

## 6. Paleoklimatologie

**změna klimatu** – klimatické výkyvy se zřetelně vyjádřeným dlouhodobým trendem (ochlazení, oteplování) v časovém intervalu 103 roků a více, podmíněným změnou základních klimatotvorných faktorů

- **paleoklimatické údaje**

nepřímé (proxy) údaje o klimatu z období přesahujícího 102 let – informace o klimatu je „zakódována“ v podobě nějaké měřené charakteristiky (letokruhy, jezerní sedimenty, ledovcová jádra aj.) a musí být získána na základě nalezení vztahu mezi takovou charakteristikou a parametrem klimatu – časově homogenní záznam – problém možné změny předpokládané vazby v minulosti

- **princip aktuálnosti**
- **problém datace**

### 6.1 Přírodní proxy data

#### (1) Glaciological (ice cores)

---

- (a) geochemistry (major ions and isotopes of oxygen and hydrogen)
- (b) gas content in air bubbles
- (c) trace element and microparticle concentrations
- (d) physical properties (e.g., ice fabric)

#### (2) Geological

---

- (A) *Marine* (ocean sediment cores)
  - (i) *Biogenic sediments* (planktonic and benthic fossils)
    - (a) oxygen isotopic composition
    - (b) faunal and floral abundance
    - (c) morphological variations
    - (d) alkenones (from diatoms)
  - (ii) *Inorganic sediments*
    - (a) terrestrial (aeolian) dust and ice-rafted debris
    - (b) clay mineralogy
- (B) *Terrestrial*
  - (a) glacial deposits and features of glacial erosion
  - (b) periglacial features
  - (c) shorelines (Eustatic and glacio-eustatic features)
  - (d) aeolian deposits (loess and sand dunes)
  - (e) lacustrine sediments, and erosional features (shorelines)
  - (f) pedological features (relict soils)
  - (g) speleothems (age and stable isotope composition)

### (3) Biological

- (a) tree rings (width, density, stable isotope composition)
- (b) pollen (type, relative abundance, and/or absolute concentration)
- (c) plant macrofossils (age and distribution)
- (d) insects (assemblage characteristics)
- (e) corals (geochemistry)
- (f) diatoms, ostracods, and other biota in lake sediments (assemblages, abundance, and/or geochemistry)
- (g) modern population distribution (refugia and relict populations of plants and animals)

### Charakteristiky paleoklimatických zdrojů dat

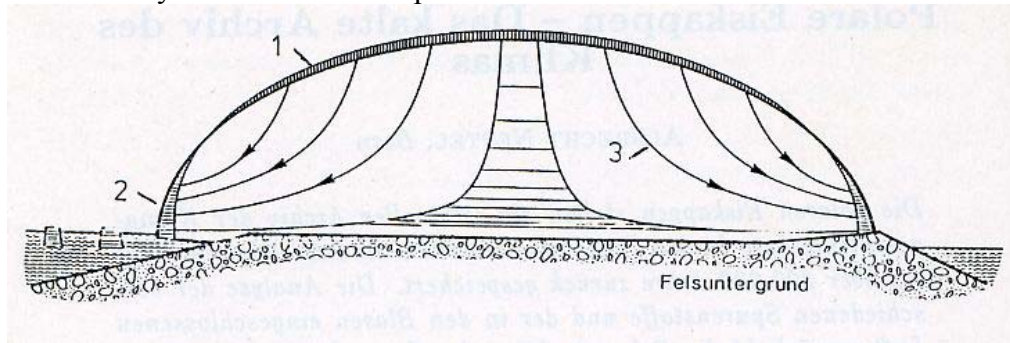
Archive	Minimum sampling interval	Temporal range (order: yr)	Potential information derived
Historical records	day/hr	$\sim 10^3$	T, P, B, V, M, L, S
Tree rings	yr/season	$\sim 10^4$	T, P, B, V, M, S
Lake sediments	yr (varves) to 20 yr	$\sim 10^4$ – $10^6$	T, B, M, P, V, $C_w$
Corals	yr	$\sim 10^4$	$C_w$ , L, T, P
Ice cores	yr	$\sim 5 \times 10^5$	T, P, $C_a$ , B, V, M, S
Pollen	20 yr	$\sim 10^5$	T, P, B
Speleothems	100	$\sim 5 \times 10^5$	$C_w$ , T, P
Paleosols	100 yr	$\sim 10^6$	T, P, B
Loess	100 yr	$\sim 10^6$	P, B, M
Geomorphic features	100 yr	$\sim 10^6$	T, P, V, L, P
Marine sediments	500 yr <sup>a</sup>	$\sim 10^7$	T, $C_w$ , B, M, L, P

T = temperature  
 P = precipitation, humidity, or water balance (P-E)  
 C = chemical composition of air ( $C_a$ ) or water ( $C_w$ )  
 B = information on biomass and vegetation patterns  
 V = volcanic eruptions  
 M = geomagnetic field variations  
 L = sea level  
 S = solar activity

After Bradley and Eddy (1991).  
<sup>a</sup> In rare circumstances (varved sediments)  $\leq 10$  yr.

## 6.1.1 Ledovcová jádra

Schematický řez ledovcovou čapkou



1 – zóna akumulace, 2 – zóna ablace, 3 – tečení ledu

K analýze ledovcových jader se vybírají ledovce s permanentní převahou akumulace nad ablací (Antarktida, Grónsko, ledovcové čapky ve velehorách). Vrtý do ledovců – získání, uchování a analýza ledovcového jádra.

### Koncentrace prachových částic

- vyjadřuje počet nerozpustných částic určité velikosti v 1 ml vzorku
- ovlivněna místními podmínkami (zdroj, vítr, srážky)
- nárůst prachových částic – snížení propustnosti atmosféry – pokles teploty

- organické zbytky (pyl aj.)

**Izotopy** jsou dány kolísáním hmoty v atomech každého prvku. Každé jádro atomu je tvořeno protony (počet v jádře vždy stejný) a neutrony (počet může kolísat). Atomy kyslíku mají vždy 8 protonů, ale buď 8 ( $^{16}\text{O}$  – 99,76 %), 9 ( $^{17}\text{O}$  – 0,04 %) a 10 neutronů ( $^{18}\text{O}$  – 0,20 %).

### Analýza poměru izotopů kyslíku

$$\delta^{18}\text{O} = (\text{R} - \text{R}_0) / \text{R}_0,$$

kde R je poměr naměřených koncentrací v ledovcovém jádru a  $\text{R}_0$  je srovnávací poměr izotopů v oceánu, přičemž  $\text{R}$ , resp.  $\text{R}_0 = c(^{18}\text{O}) / c(^{16}\text{O})$

Poměr  $\delta^{18}\text{O}$  je nepřímo úměrný teplotě a vyjadřuje:

- teplotu vzduchu při kondenzaci
- atmosférické procesy mezi zdrojem vodní páry a místem depozice
- místní podmínky během změny firnu v led
- nadmořskou výšku a zeměpisnou šířku lokality

**Koncentrace síranových iontů  $\text{SO}_4^{2-}$**  je odrazem biogenní produkce a vulkanické činnosti. Velmi dobře korelují především s vulkanickou činností – výrazné stopy velkých vulkanických erupcí. Proxy indikátorem je také elektrická vodivost ledu.

- vzduchové bubliny uzavřené v ledu umožňují analyzovat **koncentraci skleníkových plynů** ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_4$ )

### Koncentrace izotopu berylia $^{10}\text{Be}$ jako proxy indikátoru sluneční činnosti

- výsledek interakce kosmického záření a slunečního větru (parametr sluneční aktivity)

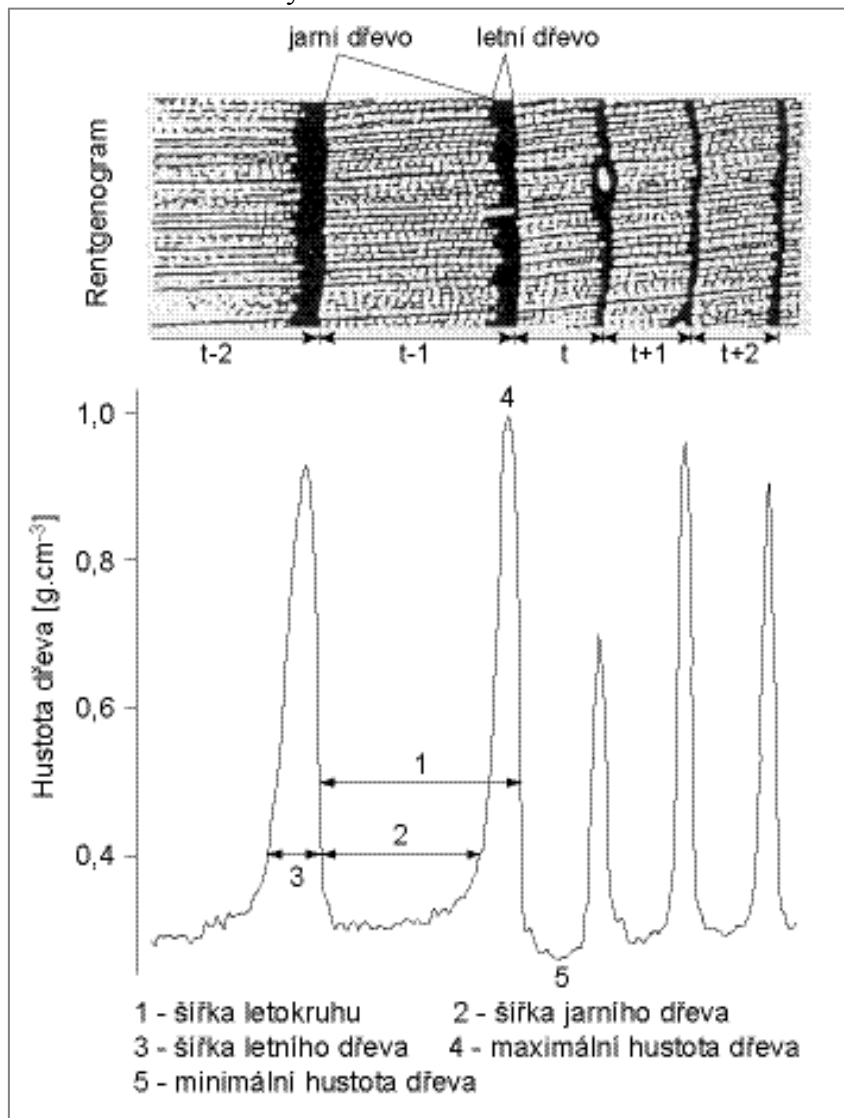
## 6.1.2 Letokruhy

**Dendrochronologie** je nauka používající letokruhových analýz k datování událostí.

**Dendroklimatologie** – využívá existující chronologie letokruhových charakteristik (šířka, hustota, izotopy) pro rekonstrukci klimatu.

- základní princip dendroklimatologické rekonstrukce vychází z tzv. **faktoru v minimu** znamenajícího, že okolní podmínky se blíží limitní hranici přežití organismu
- horní hranice lesa – teplota vzduchu
- dolní hranice lesa – srážky

Měřené charakteristiky letokruhů



### Datování letokruhových řad

- stromy jednoho druhu v daném regionu vykazují určitou podobnost letokruhových řad
- standardní chronologie pro druh a oblast

### Standardizace

- odstranění růstového trendu
- vytvoření bezrozměrné indexové chronologie pro stanoviště (oblast)

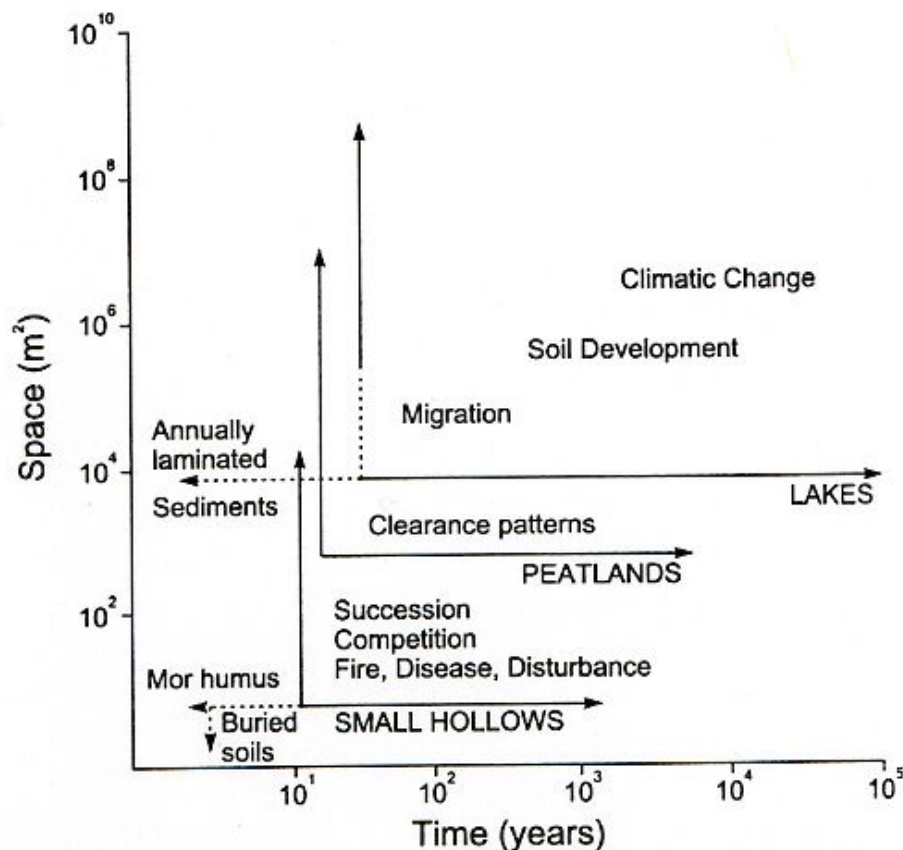
Brázdil, R., Dobrý, J., Kyncl, J., Štěpánková, P. (1997): Rekonstrukce teploty vzduchu teplého půlroku v oblasti Krkonoš na základě letokruhů smrku v období 1804–1989. *Geografie – Sborník České geografické společnosti*, 102, č. 1, s. 3–16.

Brázdil, R., Štěpánková, P., Kyncl, T., Kyncl, J. (2002): Fir tree-ring reconstruction of March-July precipitation in southern Moravia (Czech Republic), 1376-1996. *Climate Research*, 20, č. 3, s. 223-239.

### 6.1.3 Pylová analýza

- **palynologie** – vědní disciplína studující pylová zrna a spory
- **pylová zrna** jsou uchovávána v jezerech, rašeliništích, sedimentech
- vlastnosti pylových zrn:
  - morfologické charakteristiky jsou specifické pro rody a druhy rostlin
  - jsou produkovány ve velkém množství a široce rozšiřovány
  - jsou extrémně odolné v sedimentárním prostředí
  - vyjadřují původní vegetaci v době, kdy došlo k jejich ukládání, tedy vypovídají i o klimatických podmínkách té doby

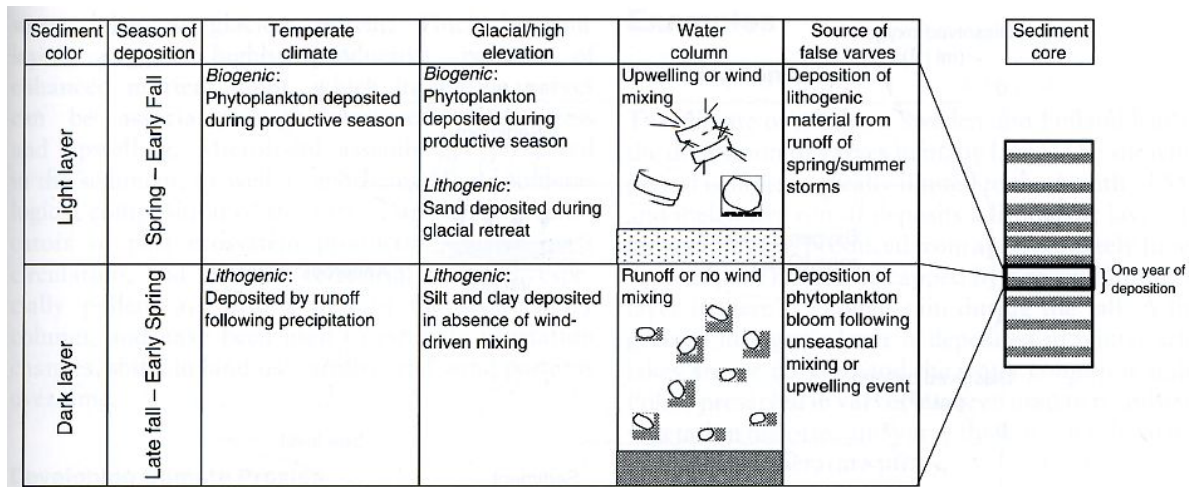
- procentuální zastoupení jednotlivých druhů pylových zrn se vyjadřuje **pylovým diagramem**



Změny vegetace probíhají v různých měřítcích, přičemž v menším prostorovém a časovém měřítku se jedná o neklimatologické faktory (požáry, škůdci, sukcese, vliv člověka aj.).

### 6.1.4 Varvy

- vrstevnaté (páskované) sedimenty formující se ročně ve vodním prostředí vlivem sezónní změny počasí (jezera, též sedimenty v mořích a oceánech)



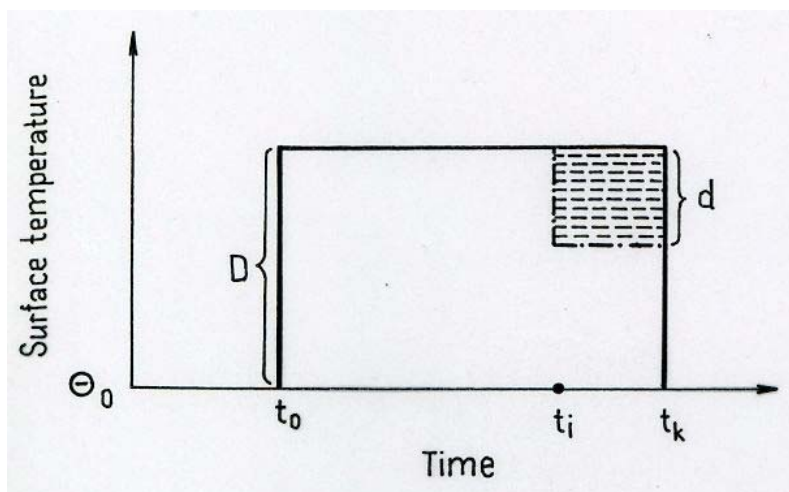
Chronologie varv může být na základě znalosti vazby regionálních klimatologických charakteristik a procesu sedimentace využita k paleoklimatologické rekonstrukci (např. množství srážek, odtok, teplota vzduchu).

### 6.1.5 Koráli

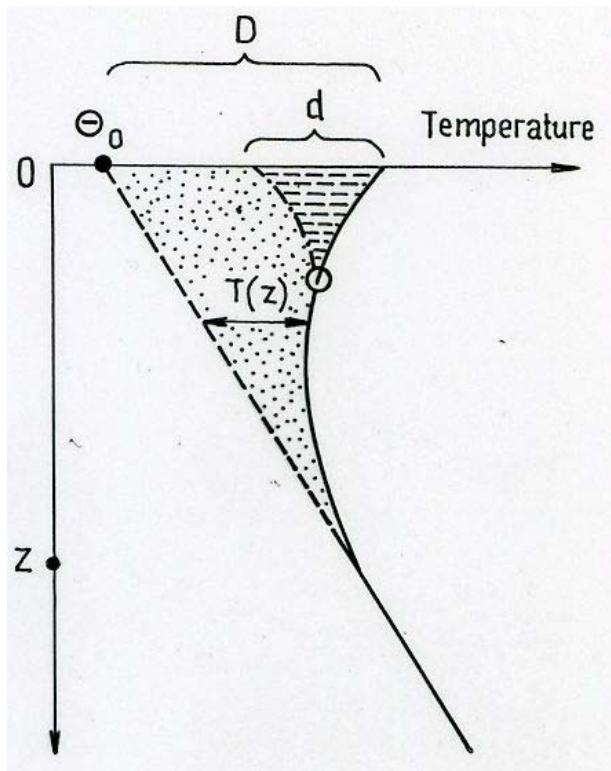
Koráli – oceány nízkých šířek, produkují většinou jednoleté růstové pásy – možnost sestavení dlouhých chronologií.

Měřené chemické ukazatele odrážejí parametry prostředí v době růstu: povrchové teploty oceánů (SST), salinita, srážky, vertikální promíchávání, říční přítok, výživnost vody, původ vodních mas, antropogenní vlivy aj.

### 6.1.6 Geotermické vrty



Vliv dlouhodobého oteplení o hodnotu  $D$  ( $t_0 \rightarrow t_i$ ) a následného ochlazení o hodnotu  $d$  ( $t_i \rightarrow t_k$ ) na změnu profilu teploty podloží s rostoucí hloubkou.



Měření teplotních profilů - nepórovité horniny nebo permafrost (teplo se šíří vedením, neovlivněné podzemní vodou).

Výhody:

- nízkofrekvenční signál (velké klimatické události)
- měřené anomálie jsou přímým termofyzikálním důsledkem minulých změn
- informace bez monitoringu v reálném čase

Nevýhody:

- nákladné vrty (využitelnost existujících)
- rekonstrukce nejasná v detailech
- vztah teplota půdy – teplota vzduchu

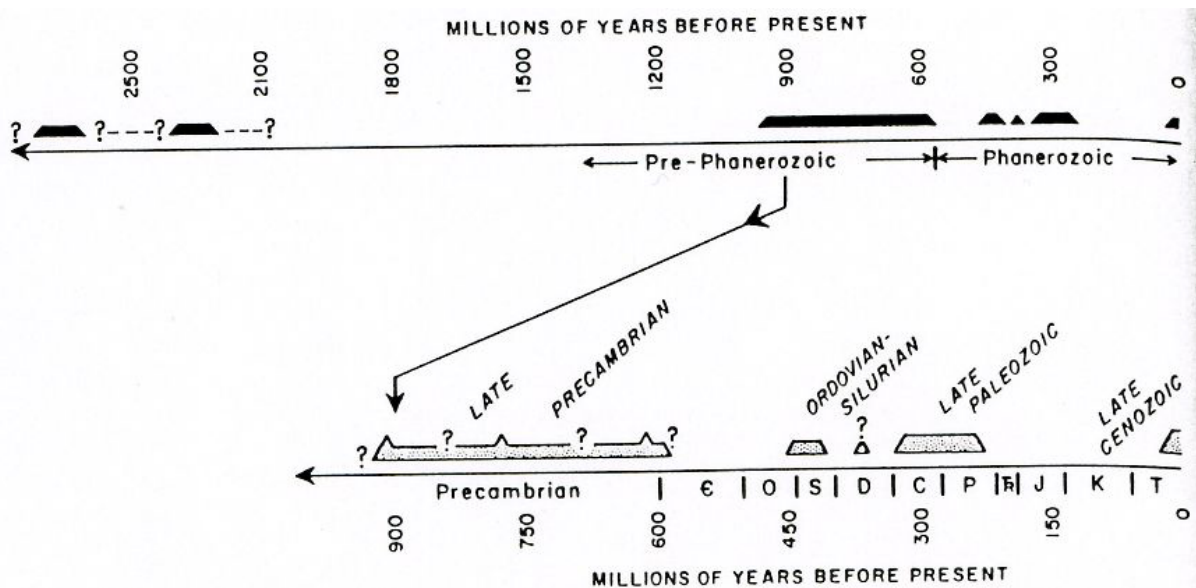
## 6.2 Časová periodizace geologické minulosti Země

ERA	PERIOD	AGE (M.y.)	EPOCH	MAJOR GEOLOGICAL AND PALEONTOLOGICAL EVENTS		
PHANEROZOIC	CENOZOIC	Quaternary	.01	Holocene	AGE OF MAMMALS	
		Tertiary	2	Pleistocene		Himalayan Mountain-building
			5	Pliocene		
			26	Miocene		Alpine Mountain-building
			37	Oligocene		
			53	Eocene		
			65	Paleocene		
	MESOZOIC	Cretaceous	136	First stages of Rocky Mtns.	AGE OF DINOSAURS	
		Jurassic	190	Breakup of Pangaea—opening of Atlantic		
		Triassic	225			
		Permian	280	Final assembly of Pangaea		
		PALEOZOIC	Carboniferous	Pennsylvanian		320
	Mississippian			345		
	Devonian		395	First land plants		
	Silurian		430	Primitive fish		
	Ordovician		500			
	Cambrian		570	First abundant shelled invertebrates		
	PRECAMBRIAN		Proterozoic	2300	Abundant iron formations	
				2800	Major gold deposits	
		Archean	4600	Earliest known life (~3500)		
			4700	Oldest rock (~3800) Formation of the earth		

## 6.3 Principiální paleoklimatické poznatky

- 4,6 až ~2,5 Ga (a – rok) – Země bez zalednění při nižší solární konstantě (Faint Sun Paradox) – snížené záření kompenzováno zesíleným skleníkovým efektem
- ~2,5 Ga – doklady pro první zalednění (dosažena mezní teplota pro vznik zalednění)





- ~2,5 až 0,9 Ga – Země bez ledovců přes nízkou svítivost Slunce a slabší skleníkový efekt
- 0,9 až 0,6 Ga – tři hlavní fáze zalednění (včetně ledu v nízkých šířkách)
- 600 až 100 Ma – převážně mírné klima s dvěma fázemi růstu ledu – velká sezónní kolísání na superkontinentech (Gondwana, Pangea)
- 100 až 50 Ma – mírné klima bez zalednění (změny v rozdělení pevnin-oceánů nemohou adekvátně vysvětlit vysoké polární teploty) – snad vysoké koncentrace CO<sub>2</sub>
- 50 až ~3 Ma – postupné ochlazování a vysušování Země – faktory: tektonika litosférických desek, CO<sub>2</sub> (snad dvojnásobek koncentrace mezi 50–3 Ma), oceánský transport tepla – menší vliv zdvihu Tibetu a Kordiller v Severní Americe; významná role náhlých přechodů (abrupt transitions), kdy systém rychle přešel do nového rovnovážného stavu (zpětná vazba led-albedo, termohalinní instabilita); zalednění: Antarktida asi 40 Ma, Grónsko 3–4 Ma, střední šířky 2,4–3,2 Ma
- 3,0 až 0,0 Ma – četné oscilace ledovcových štítů s teplými intervaly jako dnes – významné změny v termohalinní cirkulaci a složení atmosféry (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>); poslední glaciální maximum 18 000 a BP; sucho od kontinentálního zalednění směrem k rovníku; časná stadia interglaciálů - velmi vlhké tropy (pluviály)

## 6.4 Změny klimatu v kvartéru

- posledních 2,48 miliónů let se dělí na holocén (cca 12 tisíc let před současností - BP) a pleistocén
- 15-20 kvartérních klimatických cyklů – střídání glaciálů a interglaciálů
- holocén – současný interglaciál, jsme na rozhraní jeho druhé a třetí třetiny, silně ovlivněn činností člověka
- periodizace holocénu – postglaciální klimatické optimum (6000–8000 let BP)

## 6.5 Časová měřítká pravděpodobně působících klimatotvorných faktorů

- 109 a – dlouhodobé kolísání svítivosti Slunce (kompenzace nižší svítivosti skleníkovým efektem)
- 107–108 a – paleogeografické faktory (např. kontinentální drift, změny oceánské cirkulace)

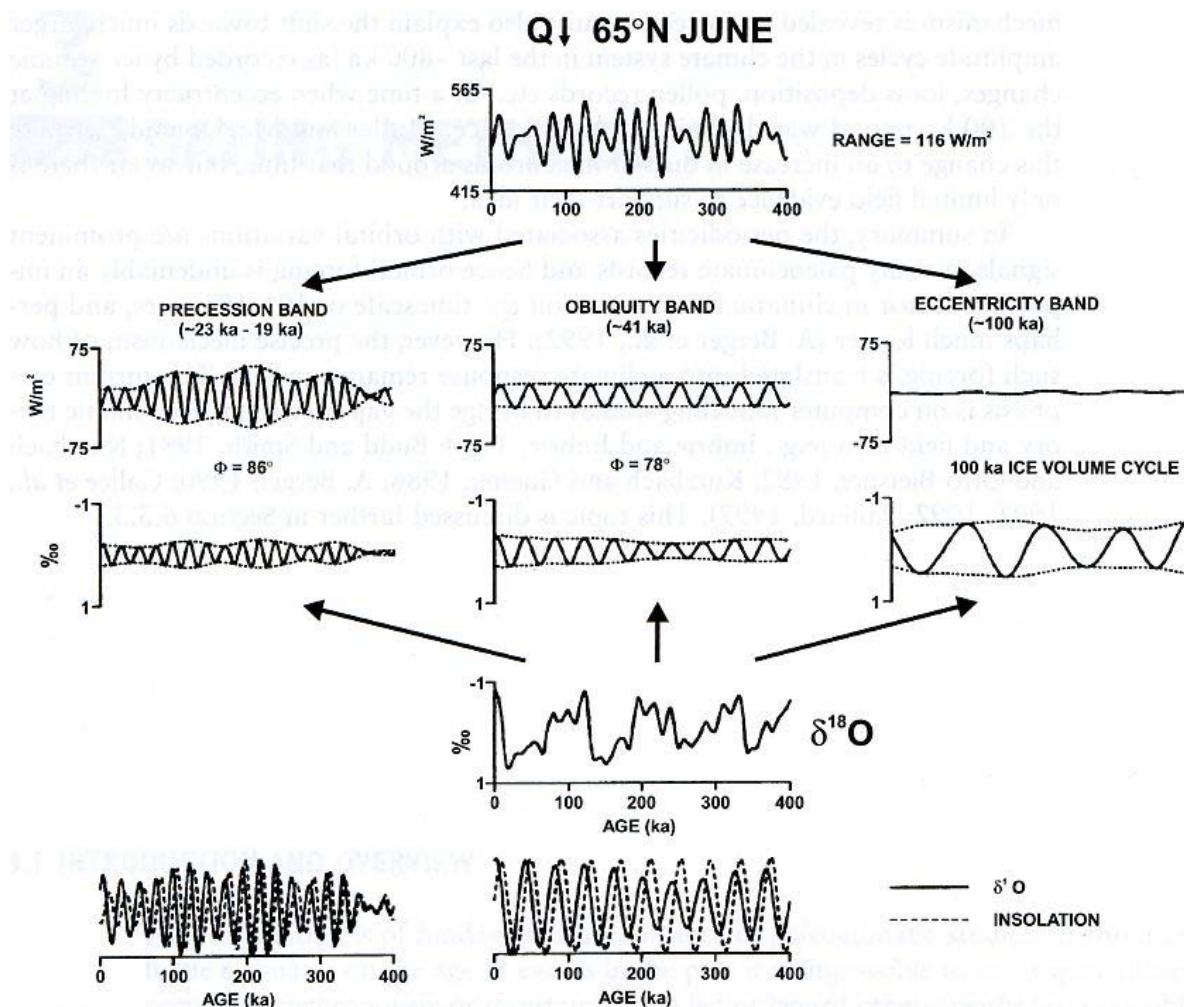
- 106 a – tektonické fluktuace a snad dlouhodobé změny orbitální insolace?
- 103–105 a – externí vlivy (orbitální působení), interní vlivy zpětných vazeb v systému pevnina – moře – vzduch – led (včetně CO<sub>2</sub>)
- 100–102 a – sluneční proměnlivost, vulkanická činnost, vnitřní zpětné vazby a interakce v systému oceán - atmosféra

Význam **paleoklimatického modelování** pro poznání minulých kllimat a jejich příčinné podmíněnosti.

## 6.6 Hypotézy klimatických změn

za nejvěrohodnější hypotézu objasňující kvartérní klimatické cykly je považována Milankovičova astronomická hypotéza

- **graf ekvivalentních šířek pro 65° s.š.** (šířky, které dostávají v současnosti v tzv. letním kalorickém půlroce stejné množství slunečního tepla jako v minulosti 65°)
- růst ekvivalentní šířky – ochlazení a naopak



Insolace na 65o s. š. v posledních 400 000 letech podle parametrů zemské dráhy (a) v porovnání s objemem kontinentálního ledu odvozeného podle δ<sup>18</sup>O v mořských sedimentech (b) s hlavními komponentami téže frekvence. (c) dokumentuje koherenci mezi radičním působením a kontinentálním zaledněním. Nevýznamné jsou změny v insolaci způsobené změnami excentricity zemské dráhy

## 6.7 Globální oteplování a paleoklimatologie

- paleoklimatologie ukazuje na reálnost možných teplotních změn při růstu koncentrací skleníkových plynů
- v porovnání se současností jiné geografické podmínky a působící faktory

### Literatura:

- Bradley, R. S. (1999): *Paleoclimatology. Reconstructing Climates of the Quaternary*. Academic Press, San Diego, London, Boston, New York, Sydney, Tokyo, Toronto, 610 s.
- Crowley, T. J., North, G. R. (1991): *Paleoclimatology*. Oxford University Press, Clarendon Press, New York, Oxford, 349 s.
- Schweingruber, F. H. (1996): *Tree Rings and Environment. Dendroecology*. Paul Haupt, Bern, Stuttgart, Vienna, 609 s.