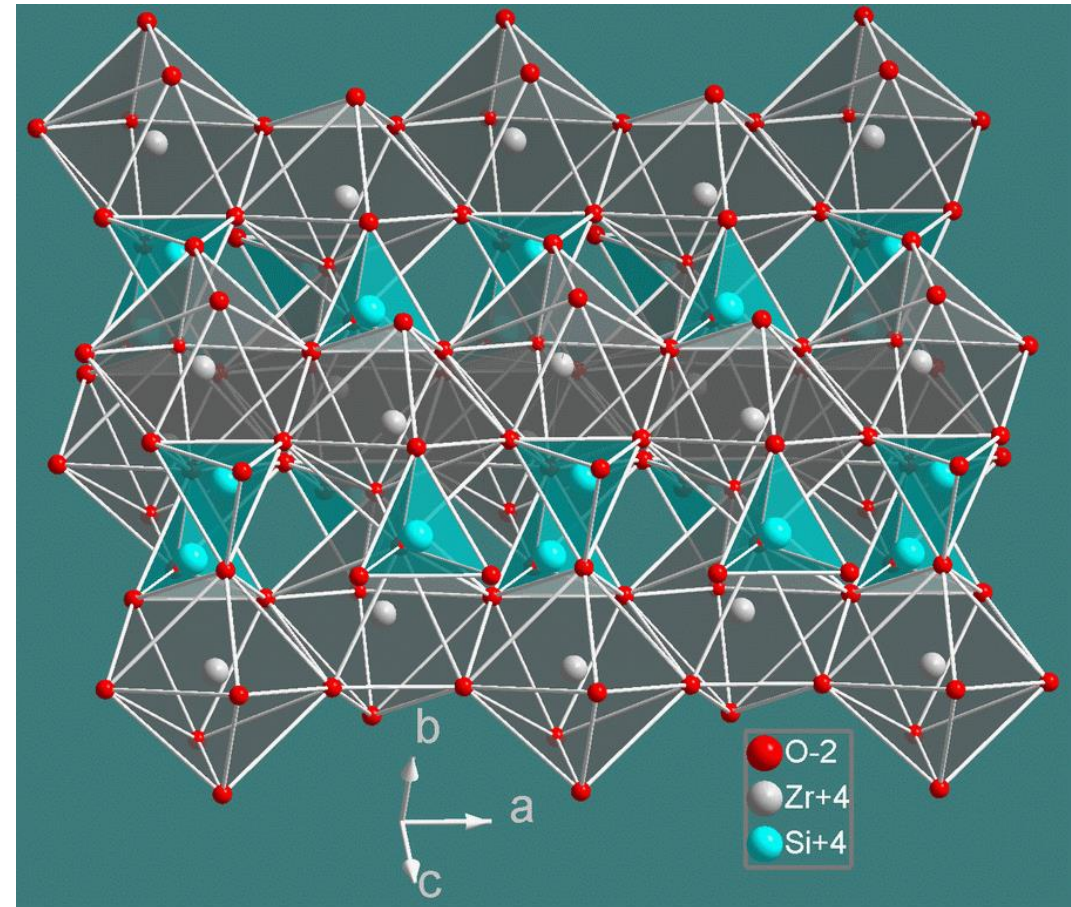


<https://www.labxchange.org/library/items/lb:HarvardX:88c179d9.html:1>

- izotopy se začnou rozpadat po vzniku (krystalizaci) minerálu („izotopické hodiny“)
- Např. hned po krystalizaci minerálu zirkonu z magmatu nejsou v jeho krystalové mřížce žádné izotopy olova, protože se do mřížky „nevejdou“
- Olovo však začne vznikat vzápětí po krystalizaci radioaktivním rozpadem uranu

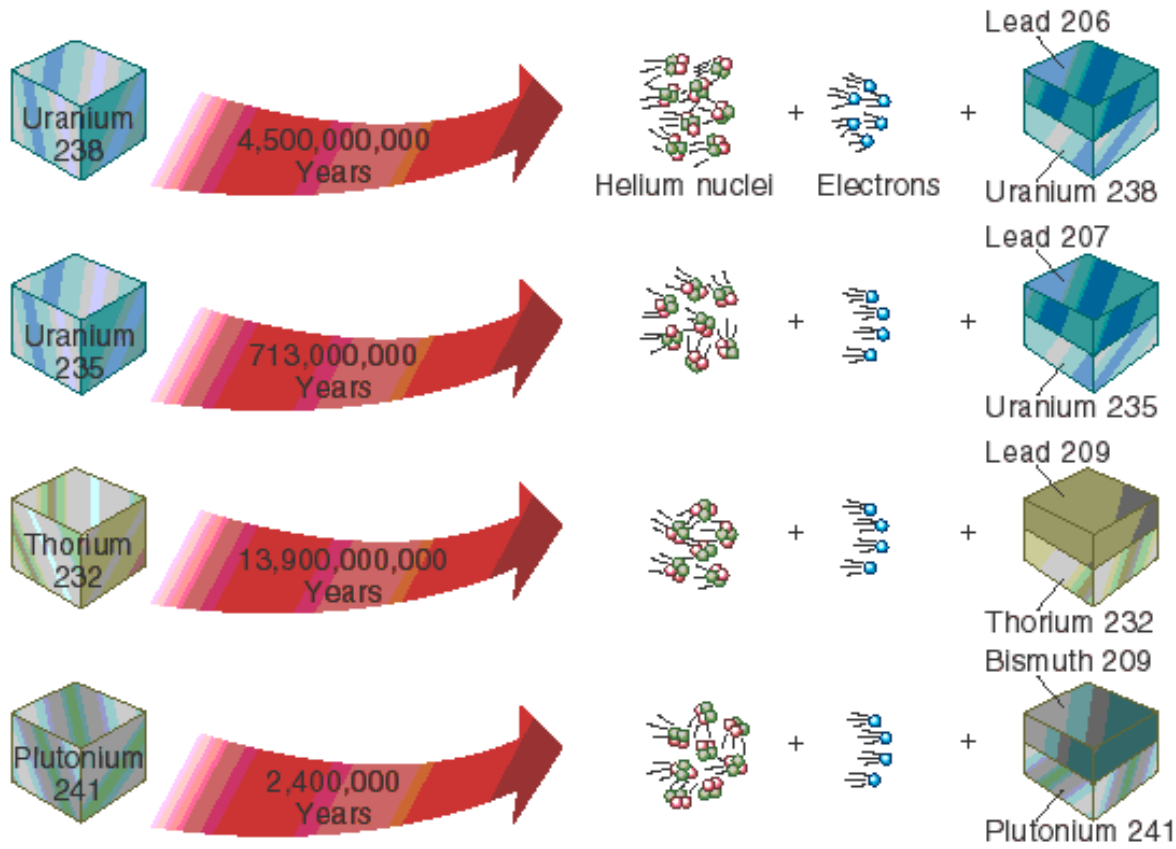


<https://geologylearn.blogspot.com/2015/06/radiometric-dating.html>

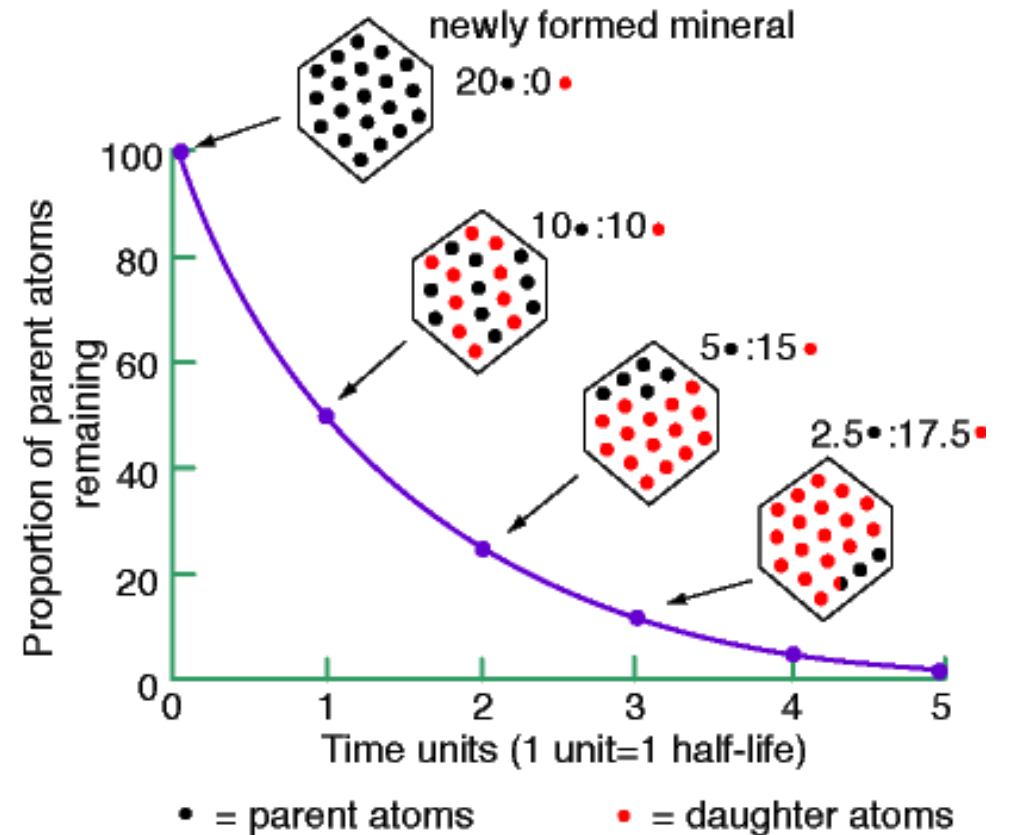


<https://en.wikipedia.org/wiki/File:Zircon.GIF>

- **poločas rozpadu** - doba, za kterou se rozpadne polovina atomů **mateřského prvku** a přemění se na **dceřinný** - Proces rozpadu je v čase konstantní
- Ze vzájemného poměru mateřského a dceřinného izotopu lze vypočítat dobu, která uplynula od vzniku minerálu, kdy obsahoval 100% mateřského izotopu

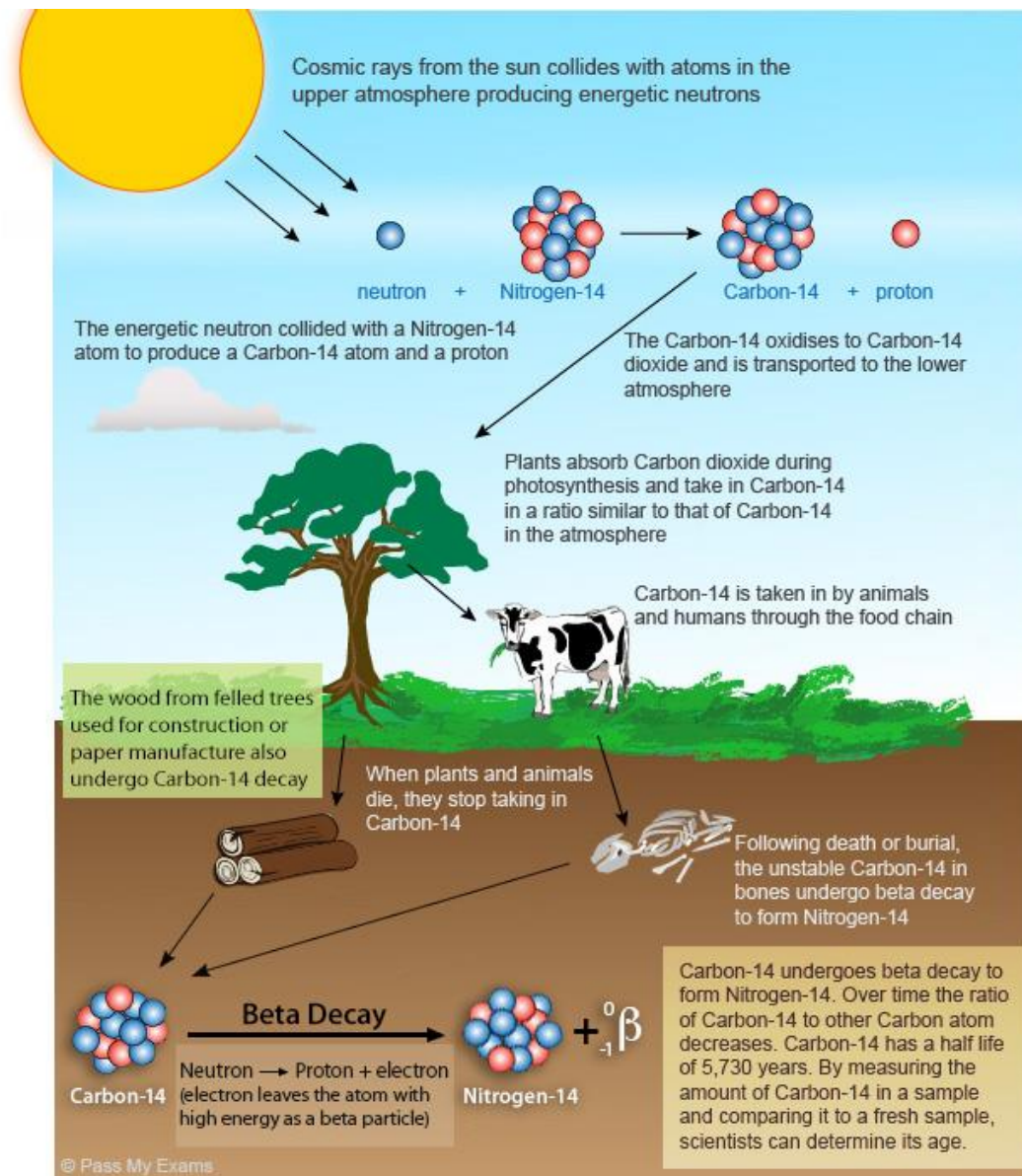


<https://earthhow.com/radioactive-decay-isotopes/>



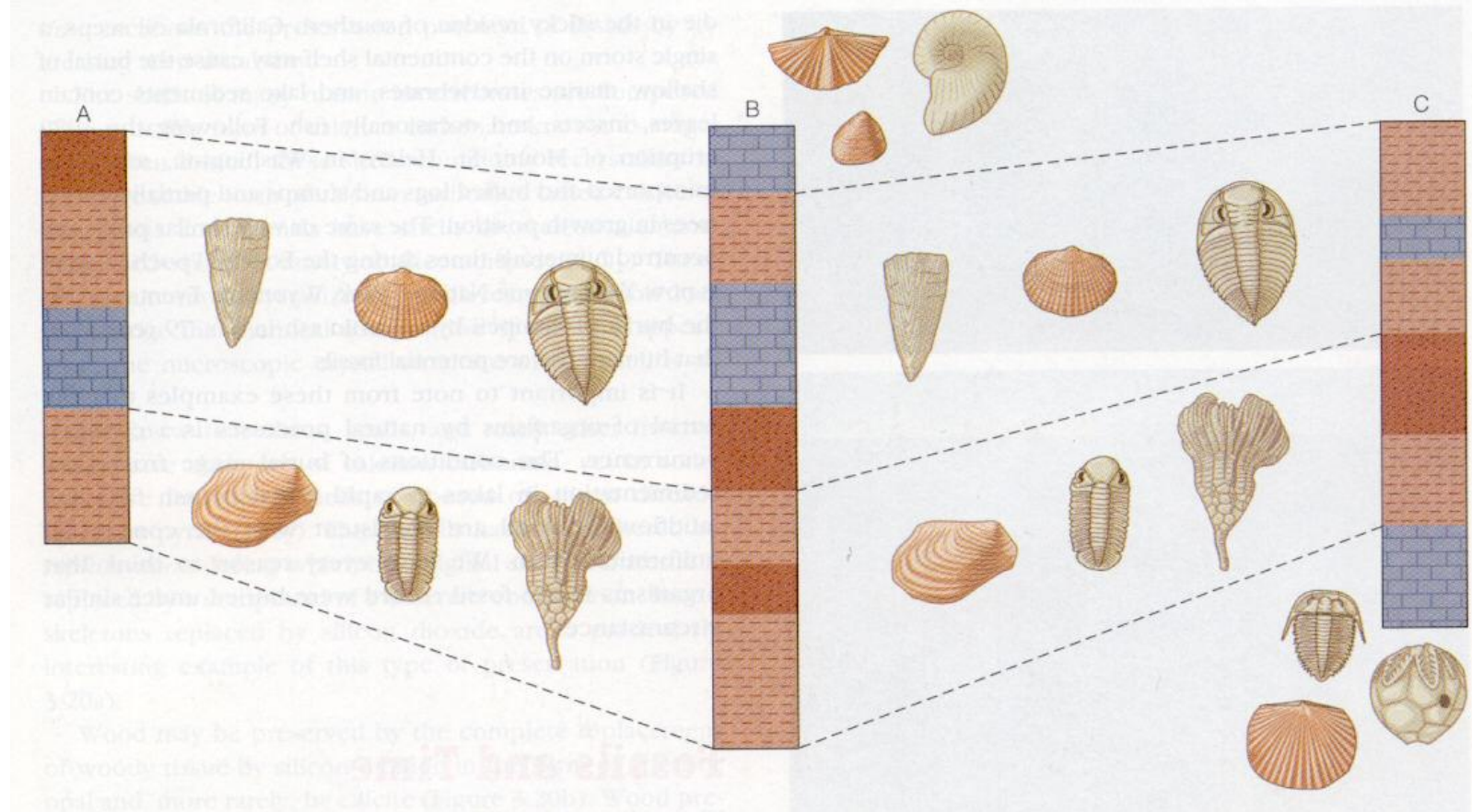
<https://schoolworkhelper.net/half-life-radioactive-elements-decay-over-time/>

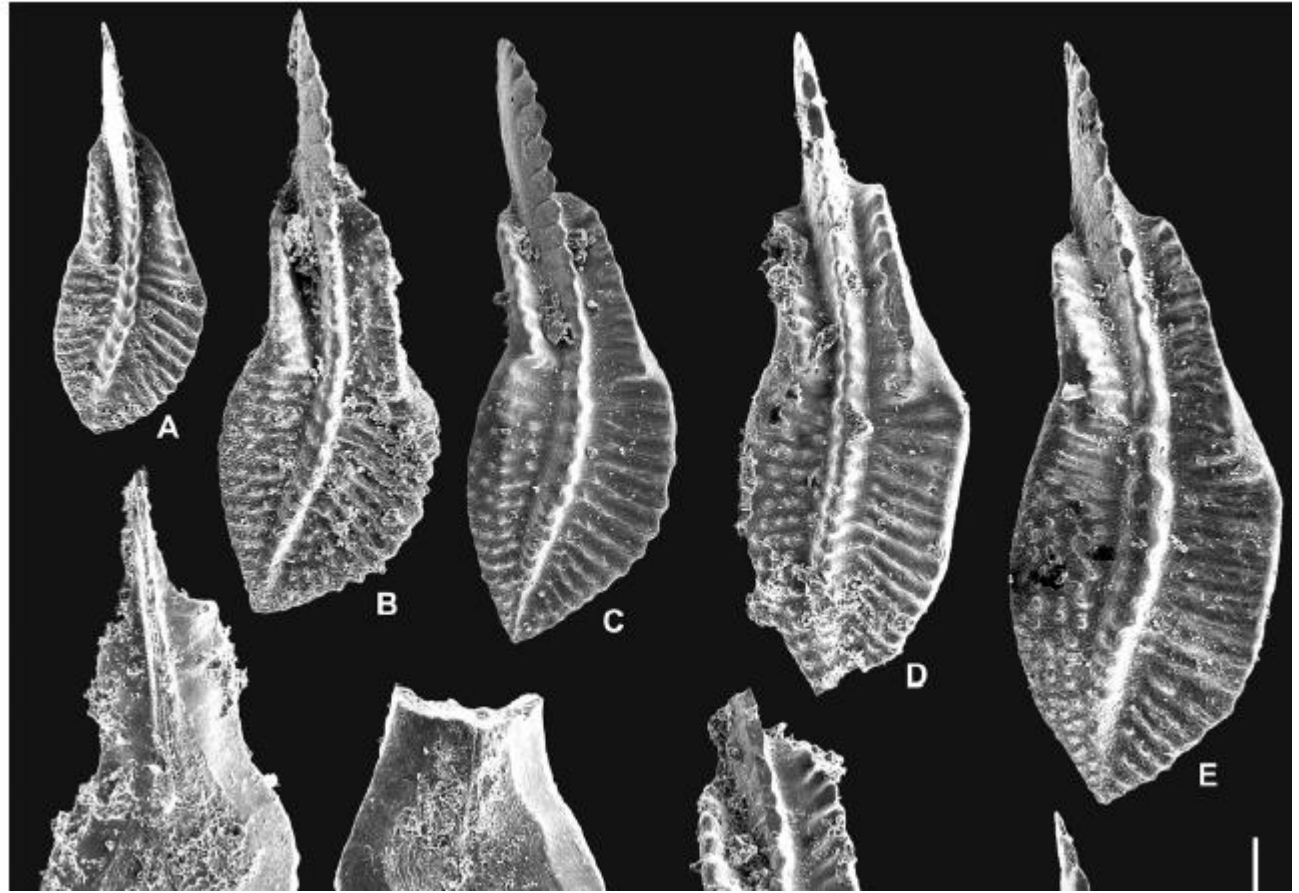
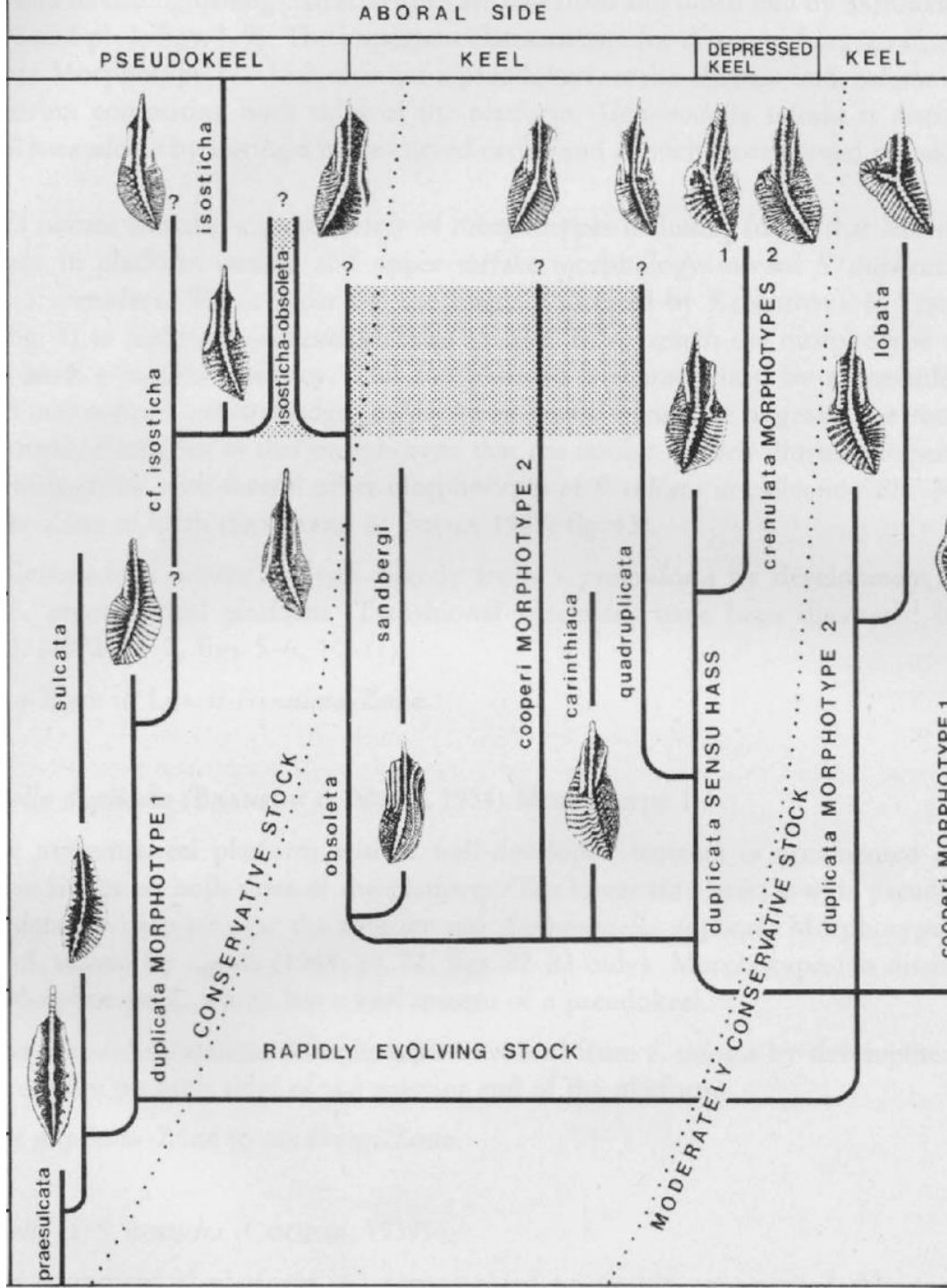
- Kromě minerálů magmatických hornin lze pro radiometrické datování použít radioaktivní uhlík ^{14}C **obsažený v biomase**
- vzniká při nukleární reakci v troposféře - **kosmické záření procházející atmosférou generuje neutrony, které interagují s dusíkem ^{14}N za vzniku nestabilního uhlíku ^{14}C** , ten je pak vstupuje do molekul CO_2
- CO_2 s radioaktivním ^{14}C vstupuje do rostlin při respiraci, do býložravců konzumací rostlin, a masožravců konzumací býložravců
- po uhynutí nový ^{14}C nepřibývá a dochází k rozpadu a přeměně zpět na dusík ^{14}N
- Datovat lze dřevo, kosti, rohy a další zbytky organismů s původní organickou hmotou
- Pro datování maximálně do 50 tisíc let



Zjišťování stáří hornin II – relativní datování

- Stáří vrstev hornin lze porovnávat i na velké vzdálenosti podle zkamenělin
- Protože dochází k evoluci, vrstvu po vrstvě můžeme studovat evoluční změny, velmi dobře lze pozorovat u mikrofosilií
- Vrstva s prvním výskytem nového druhu značí počátek časové jednotky **biozóny**, tedy např. času, kdy onen druh žil (většinou v délce několika stovek tisíc let)
- **Vrstvy, které obsahují stejné zkameněliny jsou stejně staré**

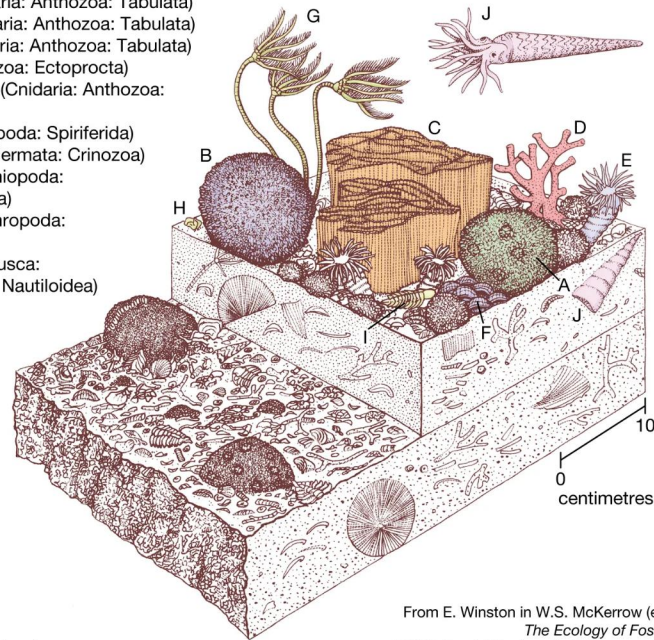




KVÍZ 4

Škála geologického času

- A *Heliolites* (Cnidaria: Anthozoa: Tabulata)
- B *Favosites* (Cnidaria: Anthozoa: Tabulata)
- C *Halysites* (Cnidaria: Anthozoa: Tabulata)
- D *Hallopora* (Bryozoa: Ectoprocta)
- E streptelasmatic (Cnidaria: Anthozoa: Rugosa)
- F *Atrypa* (Brachiopoda: Spiriferida)
- G crinoid (Echinodermata: Crinozoa)
- H *Leptaena* (Brachiopoda: Strophomenida)
- I *Dalmanites* (Arthropoda: Trilobita)
- J orthocone (Mollusca: Cephalopoda: Nautiloidea)



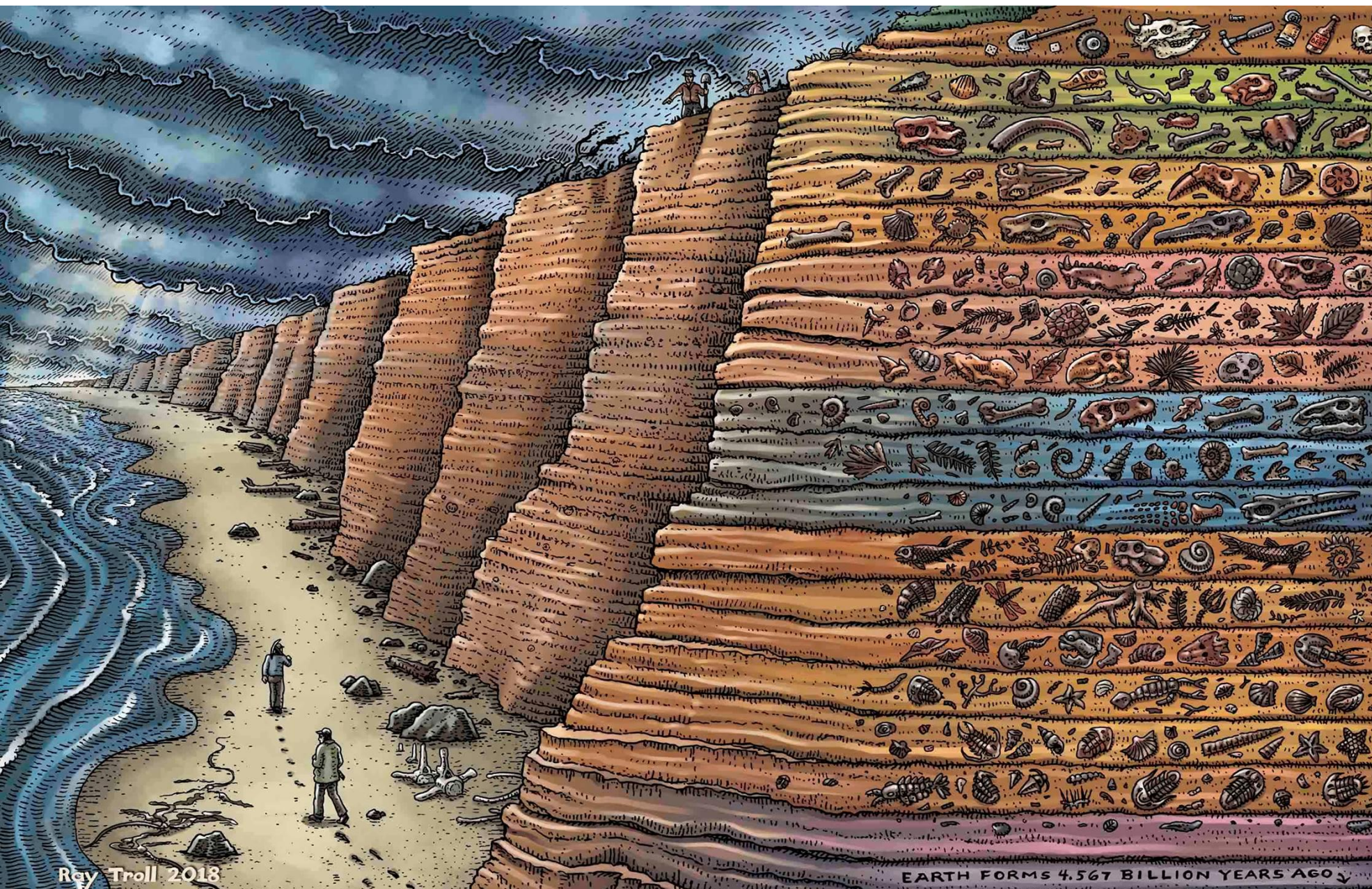
From E. Winston in W.S. McKerrow (ed.),
The Ecology of Fossils,
©1982 Gerald Duckworth & Company Ltd.

© Encyclopædia Britannica, Inc.

- Skládání dlouhých časových řad informací z vrstev sedimentů
- Na mořském dně se hromadí schránky organismů a písek
- Pod povrchem dochází ke zpevnění sedimentu a vznikne vrstva
- Na ní se ukládá další sediment a z něj později vzniká další vrstva
- Každá z vrstev zachycuje určitou dobu, kdy se schránky a písek hromadily na mořském dně



Škála geologického času

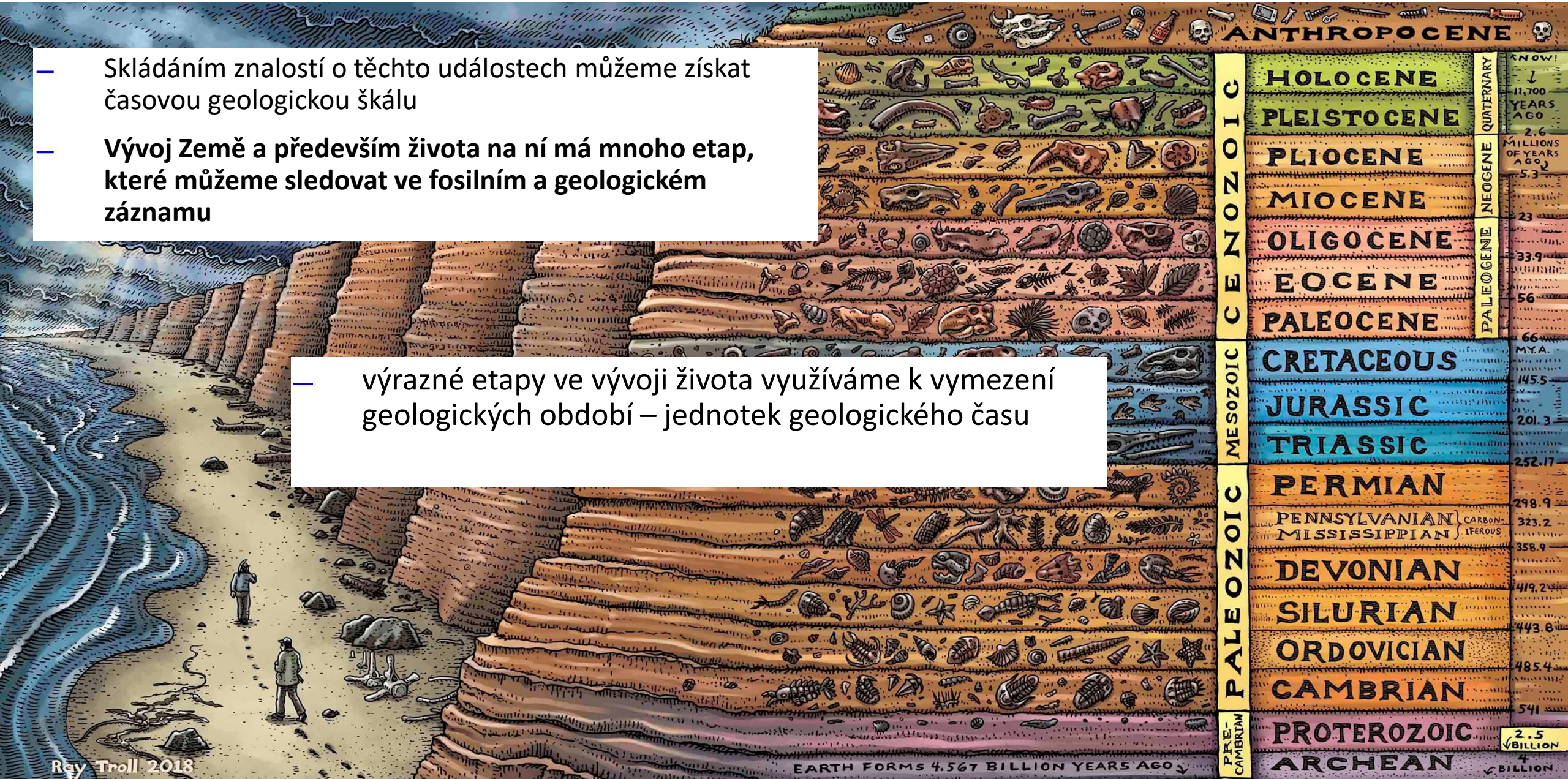


— Sledy vrstev tak poskytují archiv prastarých prostředí s pozůstatky jejich obyvatel a doklady různých typů událostí

Škála geologického času

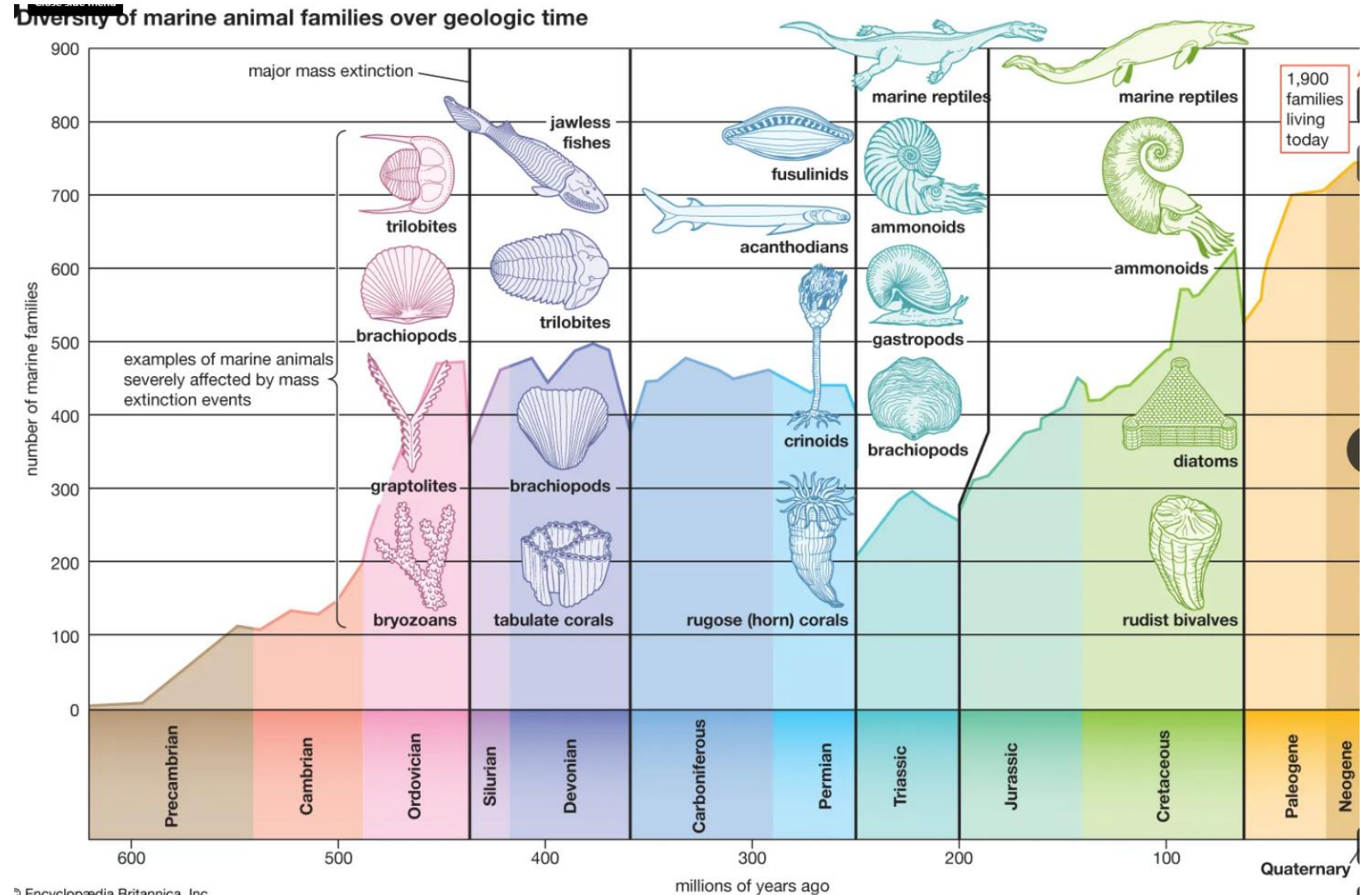
- Skládáním znalostí o těchto událostech můžeme získat časovou geologickou škálu
- Vývoj Země a především života na ní má mnoho etap, které můžeme sledovat ve fosilním a geologickém záznamu

- výrazné etapy ve vývoji života využíváme k vymezení geologických období – jednotek geologického času



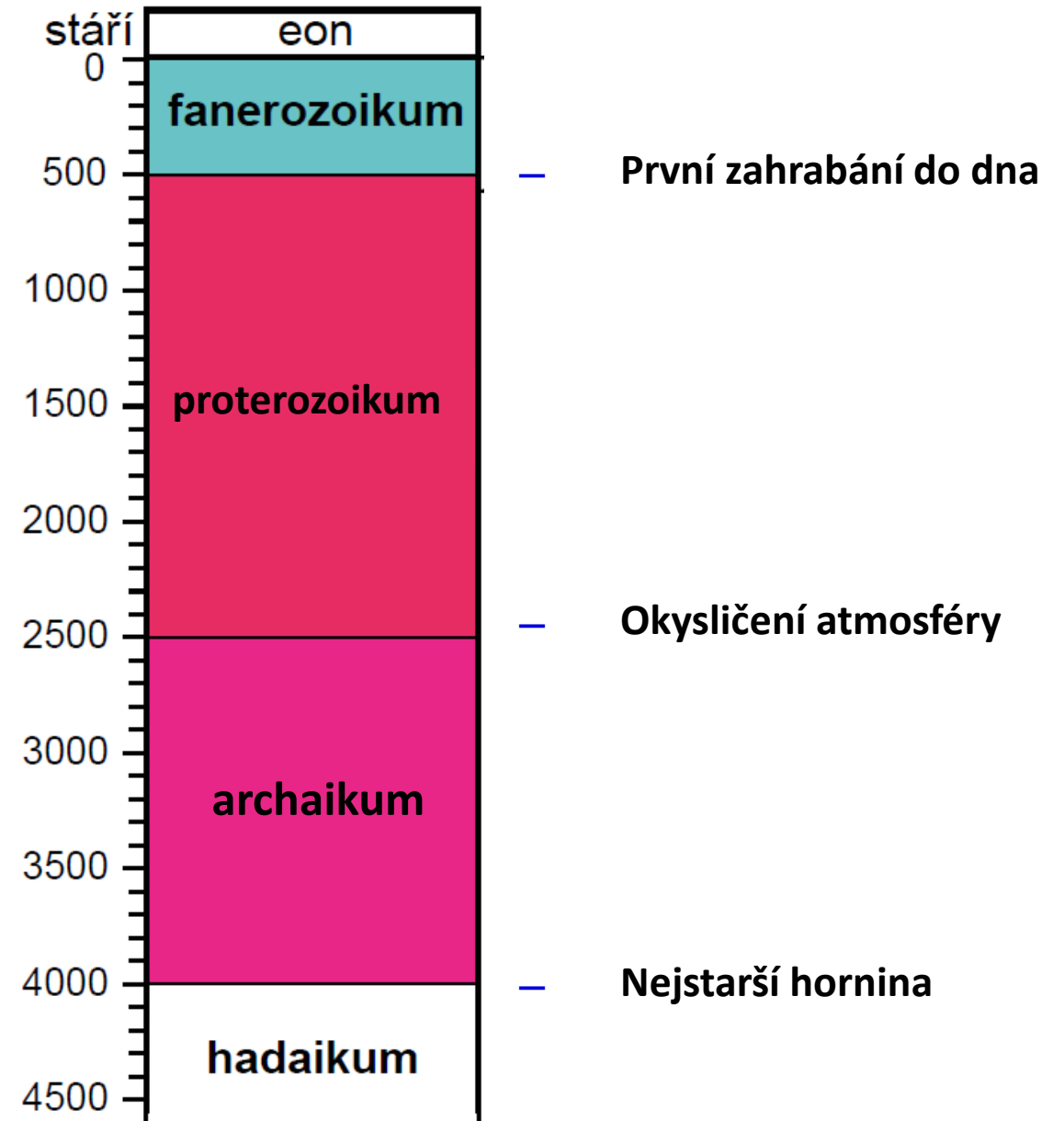
Škála geologického času

- Výrazné změny ekosystémů během hromadných vymírání – přirozené hranice geologických období, patrné ve fosilním záznamu
- V období s hojným fosilním záznamem (poslední půl miliardy let) proběhlo pět velkých vymírání („velká pětka“)
- Budou probrána během kurzu



Geologický čas

- 4,54 miliard let geologického času existence planety Země je děleno na 4 hlavní období – eony
- Jejich hranice jsou dané významnými událostmi – změnami složení atmosféry a klimatu ...
- hadaikum, archaikum, proterozoikum a fanerozoikum
- V následující části kurzu projdeme postupně všechna období a budeme sledovat vývoj klimatu a významné evoluční milníky



Co jsme se dnes naučili?

- Co je **paleoklimatologie** a jaké metody lze využít pro studium **paleoklimatu**
- Paleoklimatickými archivy hluboké minulosti jsou usazené horniny (sedimenty)
- Paleoklima nelze měřit přímo, pro jeho rekonstrukci se využívají zástupné proměnné (ukazatele, **proxy**)
- Některá paleoklimatická proxy: 1) klimaticky specifické sedimenty, 2) záznam změny mořské hladiny, 3) fosilie klimaticky specifických organismů, 4) kyslíkový izotopický paleoteploměr
- **Geologický čas** a metody datování
- Škála geologického času