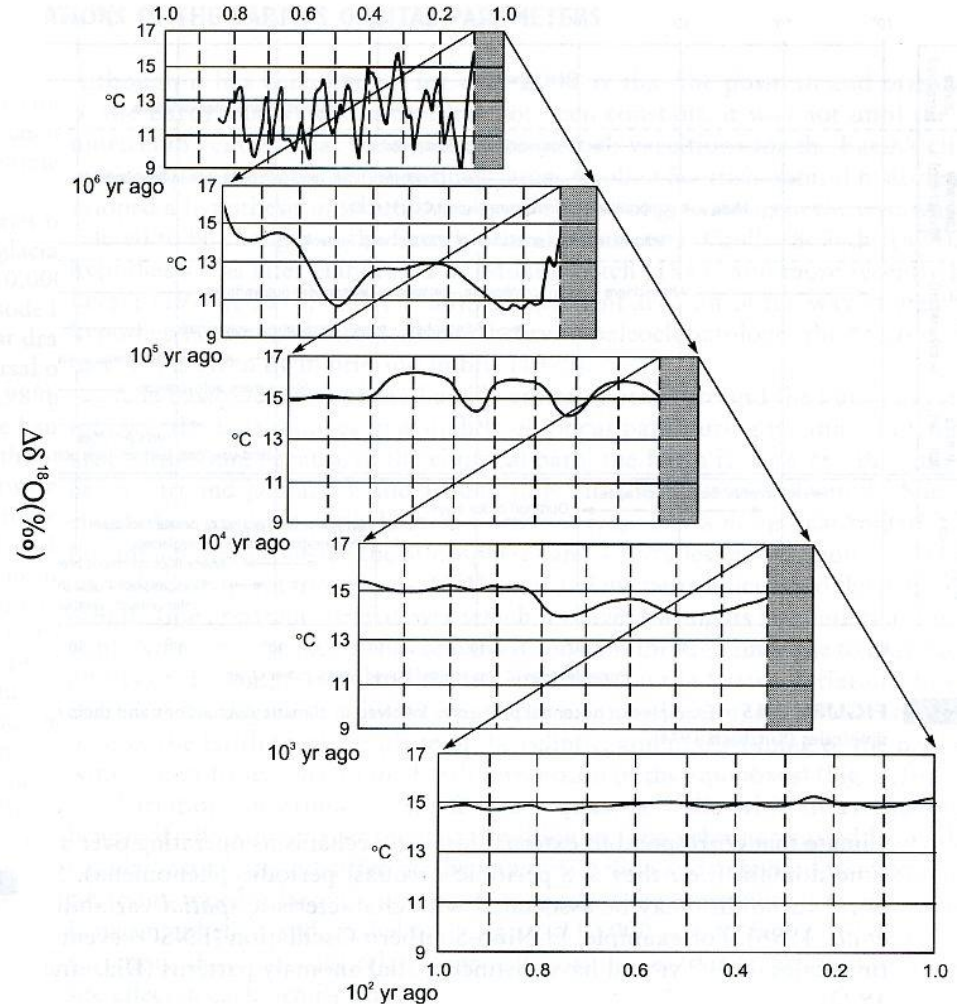
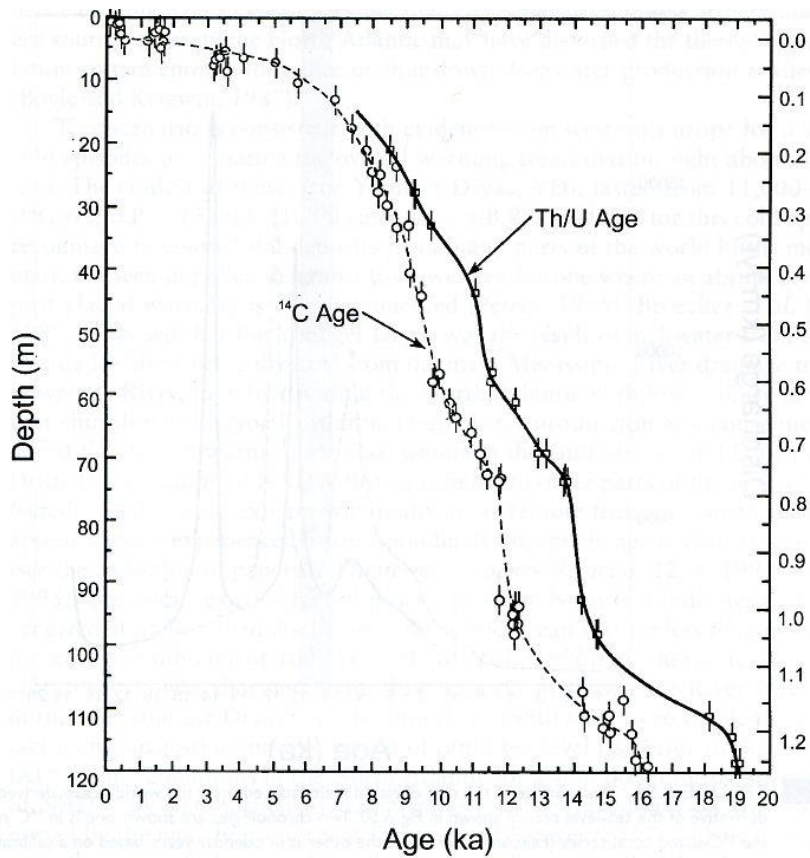


6. Paleoklimatologie



- **změna klimatu** – klimatické výkyvy se zřetelně vyjádřeným dlouhodobým trendem (ochlazování, oteplování) v časovém intervalu 10^3 roků a více, podmíněným změnou základních klimatotvorných faktorů

- **paleoklimatické údaje**

nepřímé (proxy) údaje o klimatu z období přesahujícího 10^2 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** – stejné vztahy mezi klimatem a přírodními procesy a jevy platily v minulosti stejně jako v současnosti

- **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 ^a	$\sim 10^7$	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

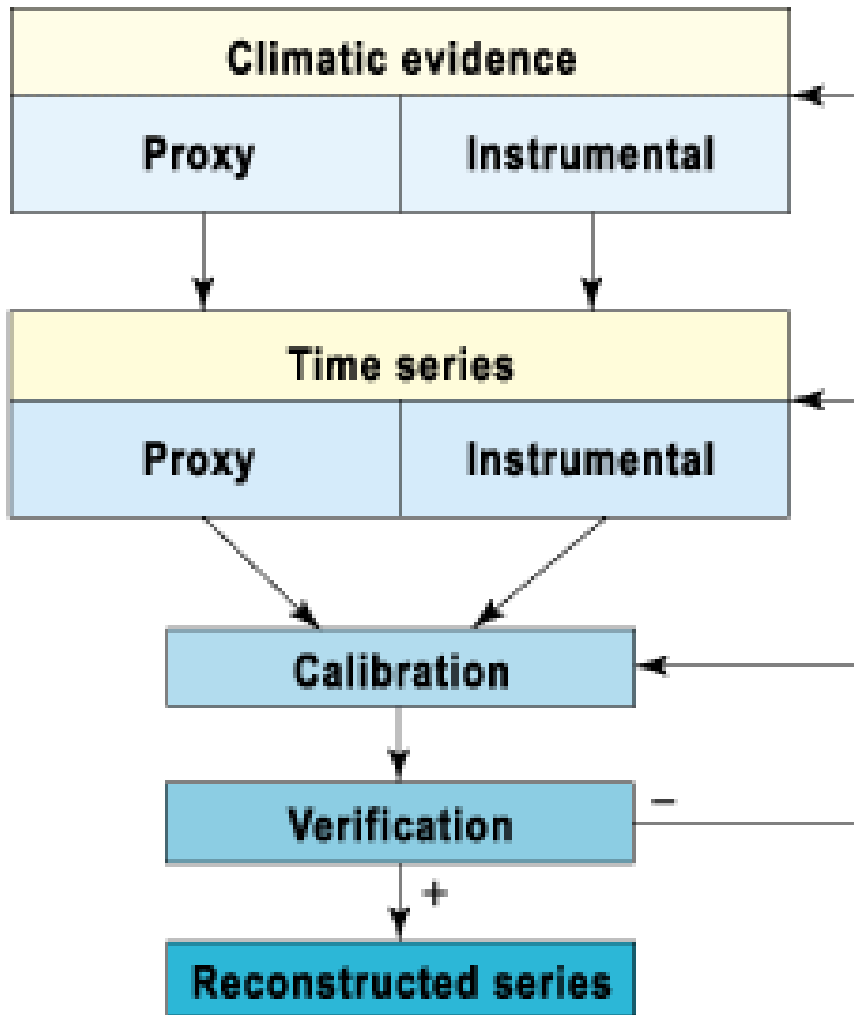
S = solar activity

After Bradley and Eddy (1991).

^a In rare circumstances (varved sediments) ≤ 10 yr.

Bradley (1999)

Paleoklimatická rekonstrukce



- řady proxy-dat (letokruhy, teplotní a srážkové indexy, jezerní sedimenty, speleotémy atd.)

- kalibrace: přenosová funkce (proxy versus měřené údaje) pro období překryvu

- verifikace: různé statistiky

- rekonstrukce

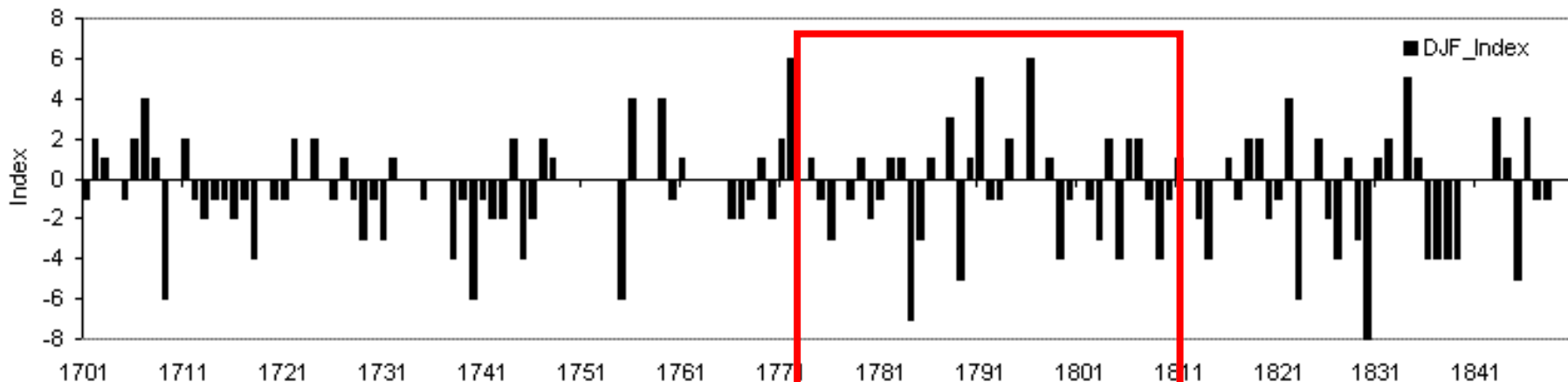
Diagram kvantitativní paleoklimatické rekonstrukce

Přenosová funkce je stanovena pro období překryvu a aplikována na proxy data předchozího období.

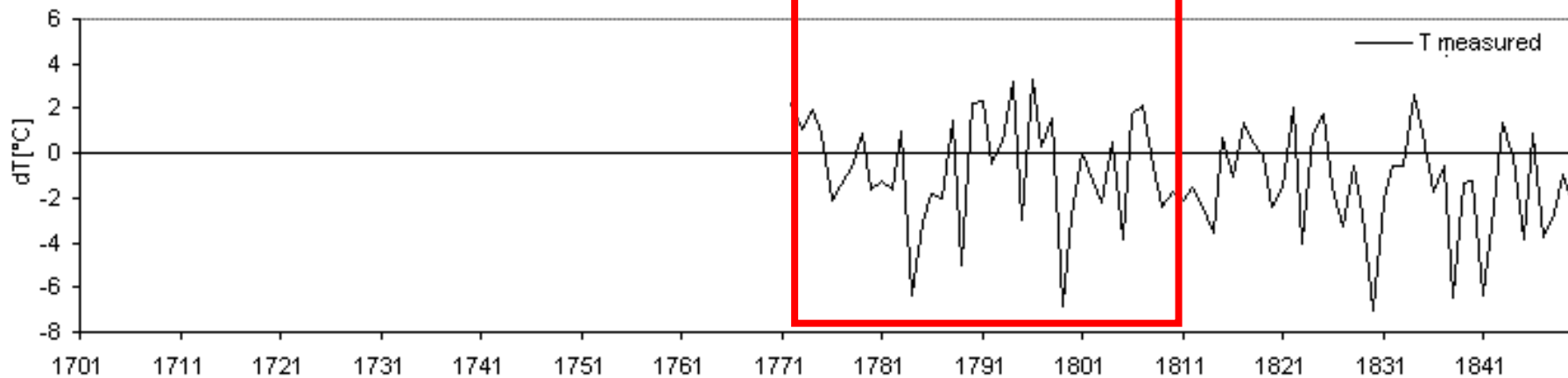
$T(\text{rek}) = f(\text{proxy})$

$T(\text{měř}) = f(\text{proxy})$

$T(\text{vyp})$ v. $T(\text{měř})$

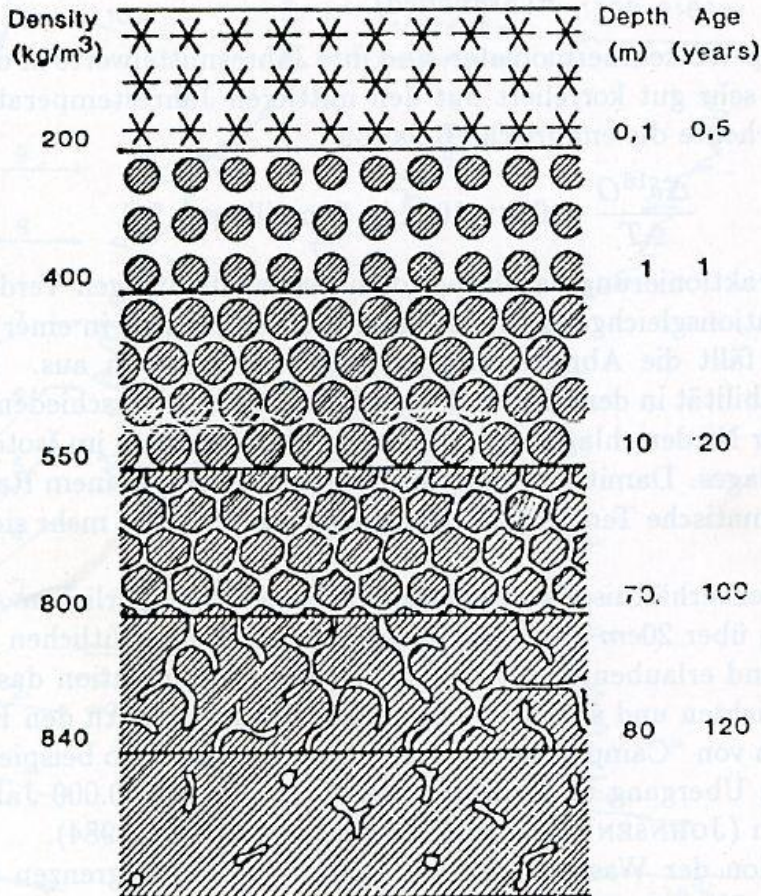


← **rekonstrukce** → **kalibrace** ← **verifikace** →

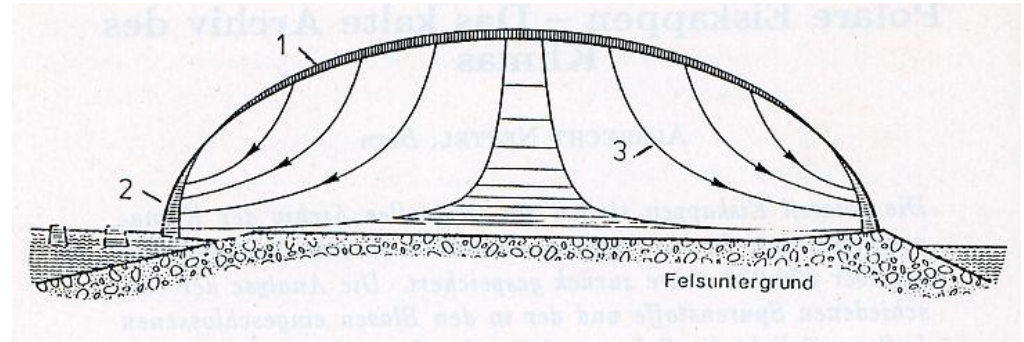


6.1.1 Ledovcová jádra

Přeměna sněhu ve firn a led



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).
Vrty 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.)

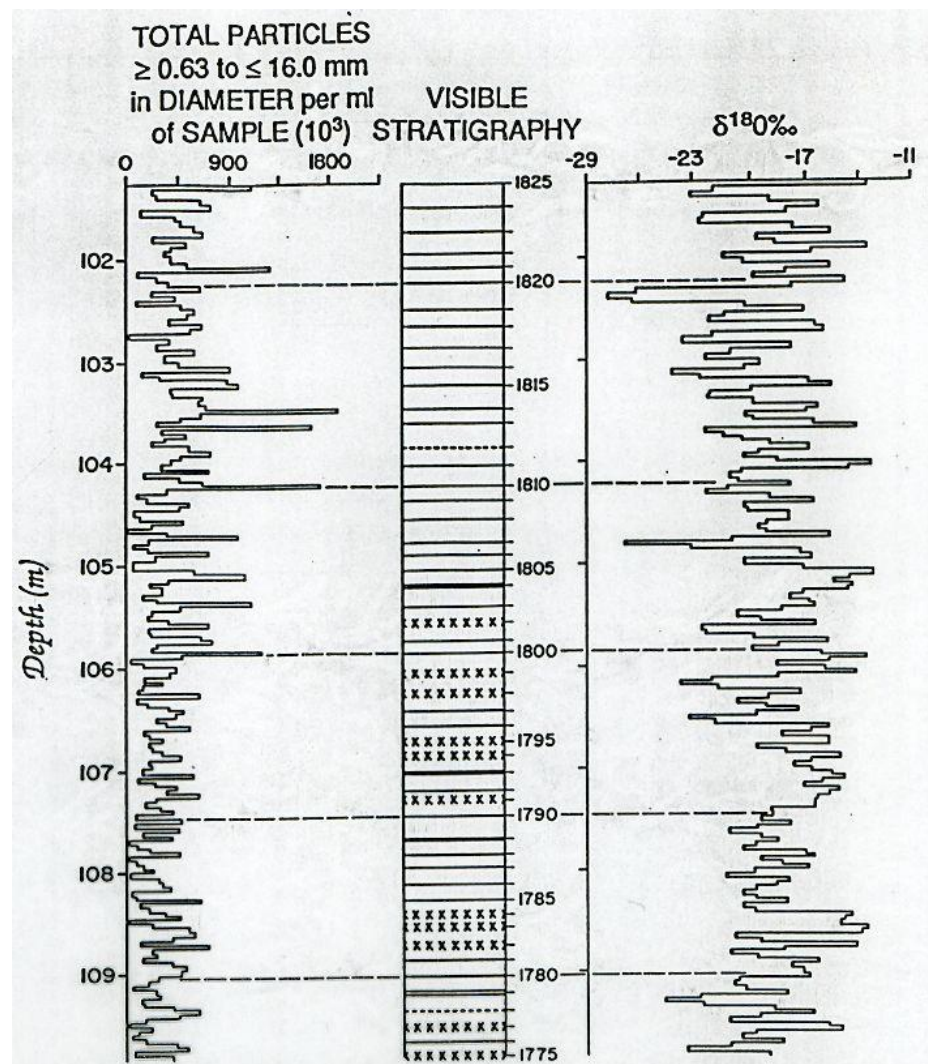
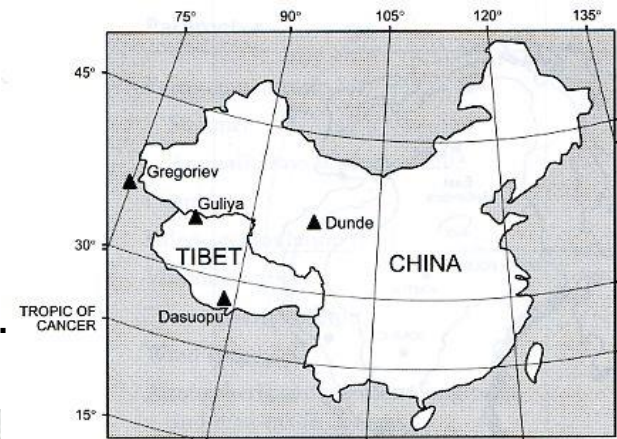


Figure 2. The stratigraphic parameters used to date the Quelccaya cores showing a 50-year period from 1775 to 1825. Annual signals are recorded in microparticle concentrations (particles from ≥ 0.63 to $16.0 \mu\text{m}$ in diameter per ml) of sample, oxygen isotopes, and visible stratigraphy. For stratigraphy, a single solid line represents a normal dry-season dust layer; a single dashed line and double dashed line represent very light and light dust layers, respectively. Series of X's symbolize diffuse dry-season layers (Thompson et al., 1986).

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}O – 99,76 %), 9 (^{17}O – 0,04 %) a 10 neutronů (^{18}O – 0,20 %).



Dunde Ice Cap, China, 1987

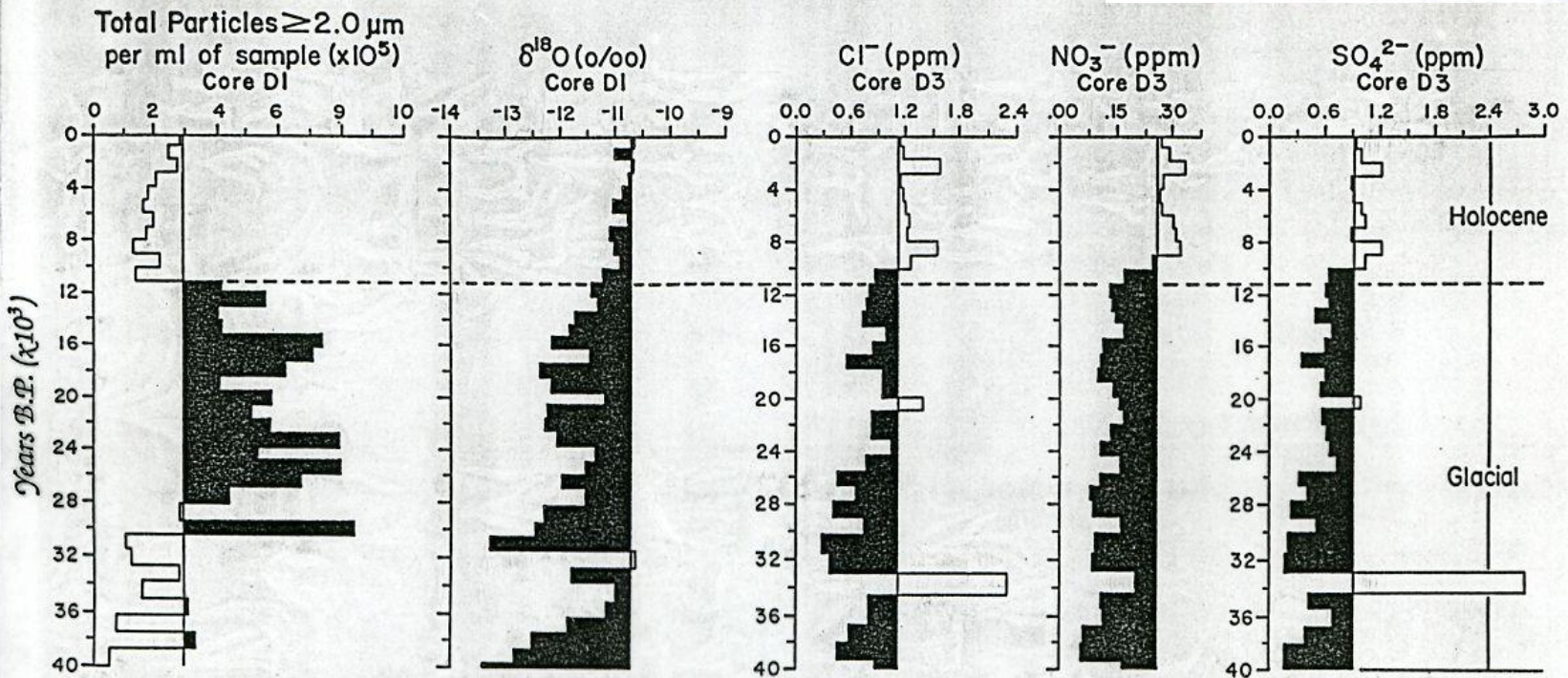


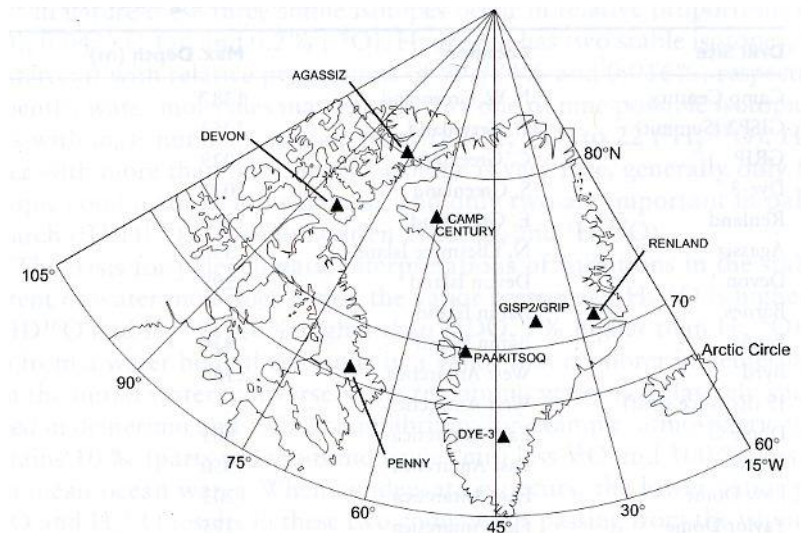
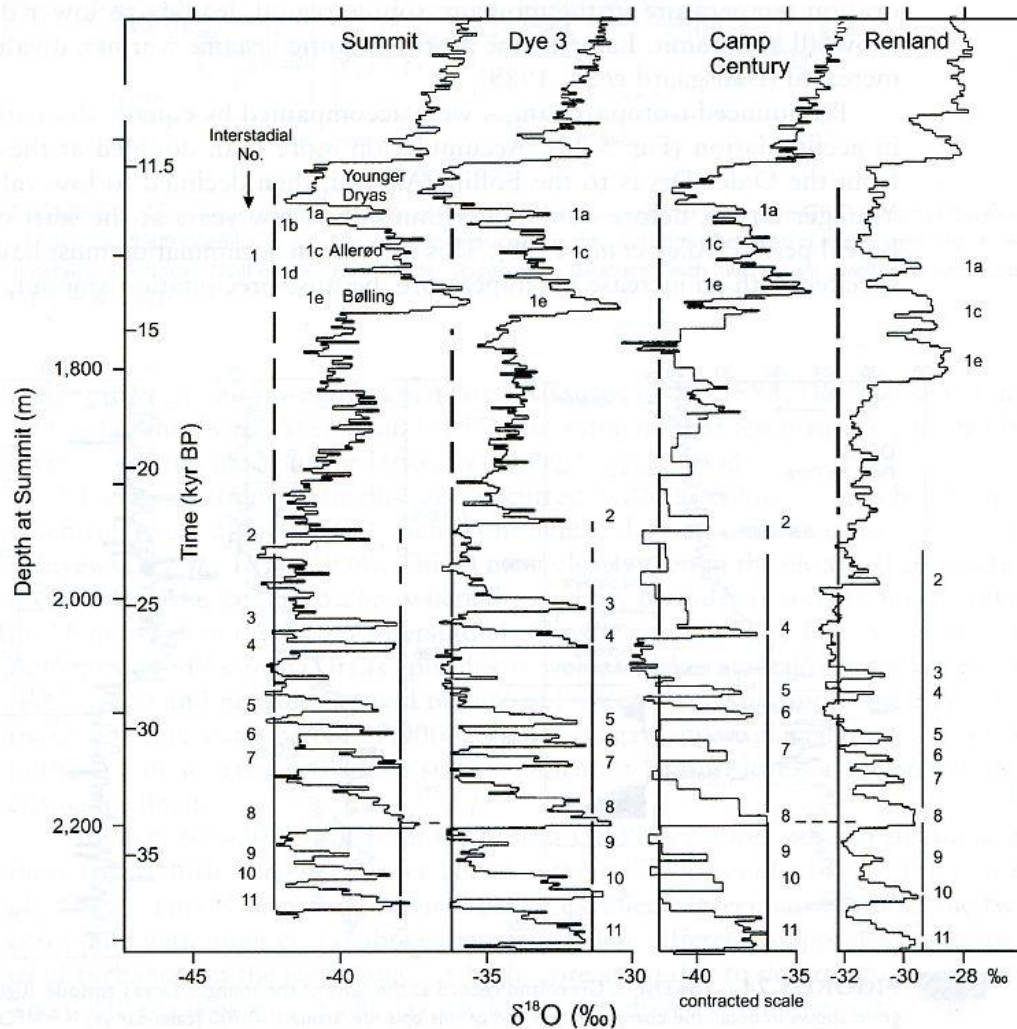
Figure 1. The 1000-year averages of dust concentrations (diameters $\geq 2.0 \mu\text{m}$), $\delta^{18}\text{O}$, Cl^- , NO_3^- , and SO_4^{2-} are illustrated for the last 40,000 years. The late glacial stage-Holocene transition is characterized by an abrupt decrease in insoluble dust, an increase in dissolved species, and a more gradual warming inferred from $\delta^{18}\text{O}$. Departures from the mean values of all samples in the 40,000-year record (not the individual 1000-year averages) are shaded. There are 5 meters of ice below the 40,000-year model cutoff shown here (Thompson et al., 1989).

Analýza poměru izotopů kyslíku $\delta^{18}\text{O} = (R - R_0) / R_0$,

kde R je poměr naměřených koncentrací v ledovcovém jádru a R_0 je srovnávací poměr izotopů v oceánu, přičemž R , resp. $R_0 = c(^{18}\text{O}) / c(^{16}\text{O})$

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 firny v led
- nadmořskou výšku a zeměpisnou šířku lokality



Koncentrace síranových iontů 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.

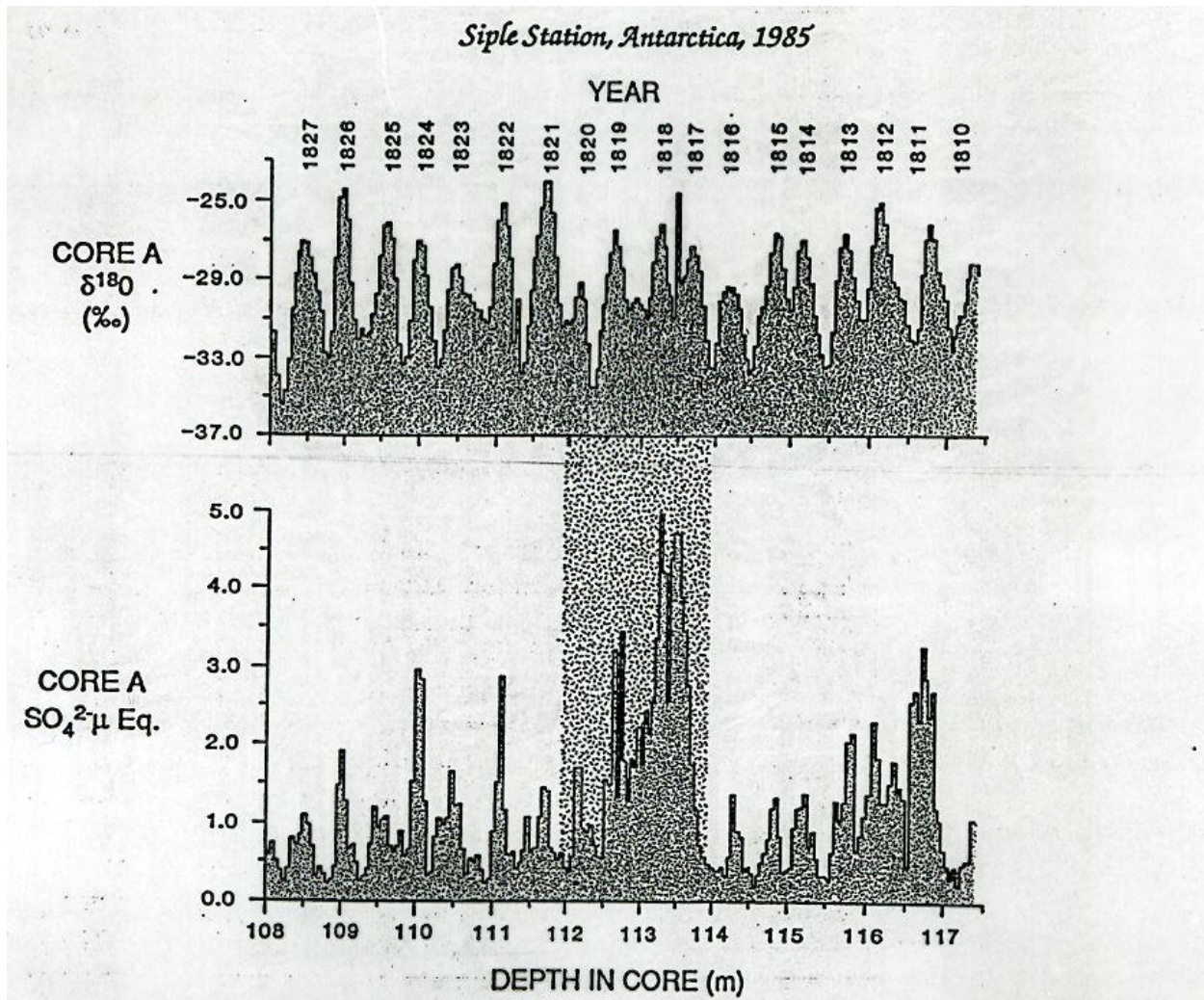
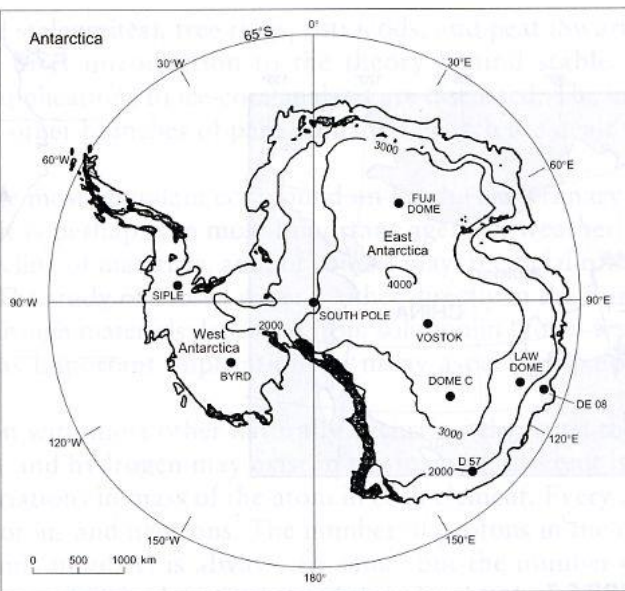
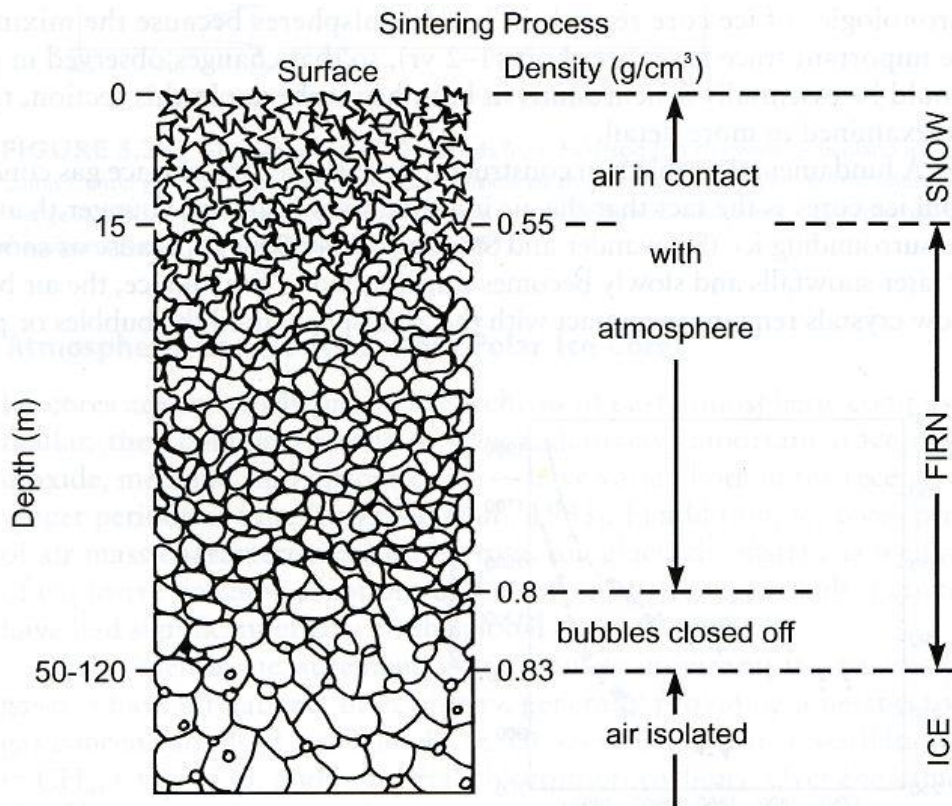
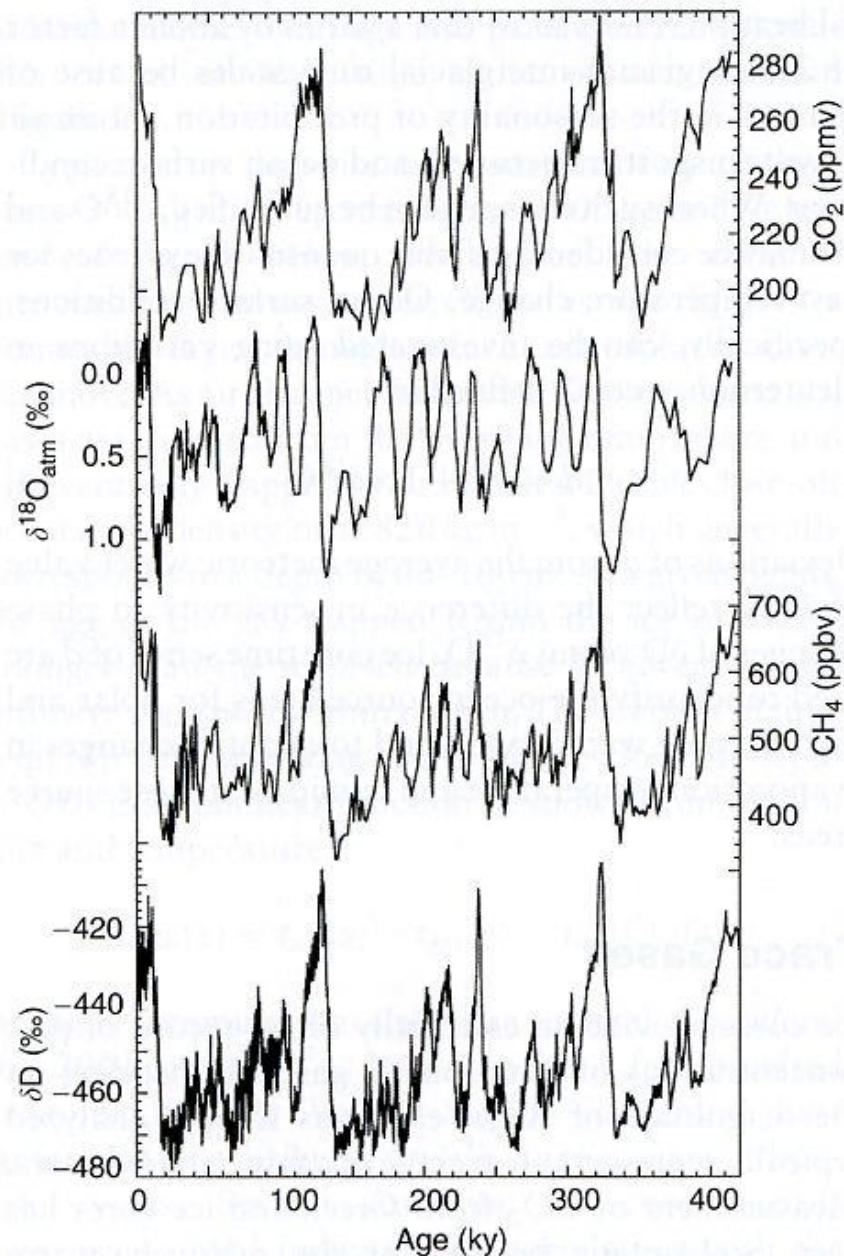


Figure 3. A 10-m section from cores A and B drilled at Siple Station, Antarctica. These show the individual measurements of SO_4^{2-} concentration and demonstrate the reproducibility (i.e., the reliability) of the chemistry record. Individual analyses of $\delta^{18}\text{O}$ are illustrated for core A. The annual variations in both parameters provide an excellent time scale for this core. The eruption of Tambora in 1816 is preserved as a prominent SO_4^{2-} event in both cores (Thompson and Mosley-Thompson, in press).



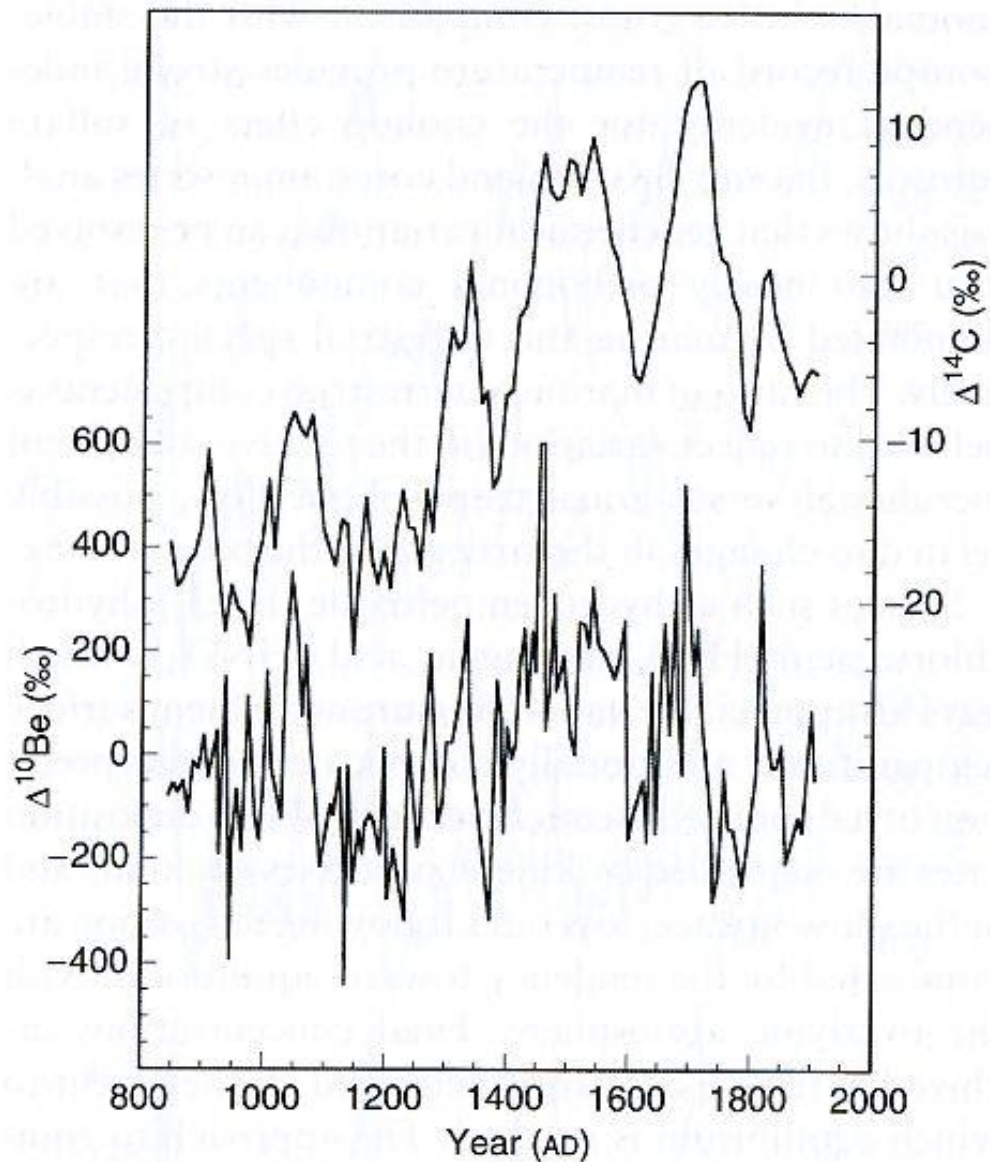
- vzduchové bubliny uzavřené v ledu umožňují analyzovat **koncentraci skleníkových plynů** (CO_2 , NH_4)

Koncentrace CO_2 , CH_4 , $\delta^{18}\text{O}$ a δD (poměr izotopů vodíku) na stanici Vostok v Antarktidě za 420 000 let

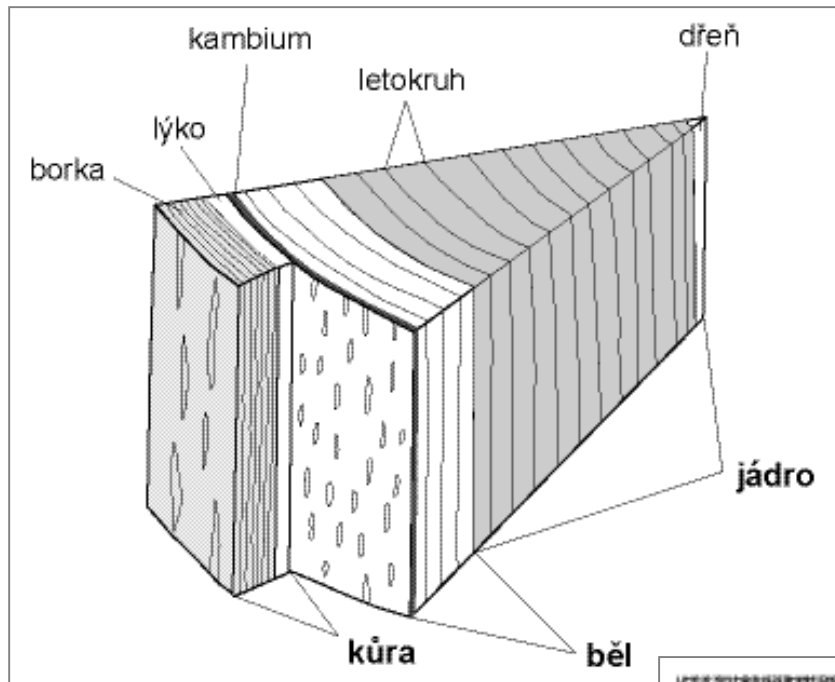


Koncentrace izotopu berylia ^{10}Be jako proxy indikátoru sluneční činnosti

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



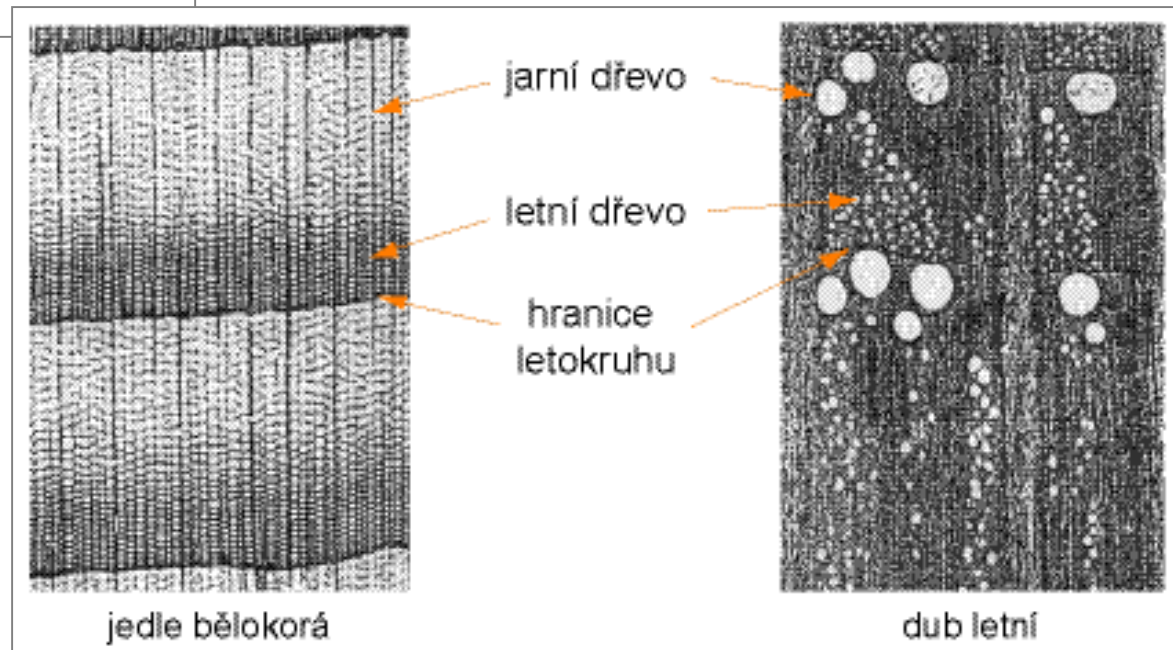
Koncentrace ^{10}Be z ledovcového jádra na stanici Jižní pól v Antarktidě v porovnání s koncentrací atmosférického izotopu uhlíku ^{14}C získaného z analýzy letokruhů



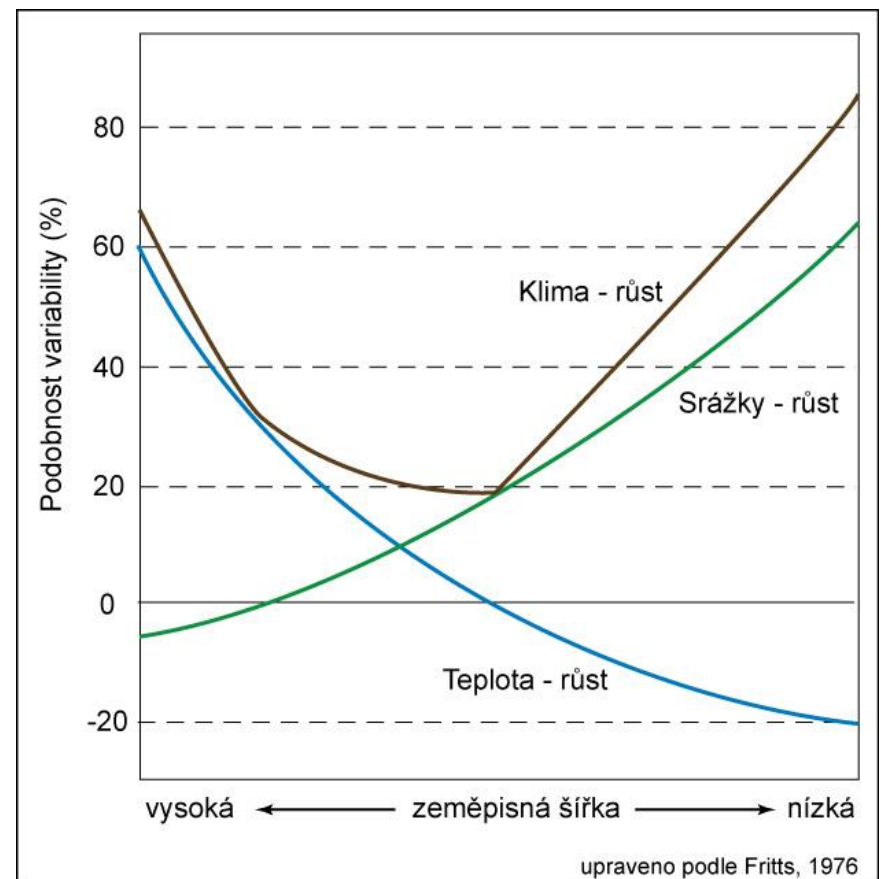
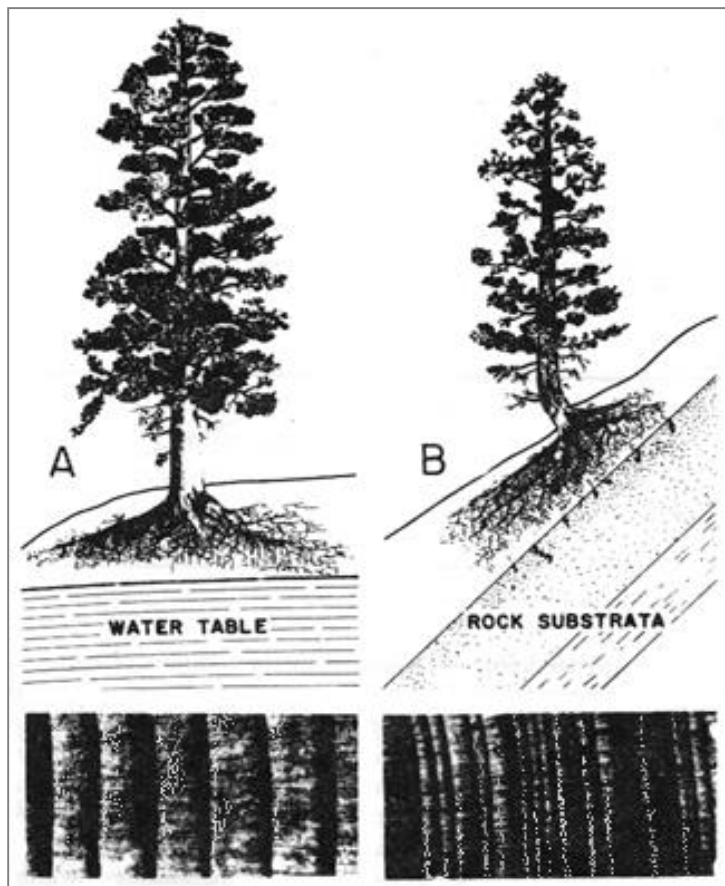
Dendrochronologie je nauka používající letokruhových analýz k datování událostí.

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

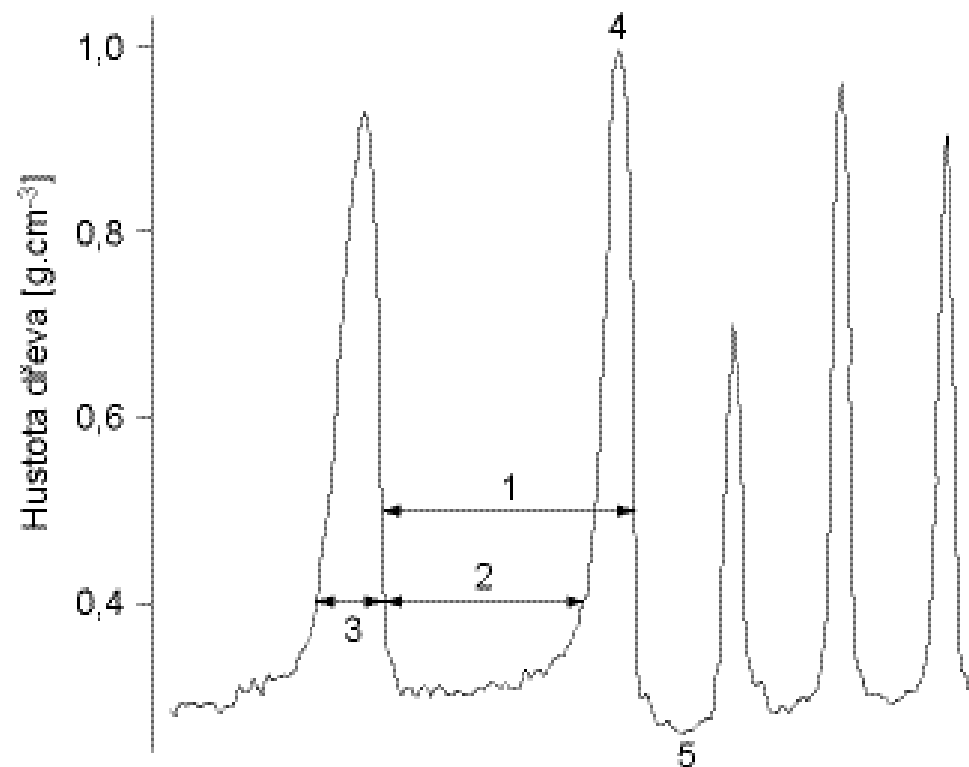
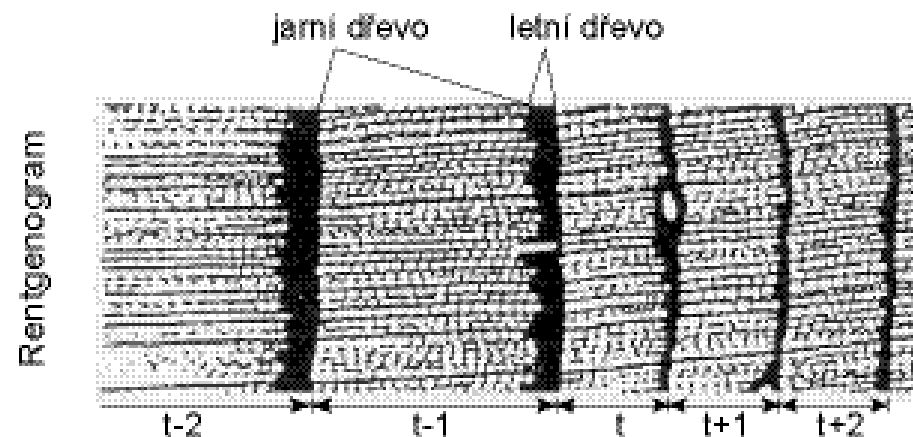
6.1.2 Letokruhy



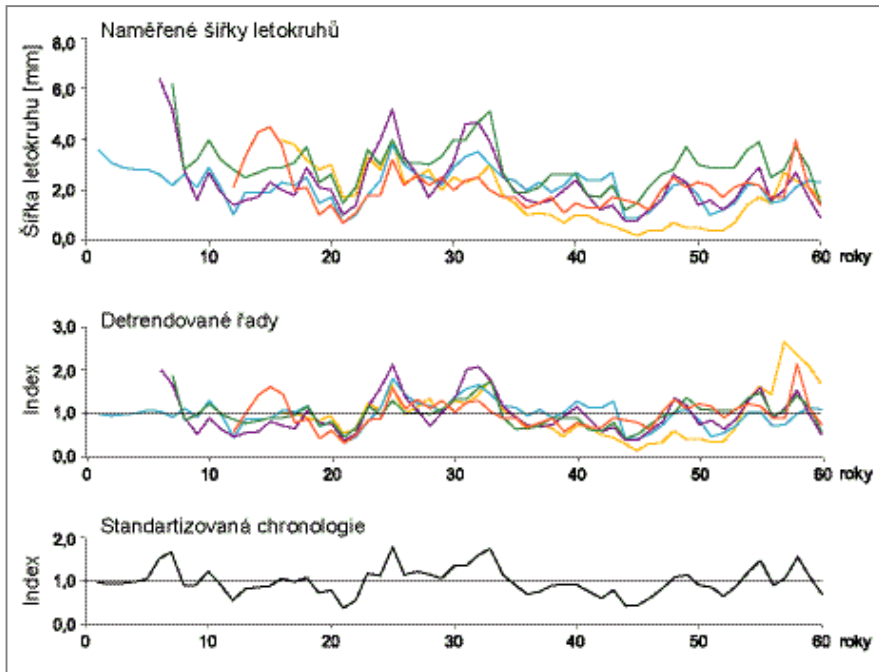
- základní princip dendroklimatologické rekonstrukce vychází z tzv. **faktoru v minimu** znamenajícího, že okolní podmínky se blíží limitní hranici přežití organismu
- horní (severní) hranice lesa – teplota vzduchu
- dolní hranice lesa – srážky



Měřené charakteristiky letokruhů



- 1 - šířka letokruhu
- 2 - šířka jarního dřeva
- 3 - šířka letního dřeva
- 4 - maximální hustota dřeva
- 5 - minimální hustota dřeva

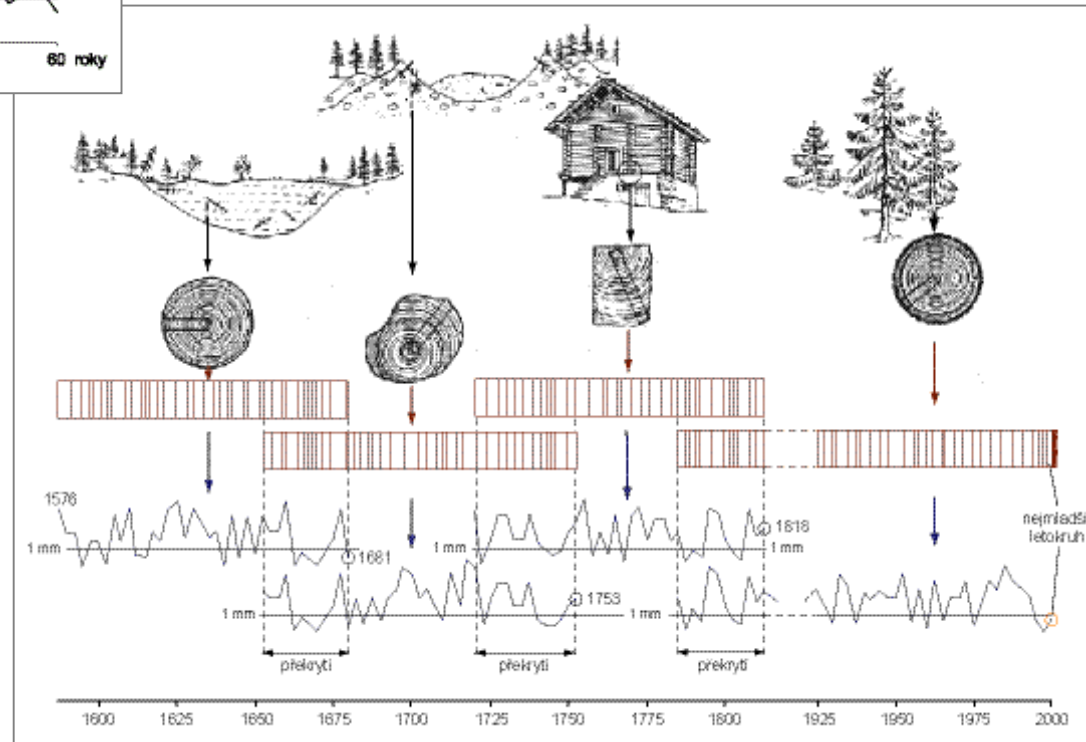


Datování letokruhových řad

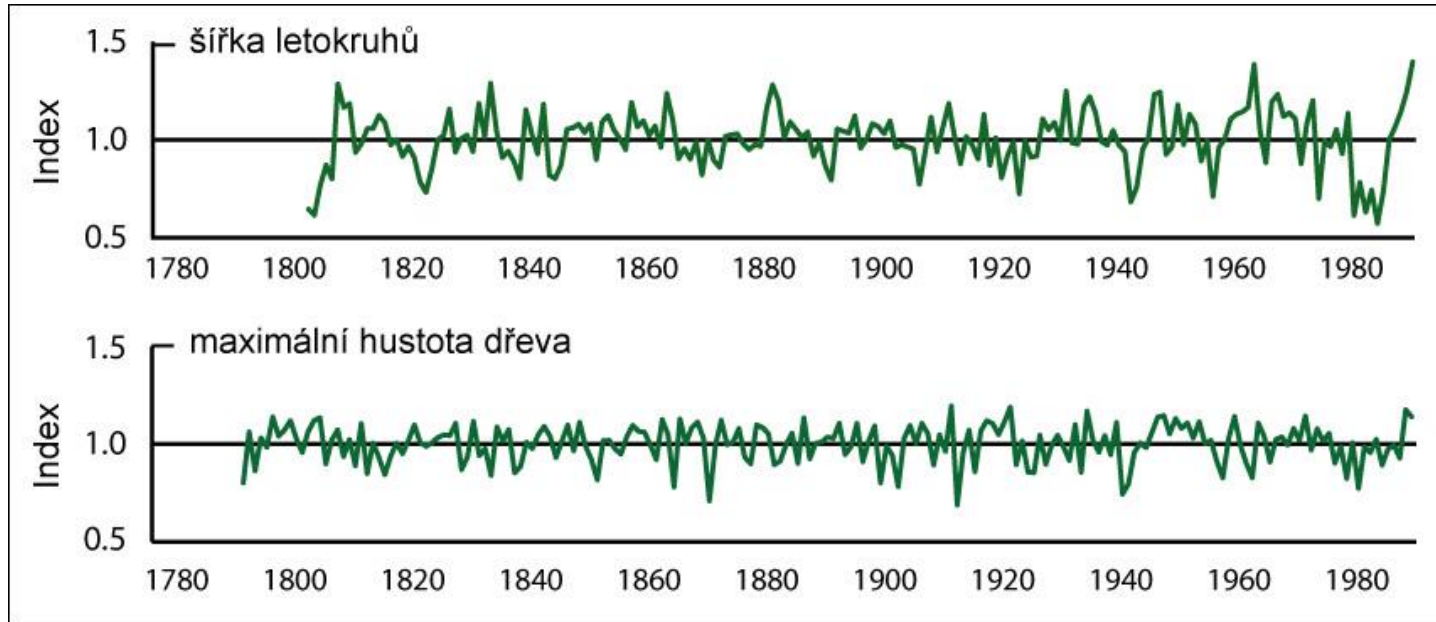
- stromy jednoho druhu v daném regionu vykazují určitou podobnost letokruhových řad
- standardní chronologie pro druh a oblast

Standardizace

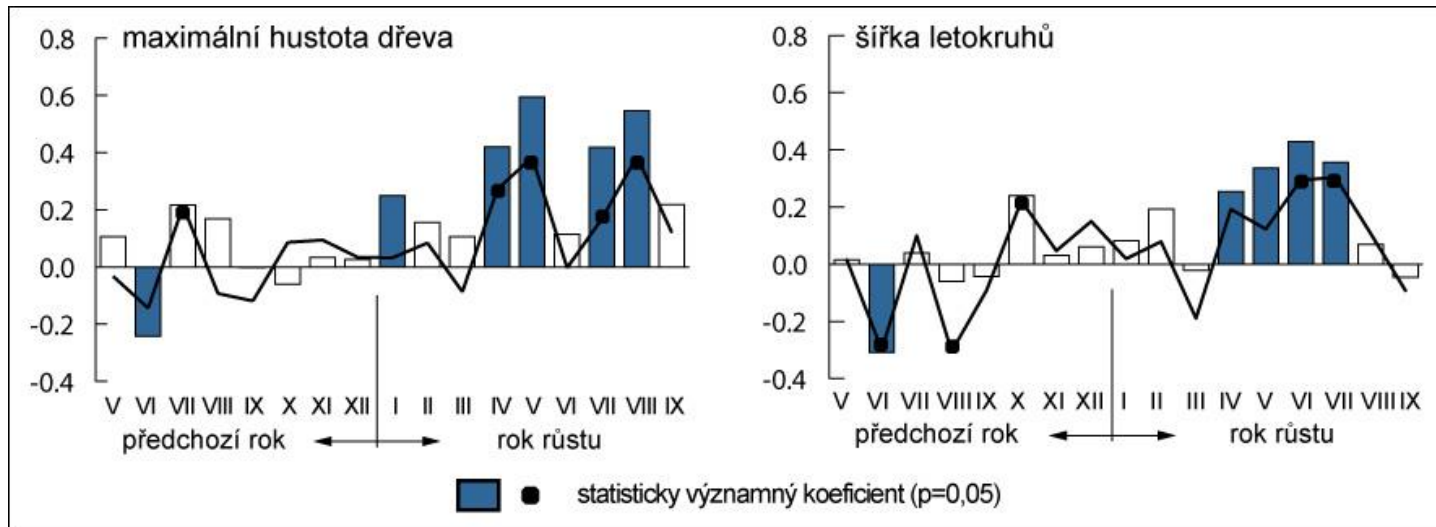
- odstranění růstového trendu
- vytvoření bezrozměrné indexové chronologie pro stanoviště (oblast)



Chronologie smrku - Krkonoše

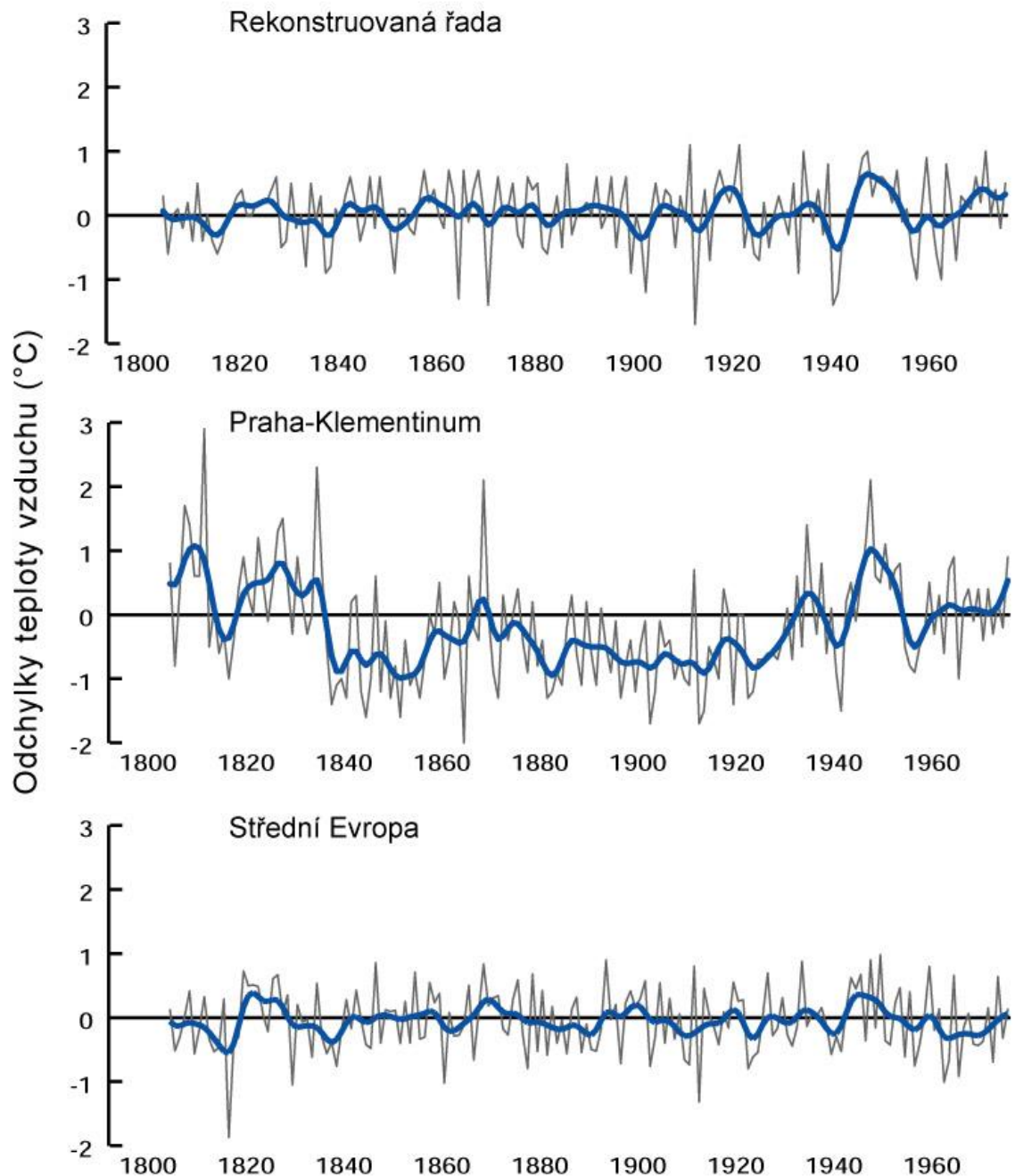


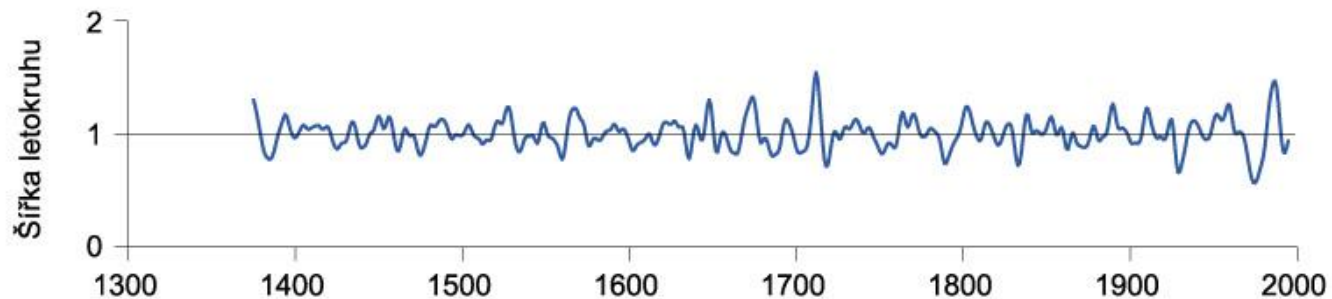
Funkce odezvy letokruhových charakteristik smrku na teplotu vzduchu



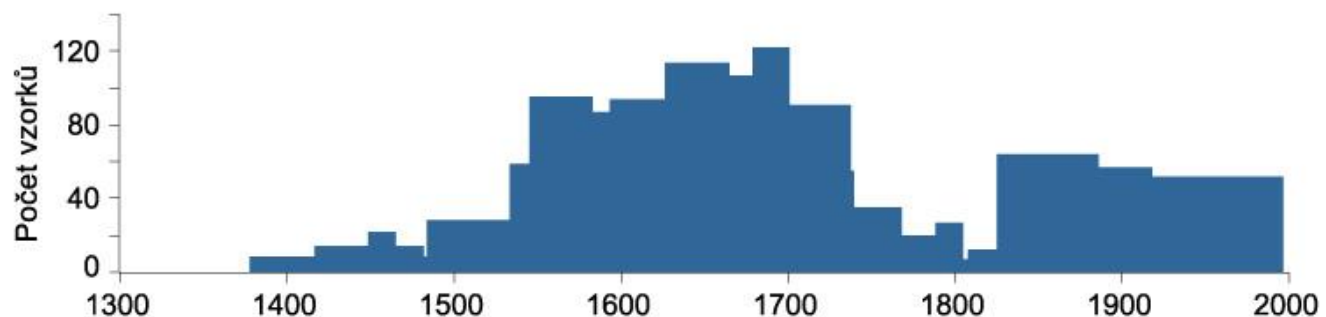
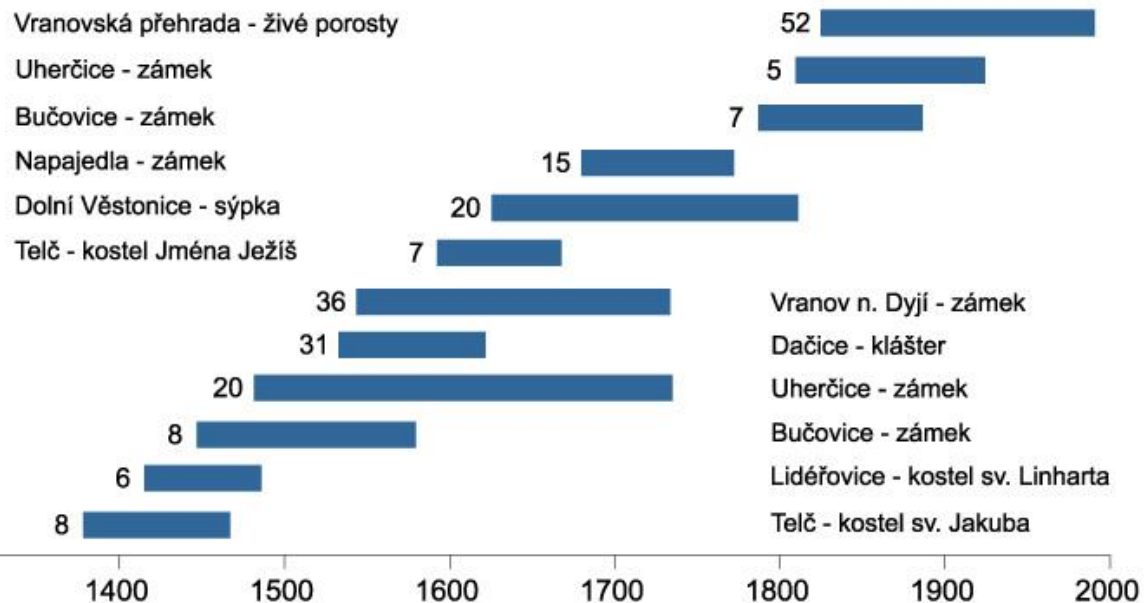
Porovnání rekonstrukce teploty vzduchu teplého půlroku podle chronologie smrku v Krkonoších se stanicí Praha-Klementinum a dendroklimatologickou teplotní rekonstrukcí pro střední Evropu. Dendroklimatologická rekonstrukce zjevně potlačuje nízkofrekvenční teplotní signál.

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.

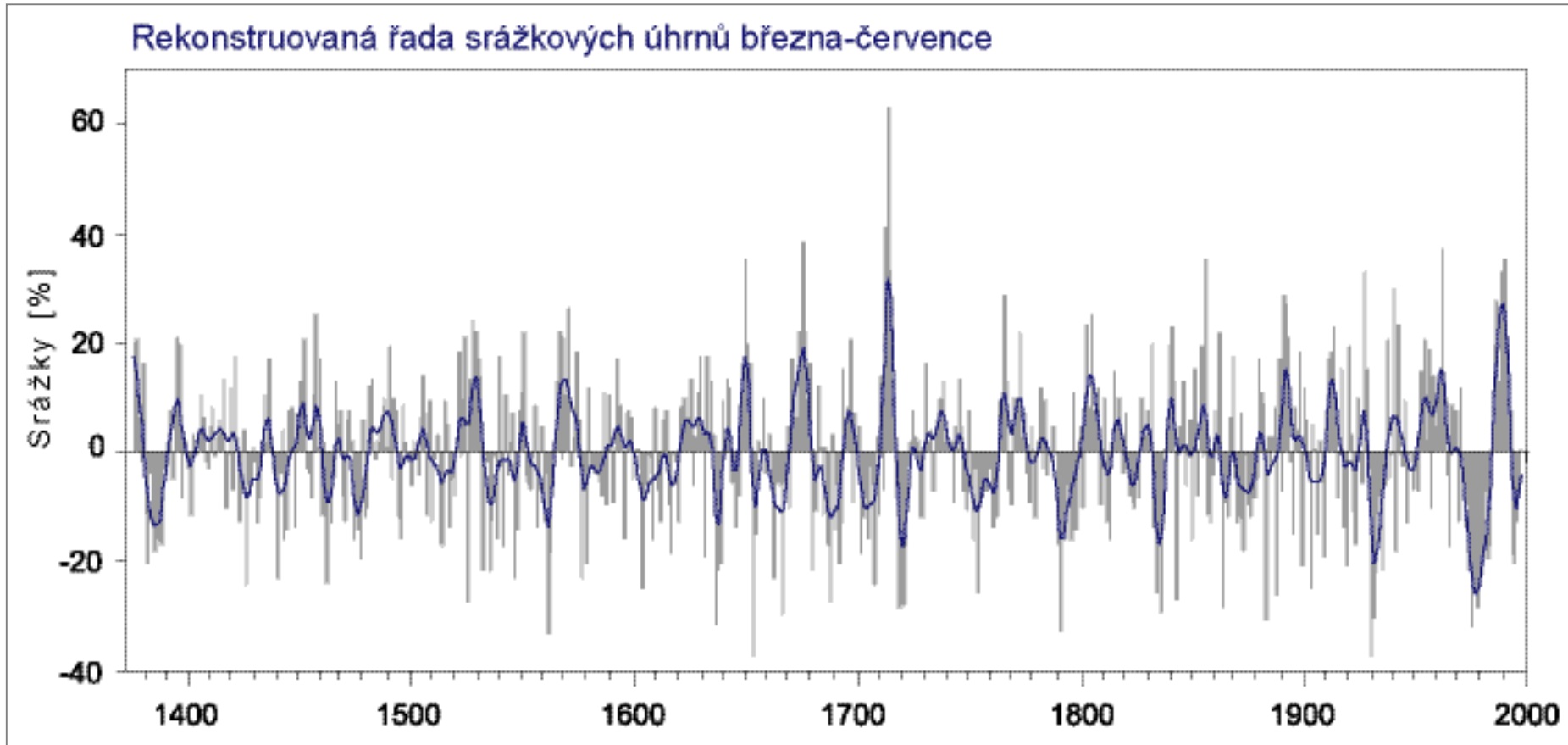




Chronologie jedle na
jižní Moravě z období
1376–1996 odvozená z
živých porostů a
historických dřev



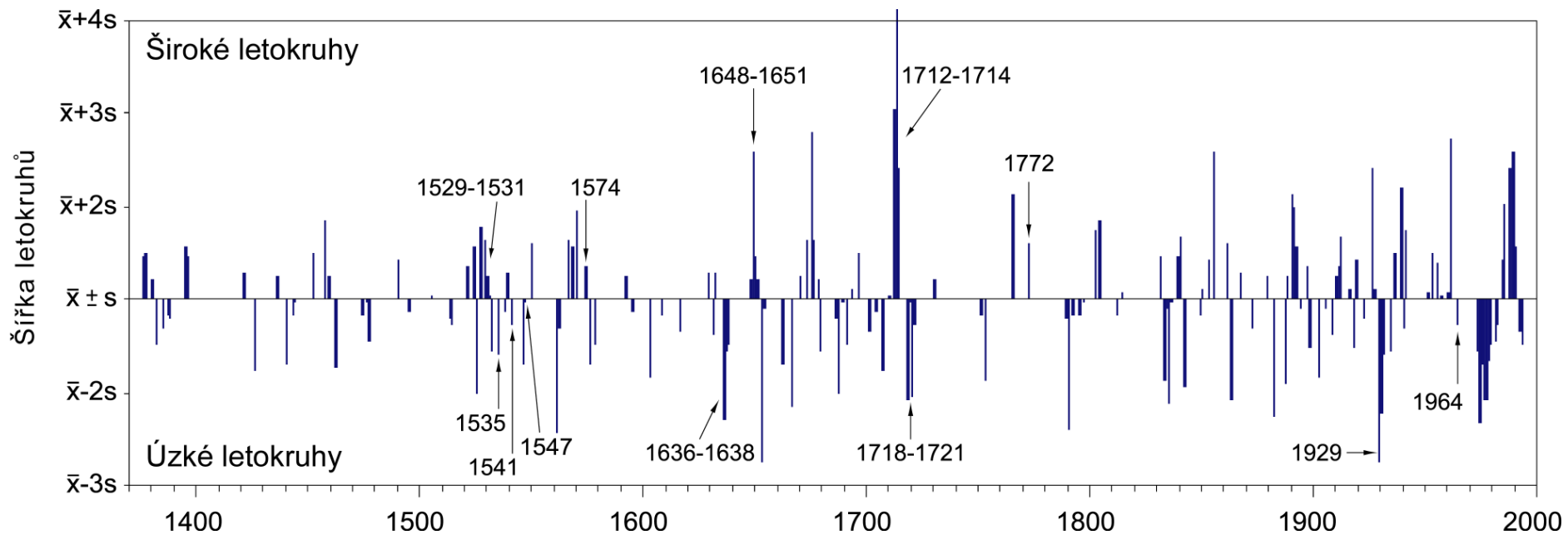
Řada srážkových úhrnů března-července na jižní Moravě v období 1376–1996 rekonstruovaných na základě dendrochronologie jedle



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.

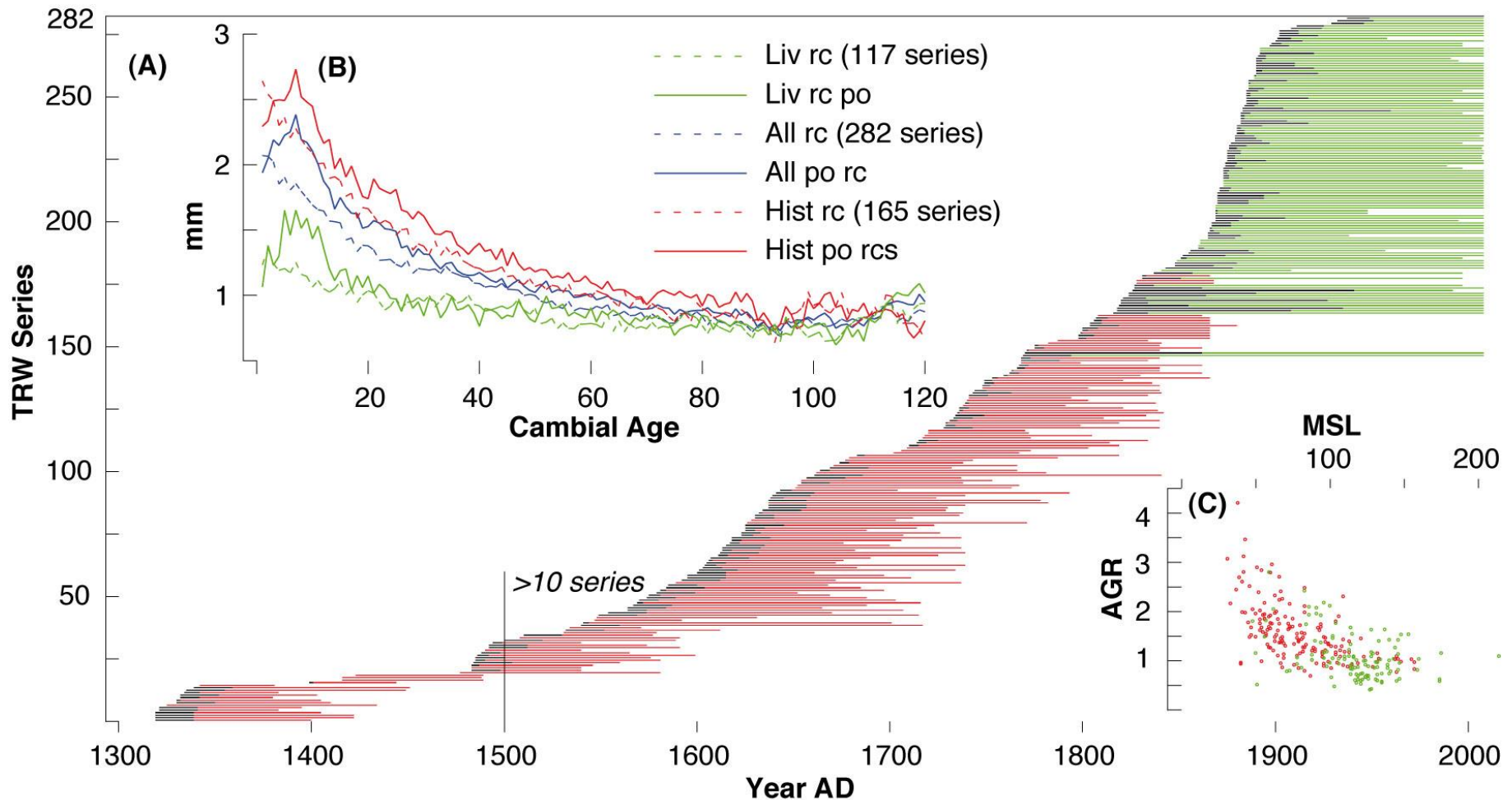
Využití letokruhových chronologií k analýze meteorologických extrémů

Jedle – jižní Morava – reakce na srážky



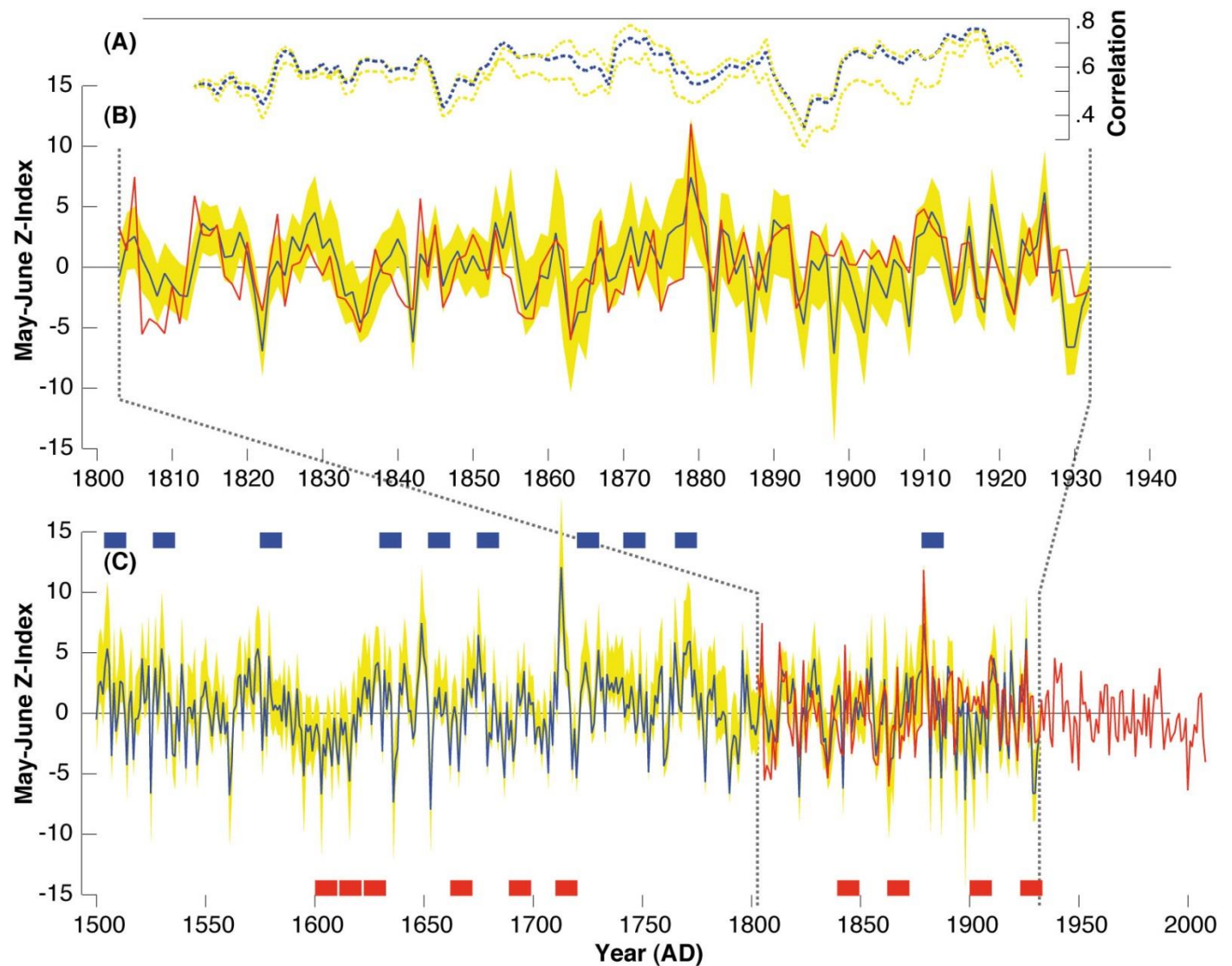
- široké letokruhy – vlhká období
- úzké letokruhy – suchá období, extrémní mrazy, kalamity (škůdci)
- většina extrémů v před-instrumentálním období doložena dokumentárními údaji

Tree-ring width series from Southern Moravia



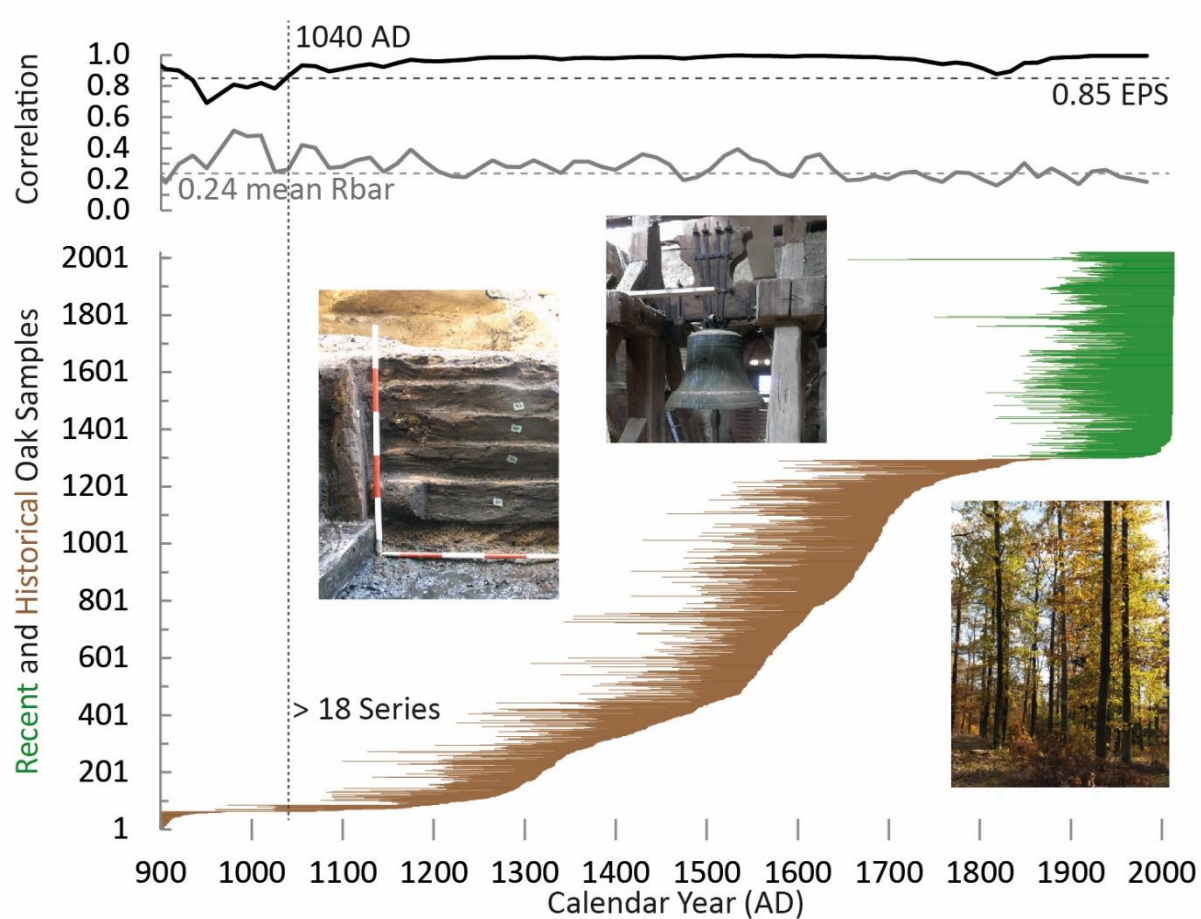
(A) Temporal distribution of the 117 living (Liv; green) and 165 historic (Hist; red) TRW series, and their corresponding pith-offset (po; grey); **(B)** Regional Curves (RCs) of the data mean (All; 282 series) and the subsets (Liv and Hist) with and without considering pith-offset (po); **(C)** Relationship between mean segment length (MSL) and average growth rate (AGR) classified into living and historic data. MSL and AGR of all 282 series is 95 yr and 1.37 mm (living trees: 116 yr and 1.08 mm; historic trees: 79 yr and 1.57 mm) (Buentgen et al., 2011)

MJ Z-index reconstruction

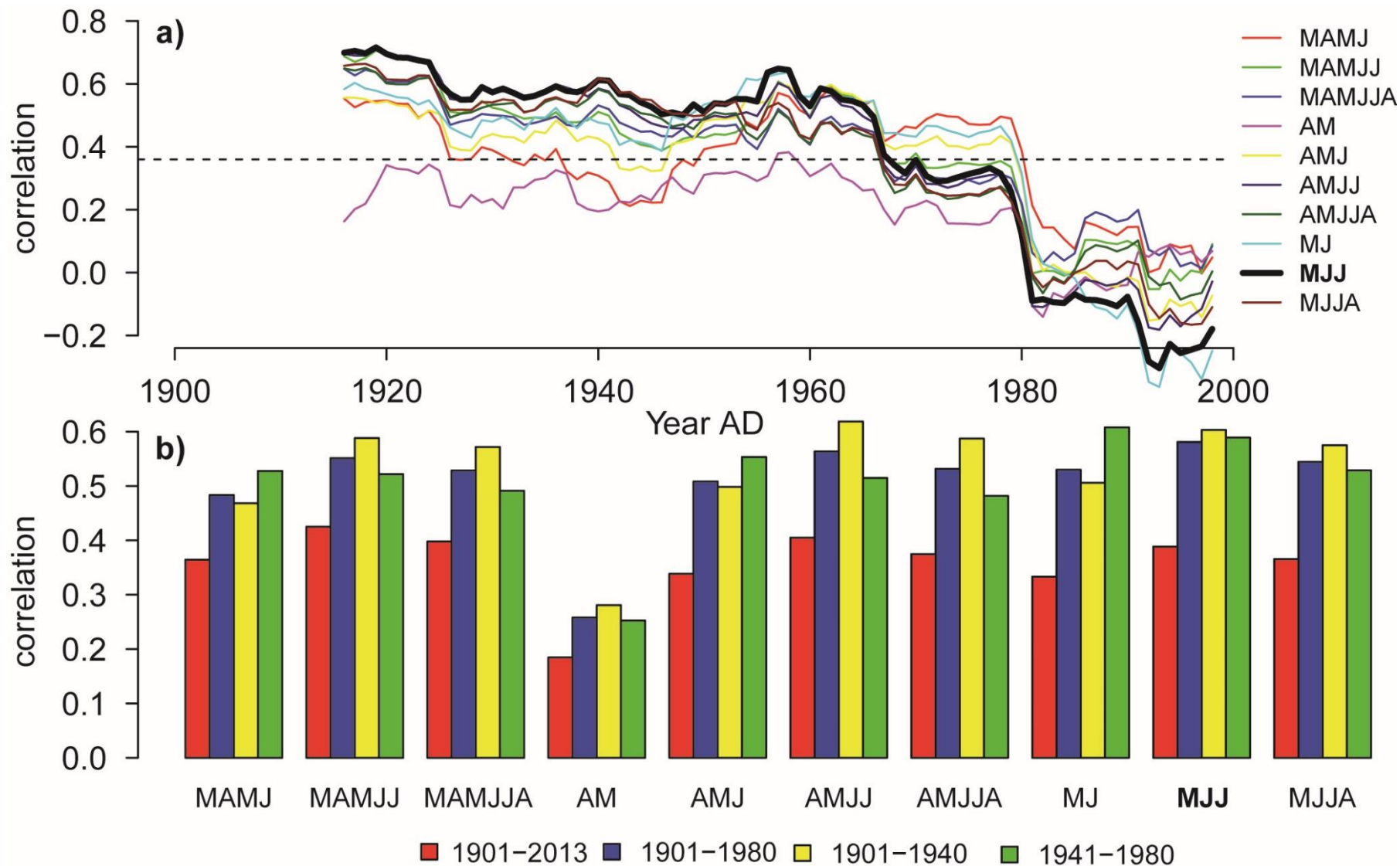


(A) 21yr moving correlation coefficients between the min/max (yellow) and mean (blue) TRW chronologies and the Brno May-June Z-index computed over the 1803–1932 calibration period. **(B)** Modeled (blue) and measured (red) Z-index within its estimated uncertainty range. **(C)** The full 1500–2008 period of the calculated and reconstructed Z-index with the boxes referring to ten wettest and ten driest decades

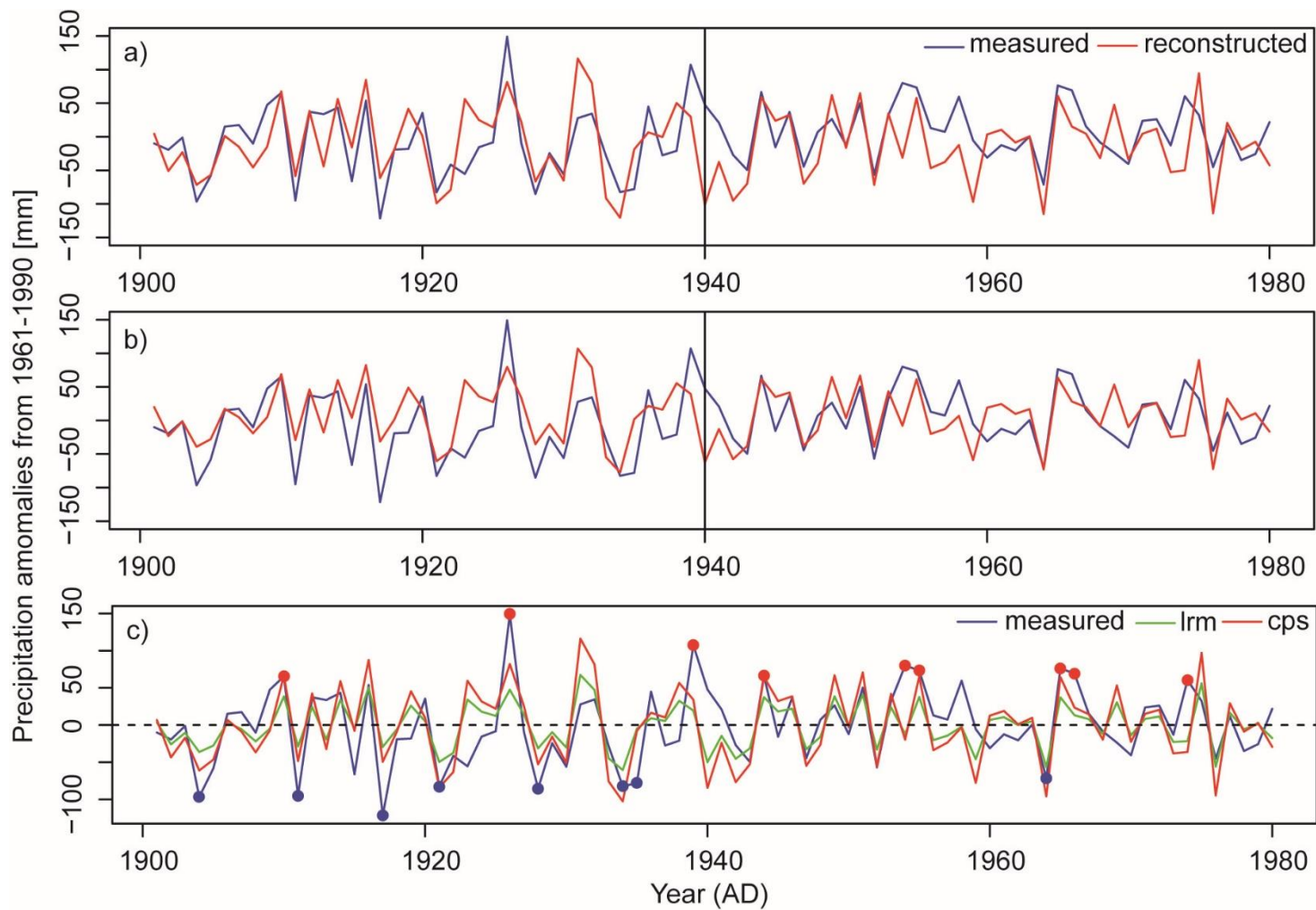
Precipitation reconstruction based on oak TRWs (Dobrovolný et al.)



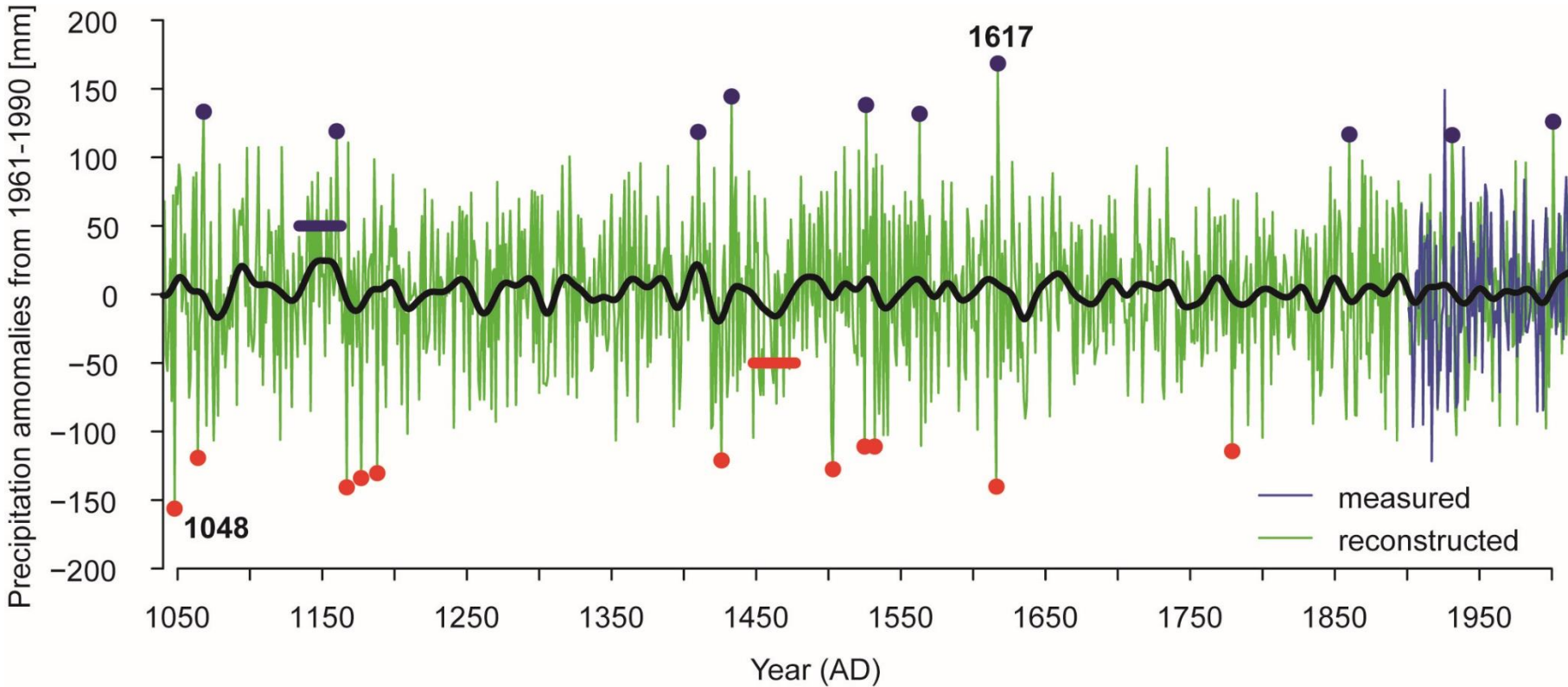
Dubová (*Quercus* sp.) chronologie pro Čechy



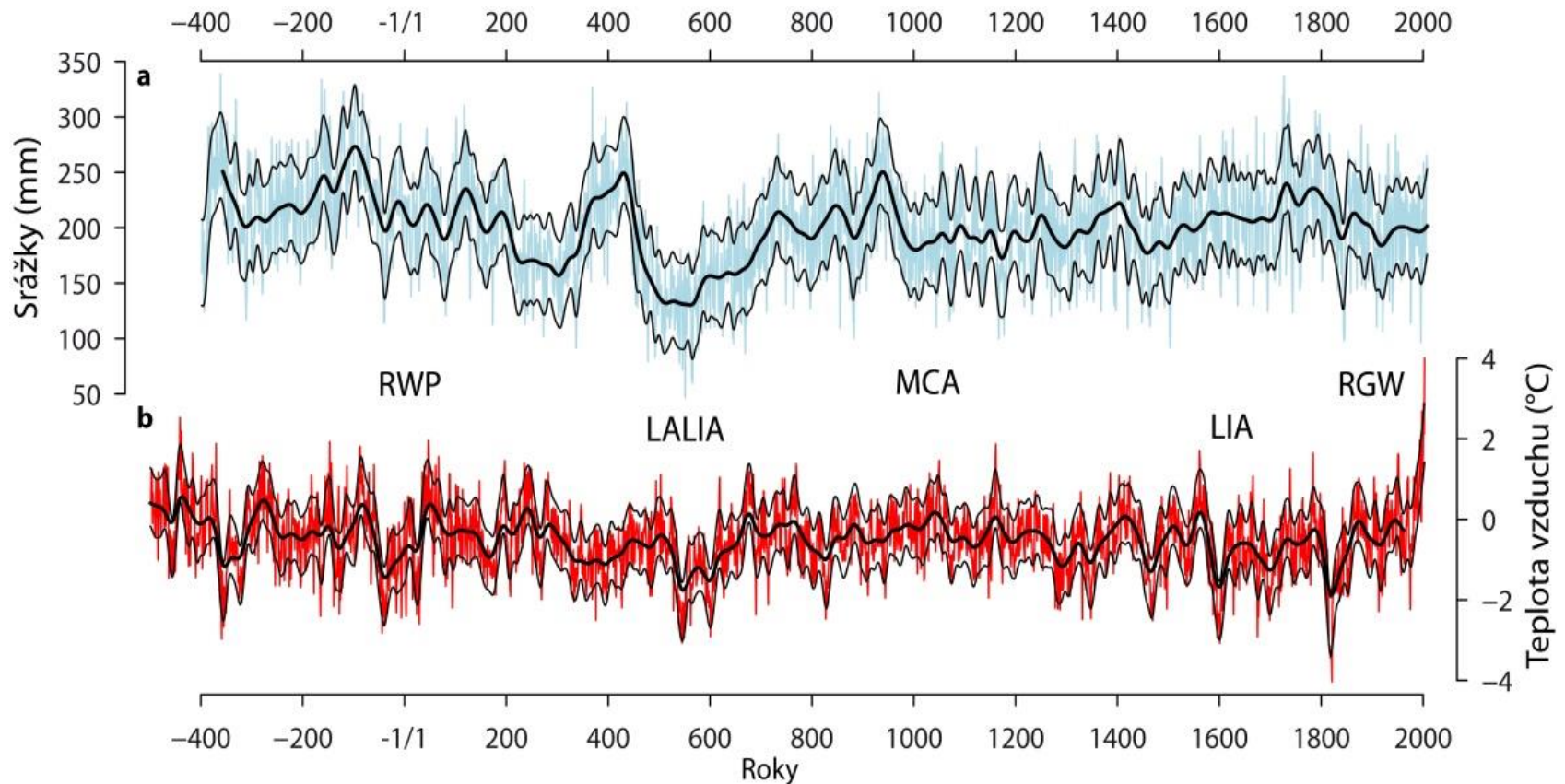
Running correlations (31-year window) between oak TRW indices and precipitation totals for different combination of months in the 1901–2013 period; horizontal line denotes significant correlations ($p < 0.05$) (a) and Pearson correlations between oak TRW indices and precipitation totals for different seasons and periods in Bohemia (b)



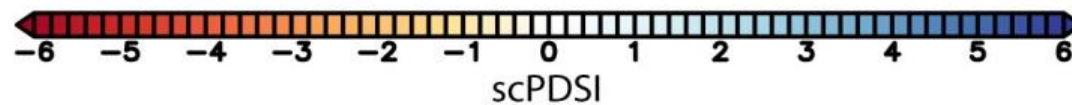
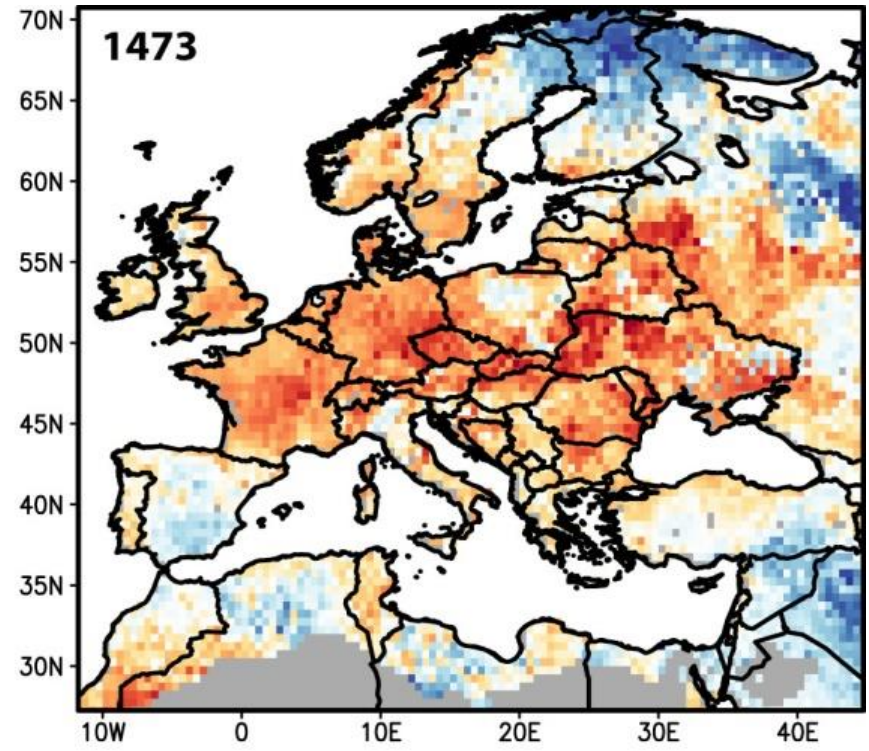
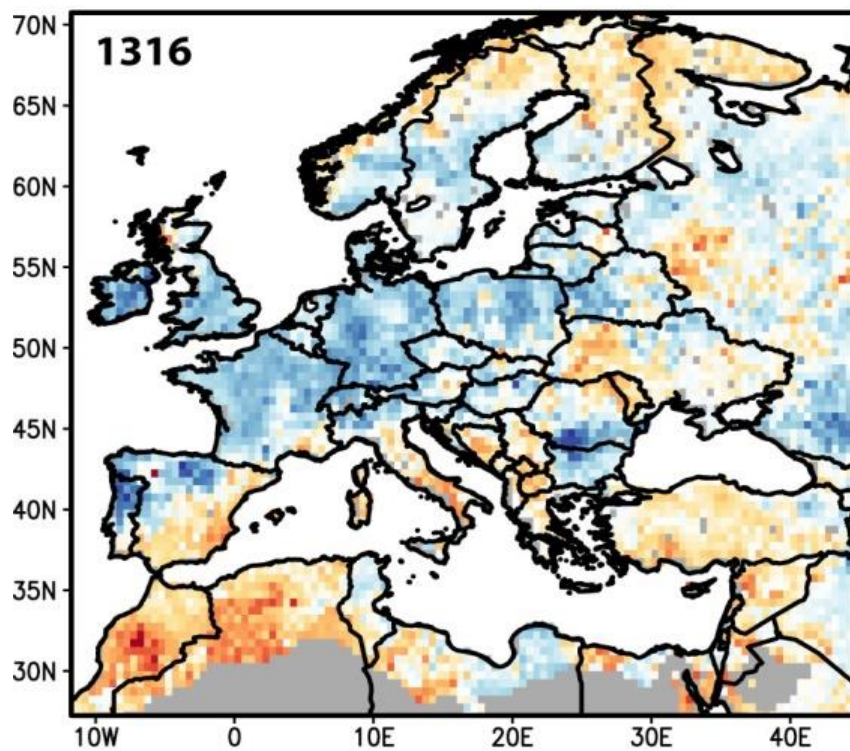
Measured (blue) and reconstructed (red) May–July precipitation anomalies with respect to 1961–1990 reference period for (a) early calibration (1901–1940) / late verification (1941–1980) and (b) late calibration (1941–1980) / early verification (1901–1940) in Bohemia; reconstructed values from regression were re-scaled to measured precipitation totals; (c) comparison of measured values with those reconstructed by linear regression method (lrm) and variance scaling (cps) – explained variability: 34%



Reconstructed (1040–2013, green) and measured (1901–2013, blue) May–July precipitation totals for Bohemia smoothed by Gaussian filter for 30 years (black). Horizontal bars indicate occurrence of 30-year periods with the lowest (1448–1477, red) and the highest (1134–1163, blue) precipitation; red (blue) points show 11 absolutely lowest and 10 absolutely highest values (problem of shifts in extreme values – 1617 versus 1616)



Kolísání úhrnů srážek dubna až června (398 př. n. l.–2008) (a) a průměrných teplot vzduchu června až srpna (499 př. n. l.–2003) (b) rekonstruovaných na základě šířek letokruhů ze střední Evropy (Büntgen et al., 2011). Teploty jsou vyjádřeny v podobě odchylek od referenčního období 1901–2000. Roční hodnoty jsou doplněny hodnotami shlazenými nízkofrekvenčním filtrem (silná černá čára) a shlazenými odhady nejistot (tenká černá čára). RWP – Roman Warm Period, LALIA – Late Antique Little Ice Age



Na letokruhových řadách je založen Old World Drought Atlas (OWDA – Cook et al., Sci. Adv., 2015), který prezentuje gridové hodnoty samostatně kalibrovaného Palmerova indexu intenzity sucha (PDSI) pro léto – viz <http://drought.memphis.edu/OWDA>
 Příklad: vlhké léto roku 1316 a suché léto roku 1473 v Evropě

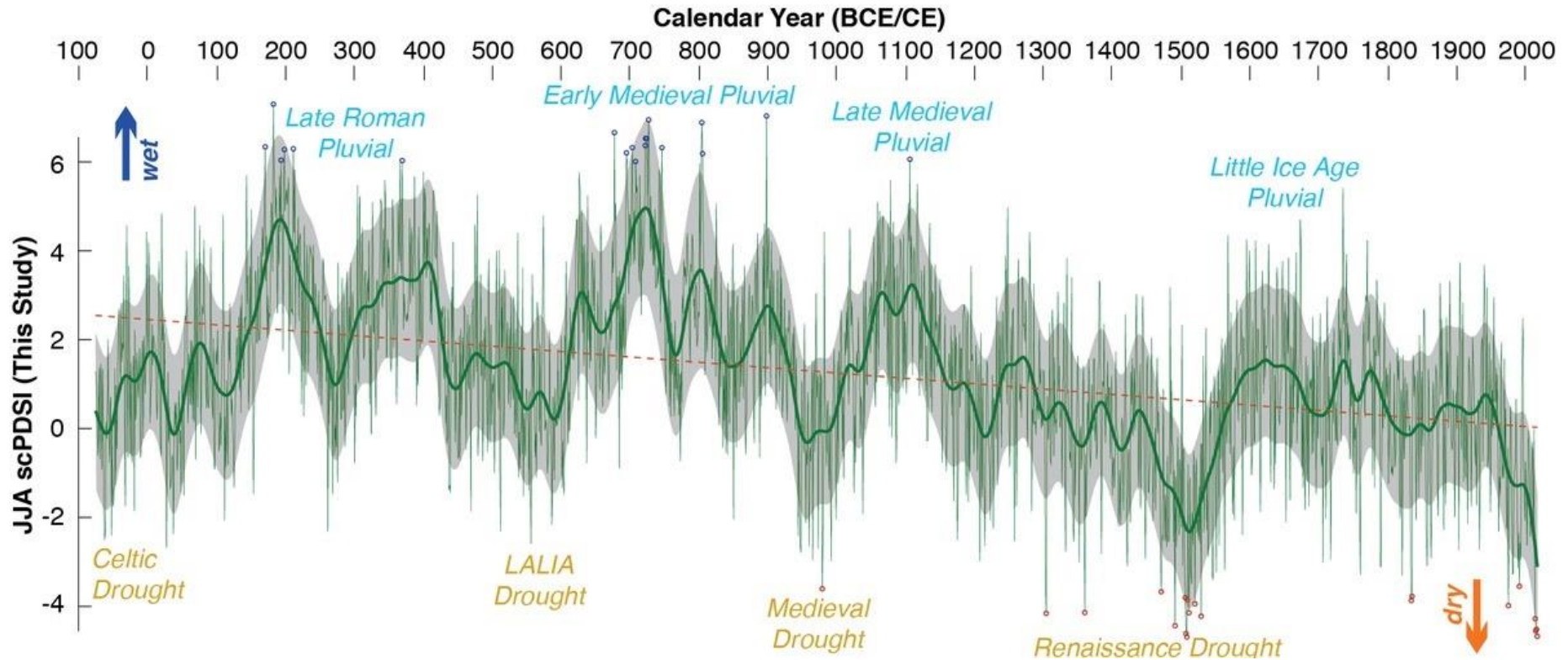
Využití stabilních izotopů v dendrochronologii

Izotop

- varianta téhož prvku (kyslíku) s odlišným počtem neutronů (hmotové číslo) a vždy stejným počtem protonů (atomové číslo) → změny v relativní atomové hmotnosti a fyzikálních vlastnostech jsou základem pro dendroklimatickou rekonstrukci/interpretaci
- v dendroklimatologii se využívá nejčastěji izotopů kyslíku (^{16}O , ^{17}O a ^{18}O), vodíku (deuterium) a uhlíku (^{13}C)

Principy

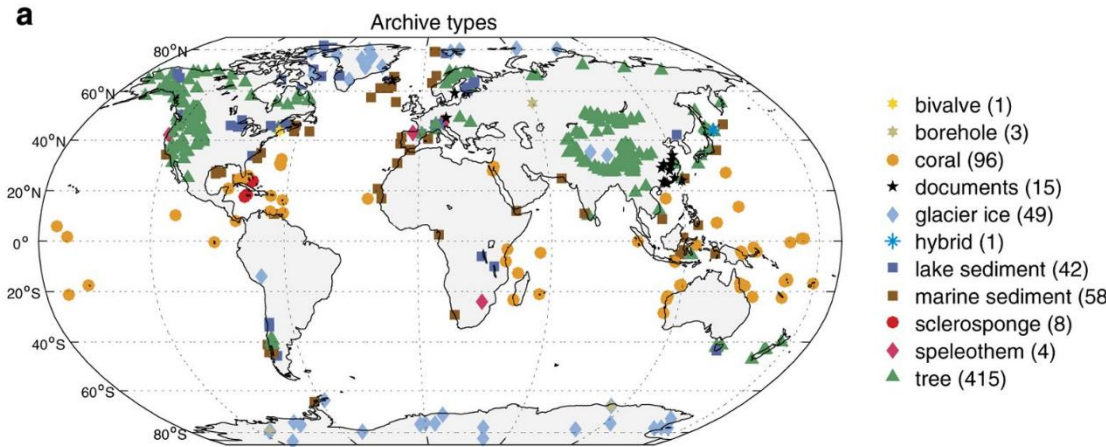
- relativní poměr izotopů kyslíku $\delta^{18}\text{O}$ ve vzorku (voda, led, organismus) → proxy pro teplotu a srážky
- vyšší teplota → více potenciální energie na výpar → těžší ^{18}O je snadněji transportovatelný do atmosféry → úbytek ^{18}O zvyšuje podíl ^{16}O (nižší $\delta^{18}\text{O}$ = vyšší teplota)
- nižší teplota → méně potenciální energie na výpar → snadněji transportovatelné jsou pouze lehčí ^{16}O → růst podílu $\delta^{18}\text{O}$ = nižší teplota



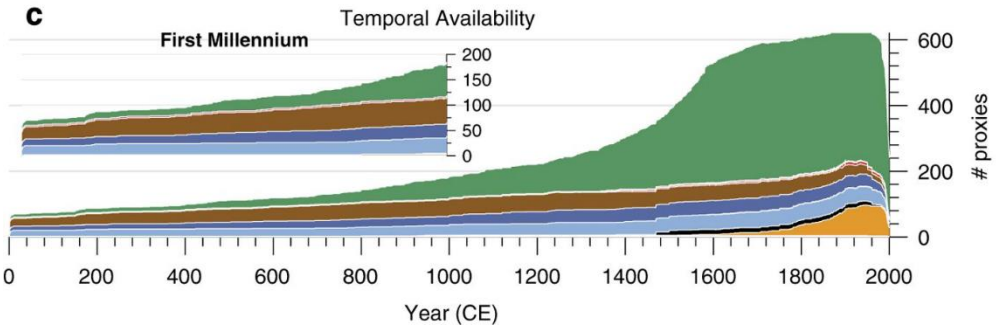
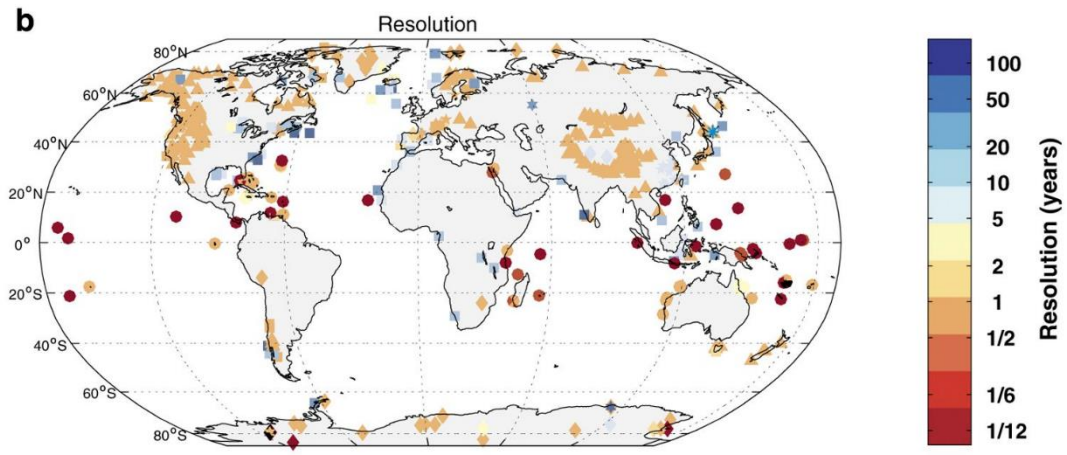
**Rekonstrukce letního scPDSI ze stabilních izotopů uhlíku ($\delta^{13}\text{C}$) a kyslíku ($\delta^{18}\text{O}$) v letokruzích z 21 živých a 126 reliktních dubů ve střední Evropě v období 75 př. n. l. – 2018 (Büntgen et al., Nature Geoscience, 2021).
Shlazeno 50-letým filtrem (stejně jako konfidenční meze)**

PAGES2k Consortium. A global multiproxy database for temperature reconstructions of the Common Era. Scientific Data 4, 170088.

PAGES2k 2.0.0 (692 records from 648 sites)

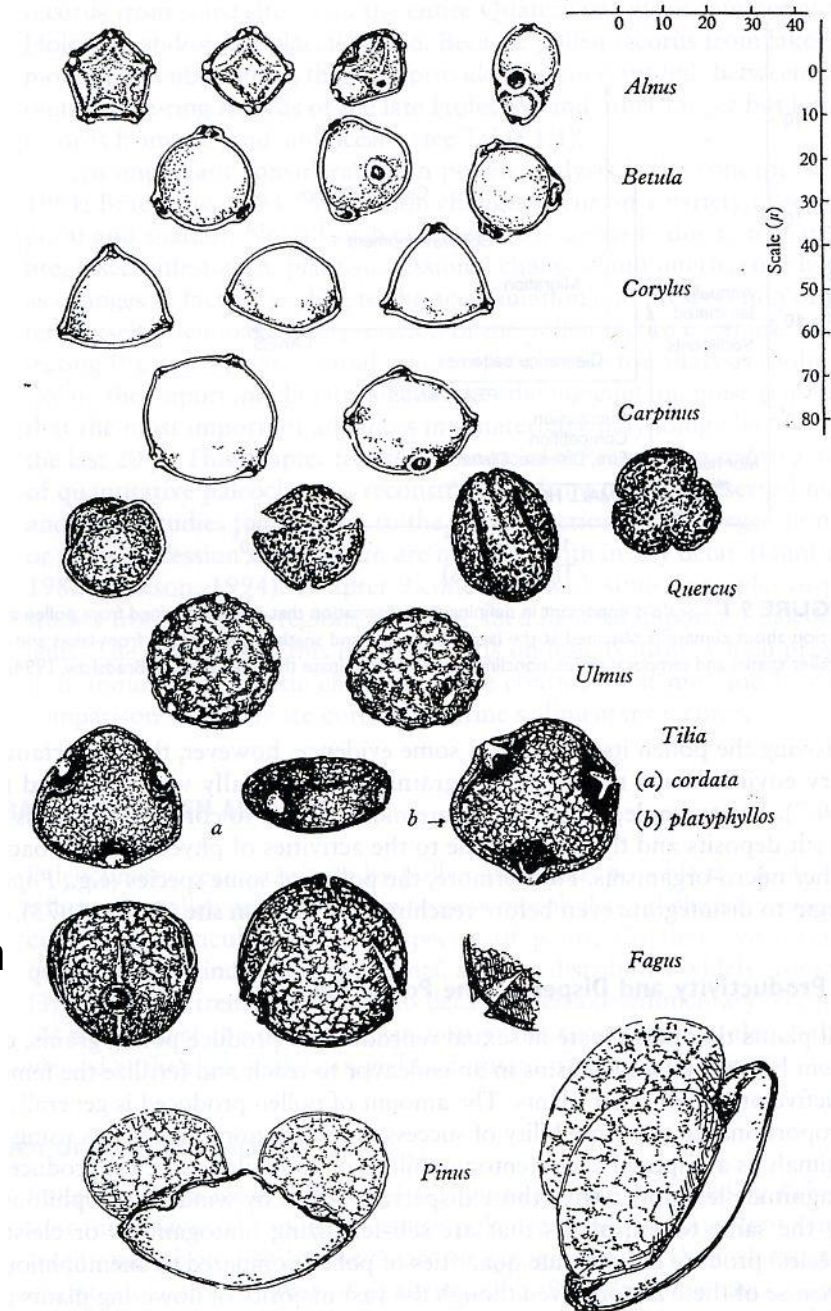


Kompilace teplotních rekonstrukcí pro období našeho letopočtu na základě různých proxy dat

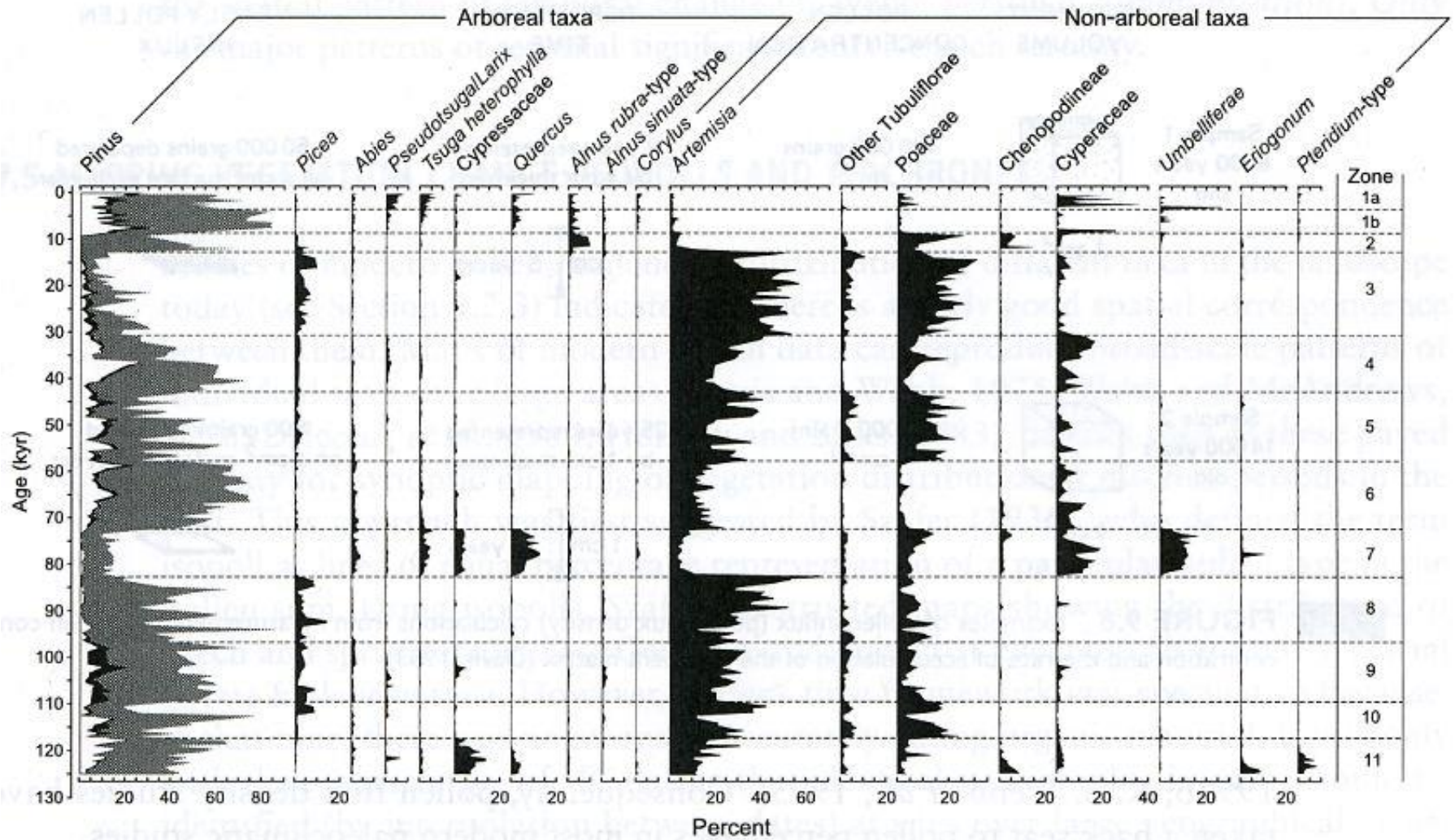


6.1.3 Pylová analýza

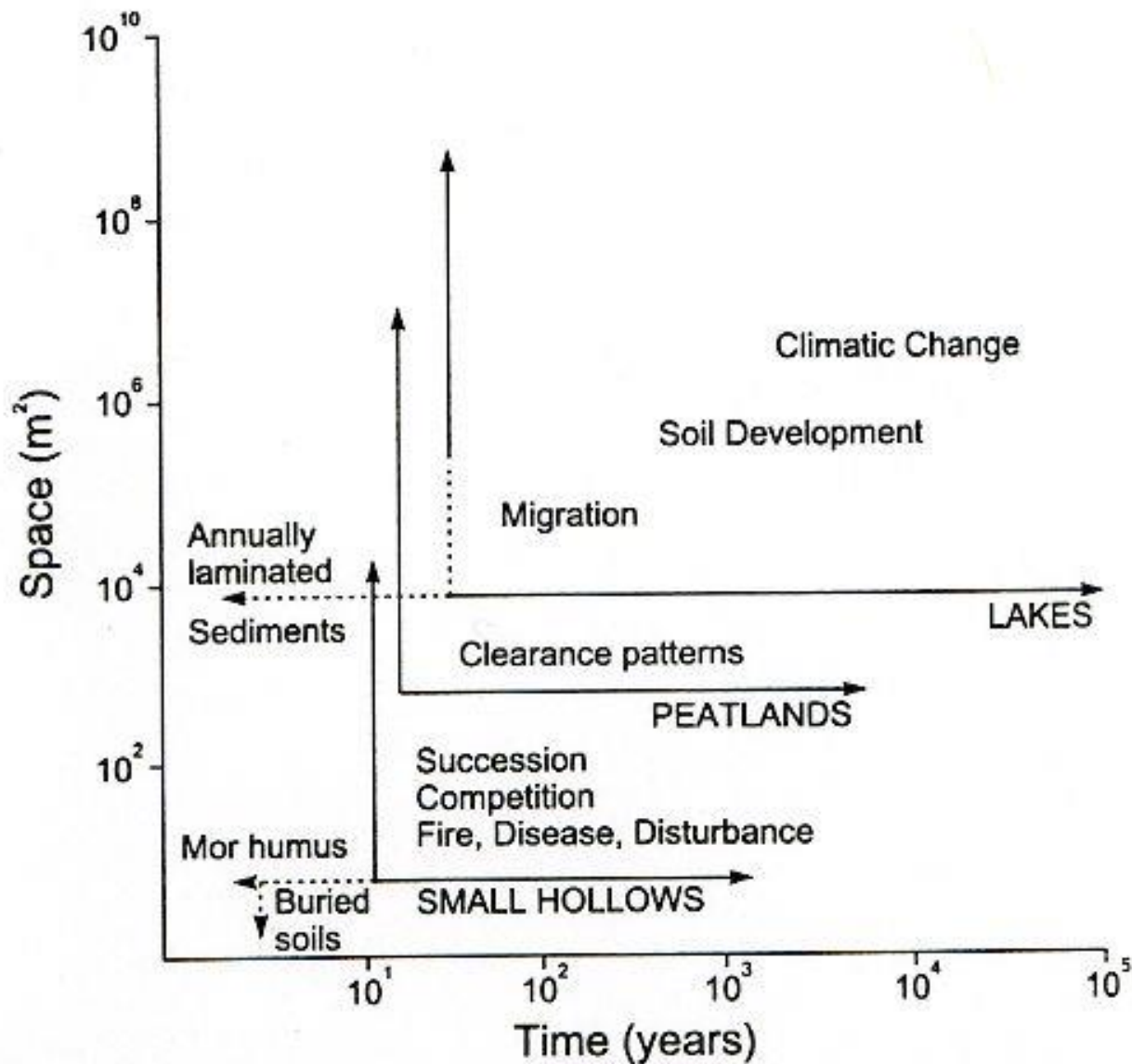
- **palynologie** – vědní disciplína studující pylová zrna a spory
- **pylová zrna** jsou uchovávána v jezerech, rašeliništích, sedimentech
- vlastnosti pylových zrn:
 - morfologické charakteristiky jsou specifické pro rody a druhy rostlin
 - jsou produkovány ve velkém množství a široce rozšiřovány
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



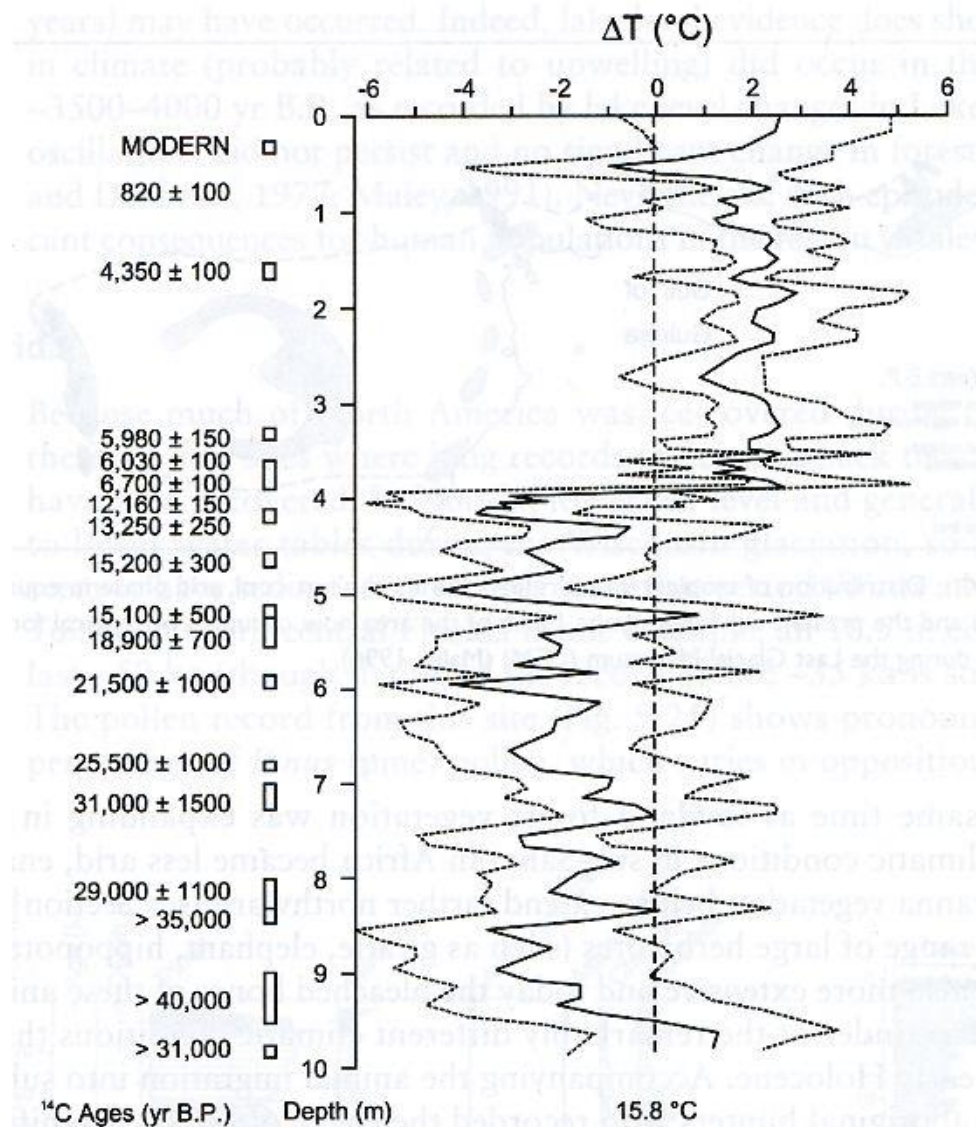
- procentuální zastoupení jednotlivých druhů pylových zrn se vyjadřuje **pylovým diagramem**



Carp Lake, Oregon – 125 000 let



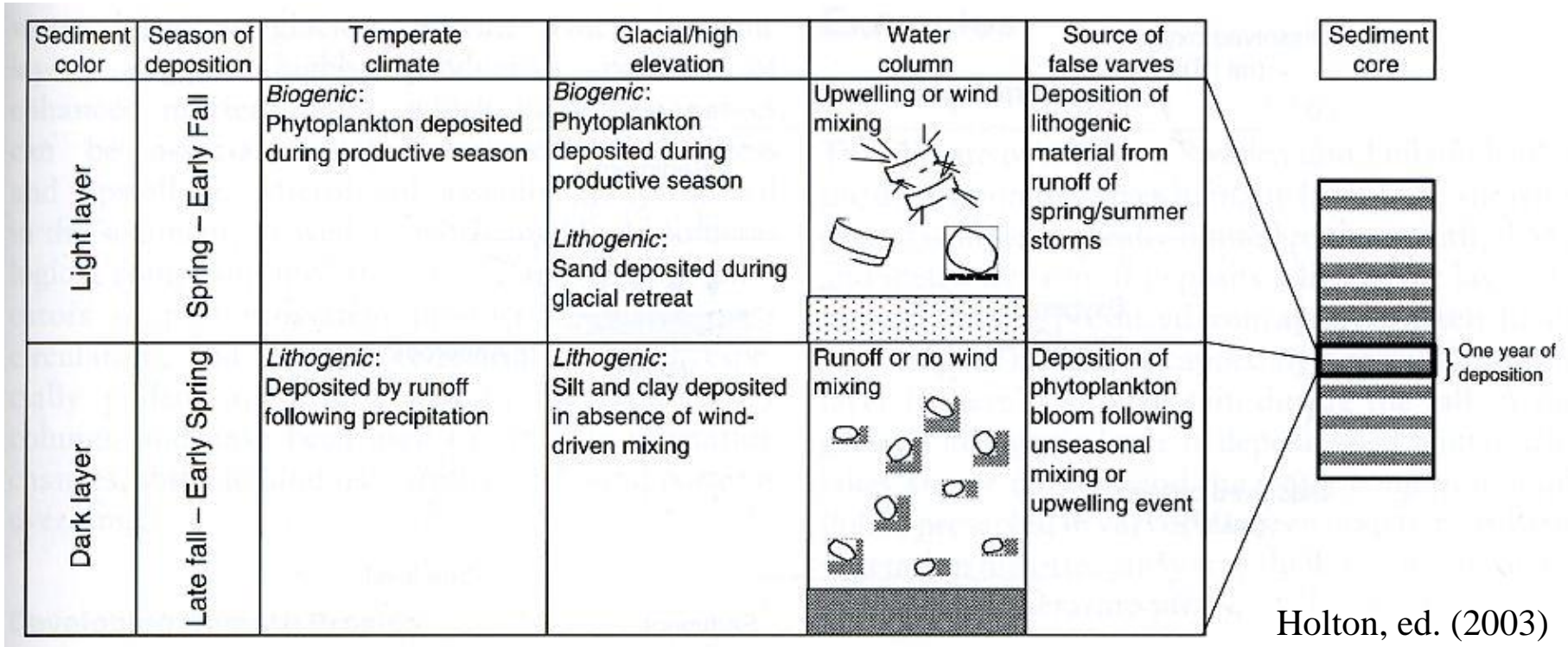
Změny vegetace probíhají v různých měřítcích, přičemž v menším prostorovém a časovém měřítku se jedná o neklimatologické faktory (požáry, škůdci, sukcese, vliv člověka aj.).



Roční teplotní anomálie (referenční současná teplota 15,8 °C) rekonstruované na základě pylové analýzy z rašeliniště v Kashiru v Burundi ve východní Africe (výška 2240 m ve vysokohorském mlžném lese) (tečkovaně – meze spolehlivosti) (Bradley, 1999)

6.1.4 Varvy

- laminované (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).

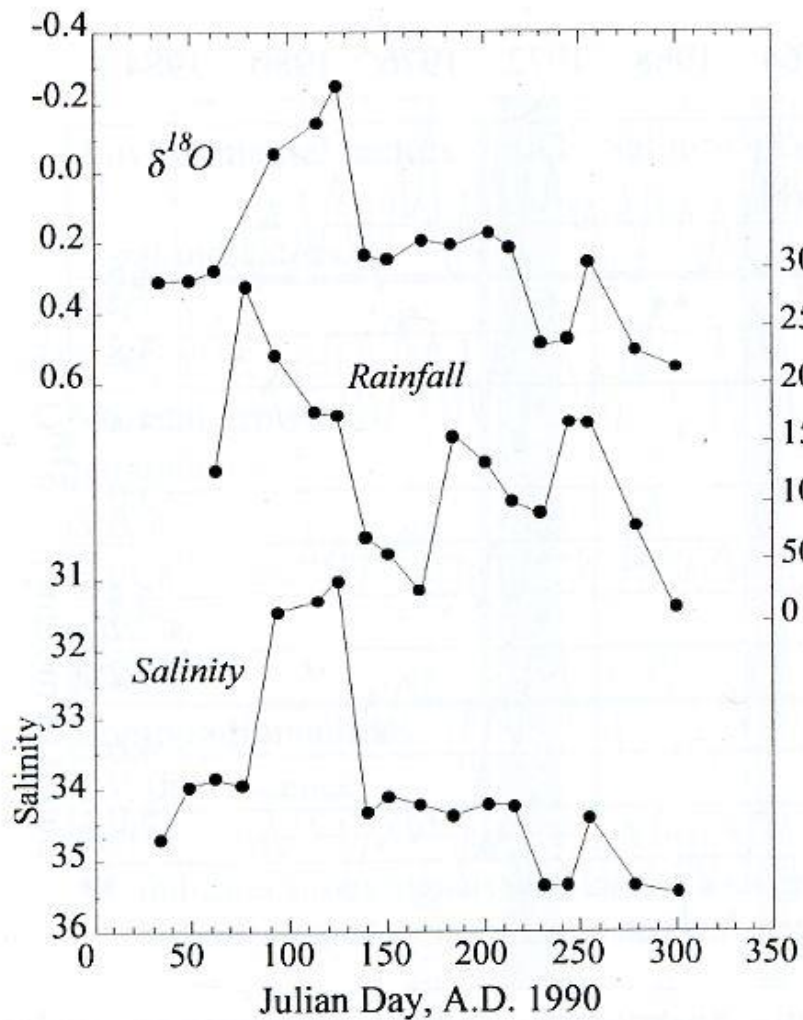
6.1.5 Korály

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

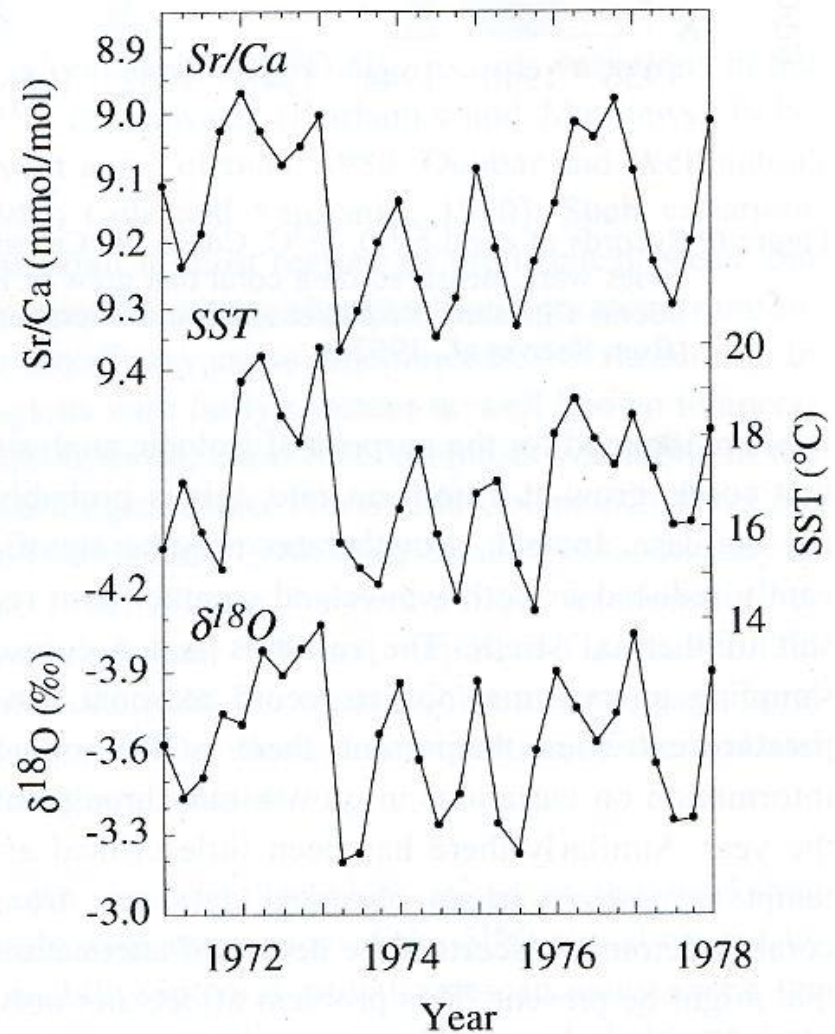
Měřené chemické ukazatele obražejí parametry prostředí v době růstu: povrchové teploty oceánů (SST), salinita, srážky, vertikální promíchávání, říční přítok, výživnost vody, původ vodních mas, antropogenní vlivy aj.

367-letý korálový skelet z Galapág





Březen-listopad 1990, Tarawa atol



Čtvrtletí - Galapágy

Dunbar, R. B., Cole, J. E. (1993): Coral Records of Ocean-Atmosphere Variability. NOAA Climate and Global Change Program, Special Report No. 10, 38 s.

Bělení korálů

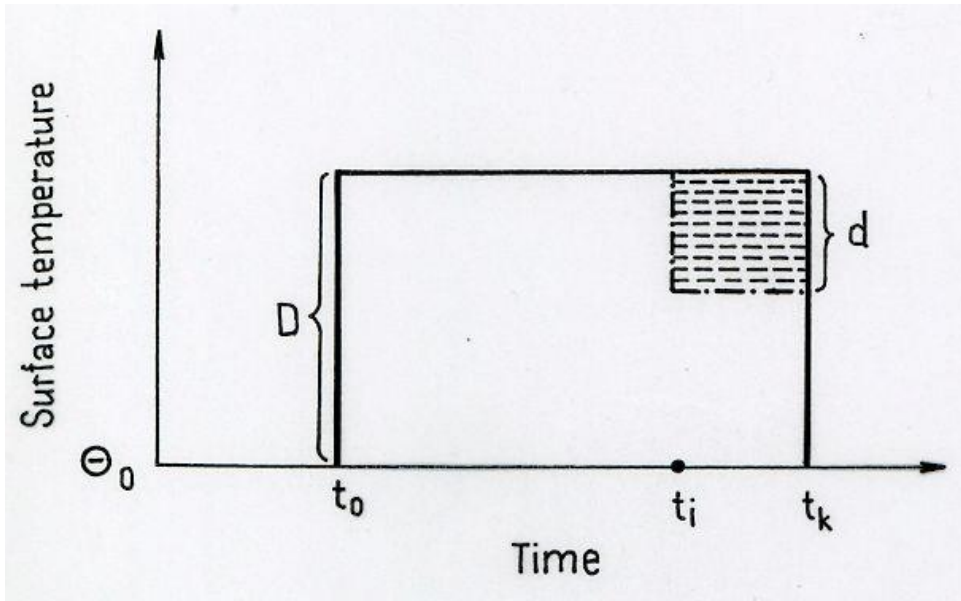
I když se mohou korály živit planktonem, většinu jejich potravy jim obstarávají symbiotické řasy, zooxantely. Proto korály většinou rostou v slunných mořích (do 60 m), aby zajistili dostatek světla pro řasy. Někdy je však možné najít zvláštní korály bez endosymbiontů i v hloubce 3 000 m a dokonce i na arktických Aleutách. Korály s endosymbionty označujeme jako hermatypické, bez nich jako ahermatypické. Ahermatypičtí koráli se musí uživit samostatně, mohou ale pronikat do jiných míst než hermatypičtí.

Symbionty korálů jsou obrněnky, které mohou tvořit až tři čtvrtiny biomasy korálu. Od svého endosymbionta získávají koráli až 90 % organických látek, díky čemuž se mohou bohatá korálová společenstva tvořit i v živinami chudých tropických vodách.

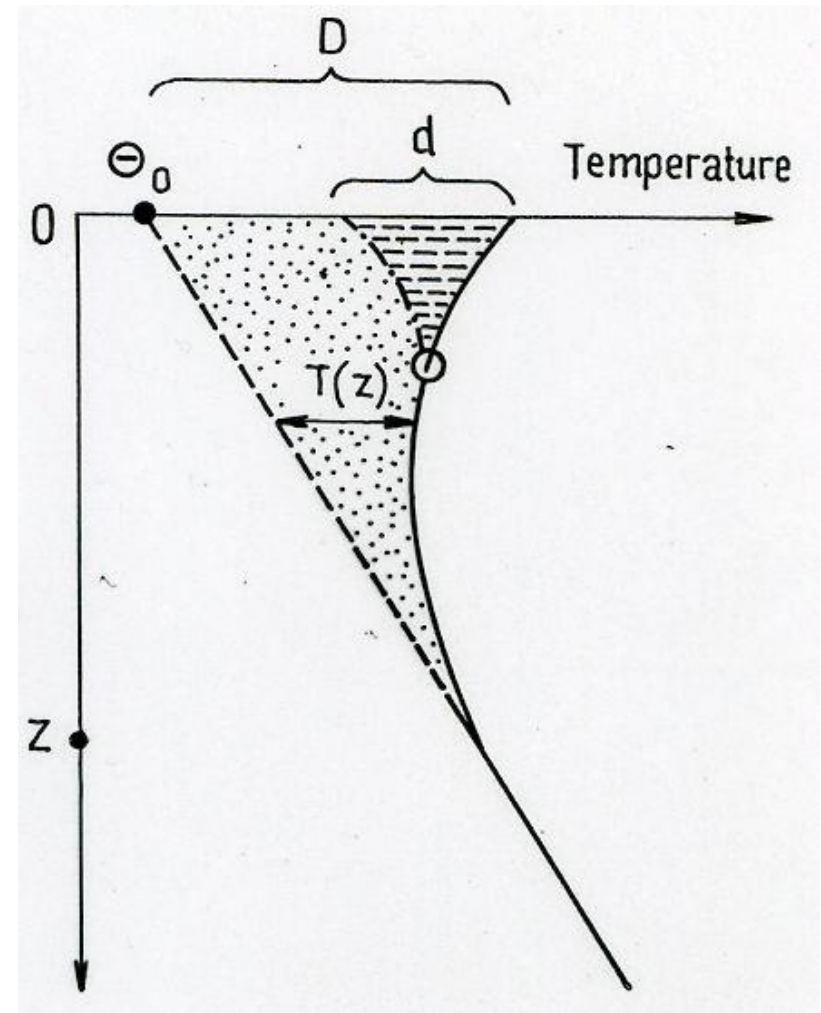
Odumírání obrněnek je příčinou jevu známého jako **bělení korálů**, které se projevuje zbělením korálu. Korál bez endosymbiontů je výrazně oslaben, neroste a hrozí nebezpečí jeho úhynu, což má za následek destrukci celého útesu. Obrněnky odumírají nejčastěji z důvodu zvýšení teploty vody, znečištění či infekce patogenem.

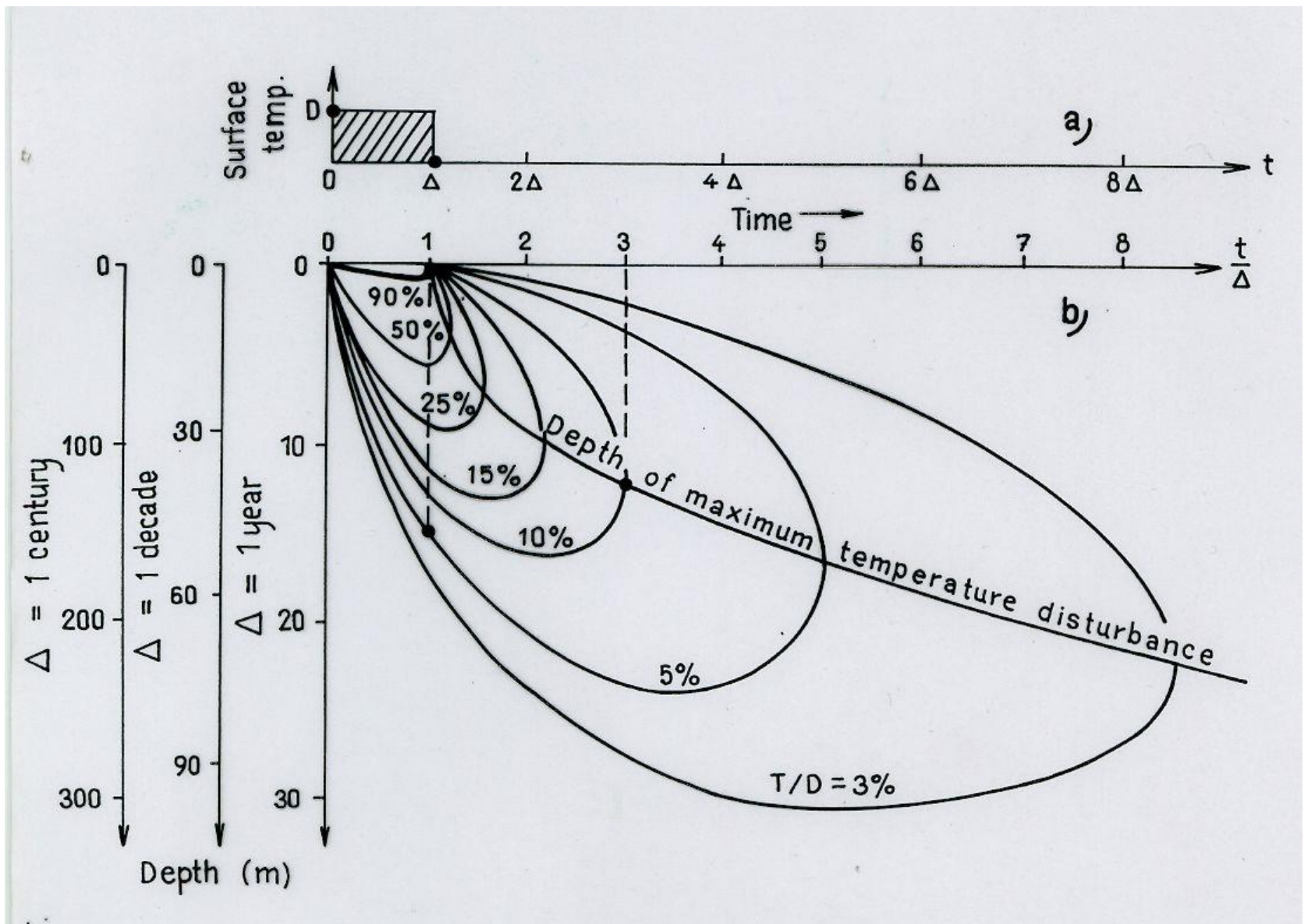
Pozoruje se např. úhyn korálů v oblasti Velkého korálového (též bariérového) útesu podél severovýchodního pobřeží Austrálie v délce c. 1500 km.

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.





Zeslabení teplotního signálu o velikosti D působícího po dobu Δ s rostoucí hloubkou v podloží aktivního povrchu

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

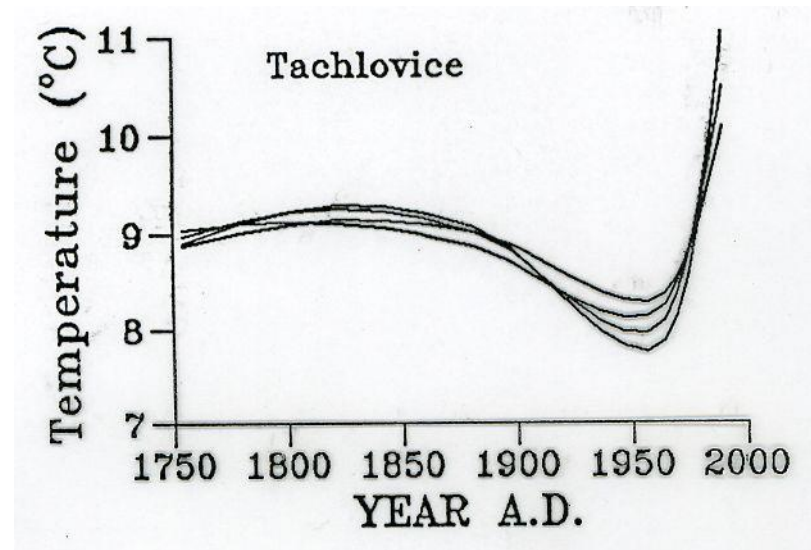
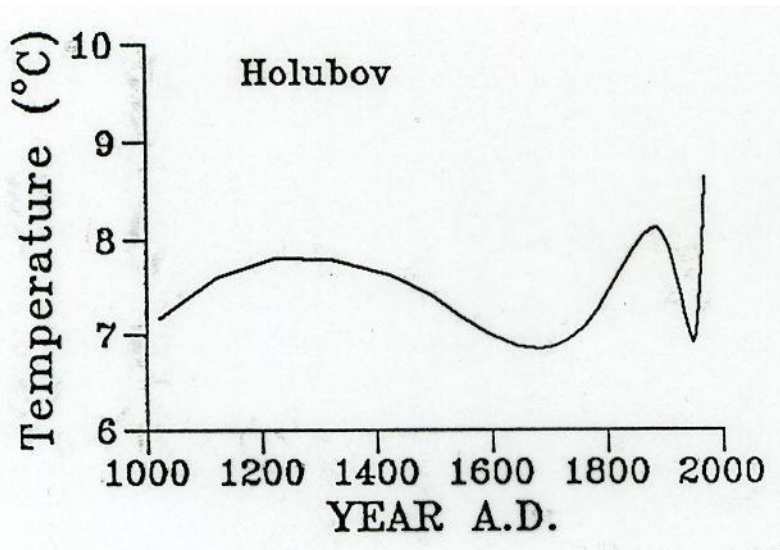
Výhody:

- 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

Příklady teplotních rekonstrukcí v ČR



Využití geotermických vrtů ve světovém měřítku – teplotní rekonstrukce

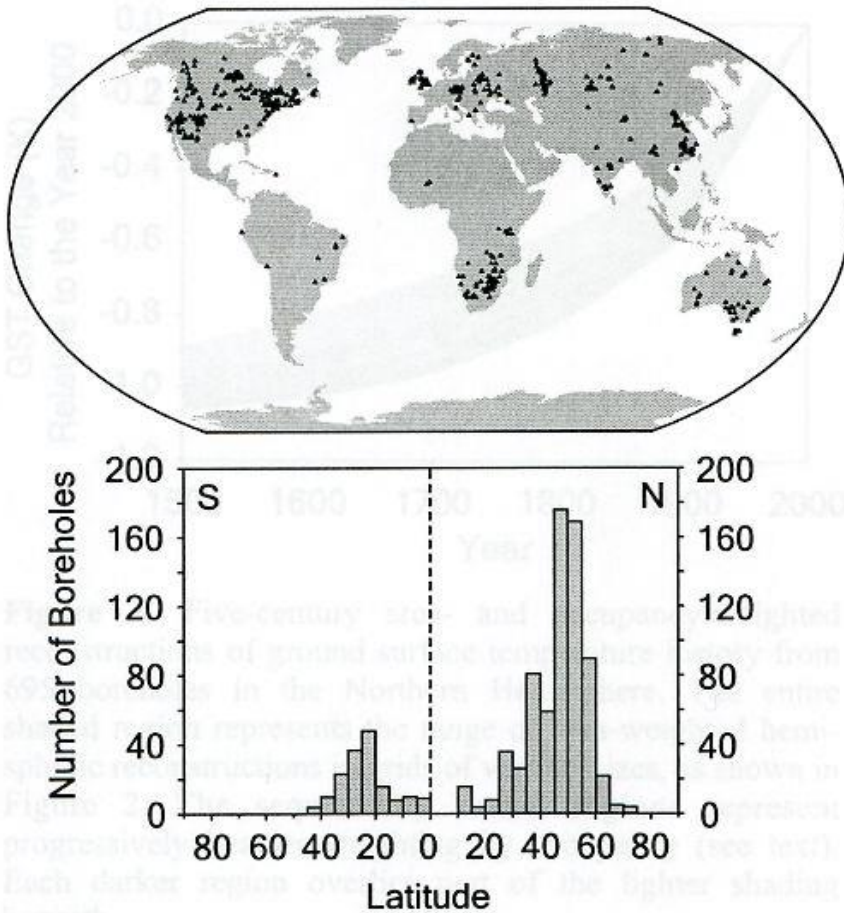


Figure 1. Locations of boreholes in the global database, with histogram of latitudinal distribution (modified after *Harris and Chapman [2001]* to reflect the current status of the database).

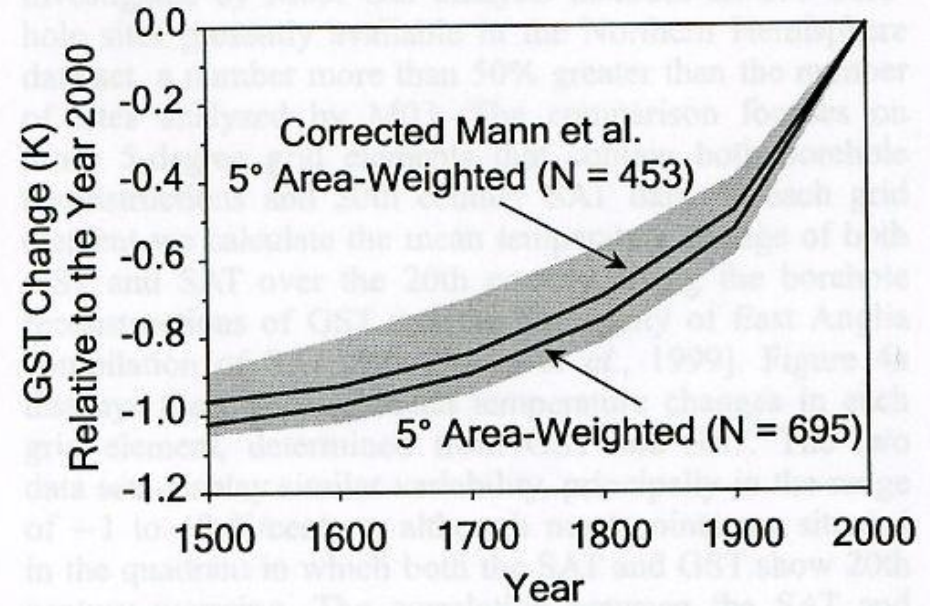


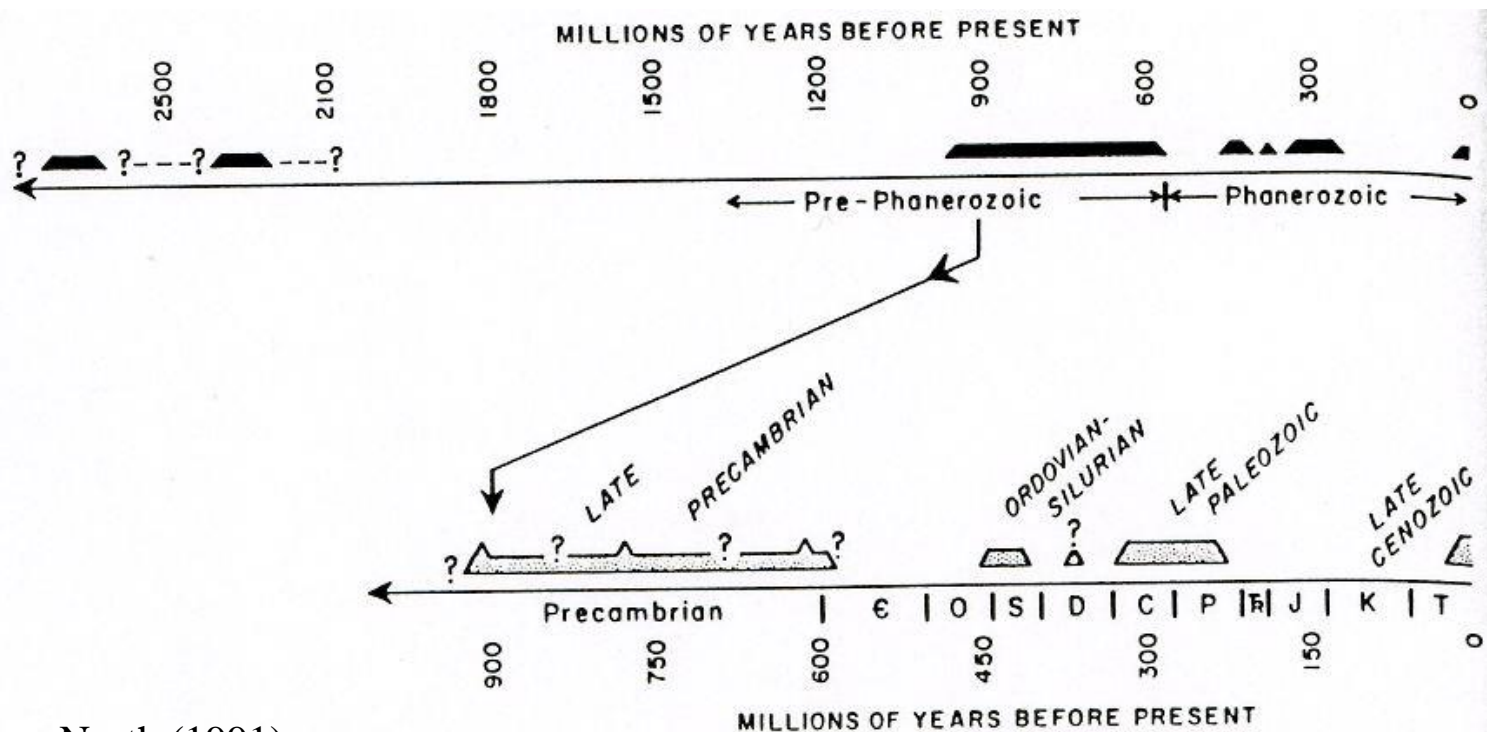
Figure 2. Five-century area-weighted reconstructions of ground surface temperature history from 695 boreholes in the Northern Hemisphere. Shaded area represents the range occupied by six hemispheric reconstructions in grids ranging in size from 5×5 to 90×90 degrees. The corrected 5-degree area-weighted reconstruction of *Mann et al. [2003a]* [*Rutherford and Mann, 2004*], and our 5-degree area-weighted reconstruction using a larger data set are superimposed.

6.2 Časová periodizace geologické minulosti Země

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

6.3 Principiální paleoklimatické poznatky

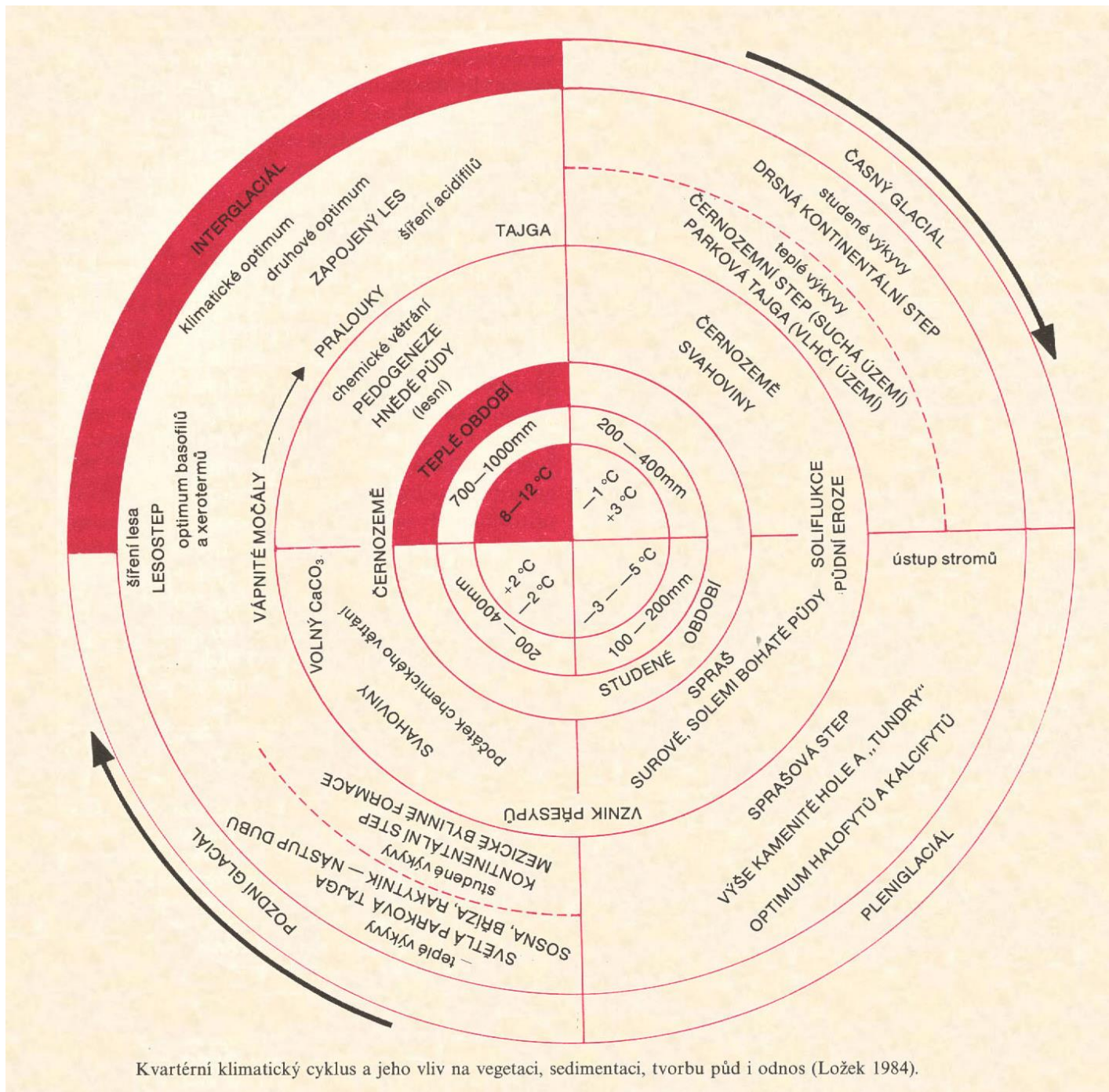
- **4,6 až ~2,5 Ga** (a – rok) – Země bez zalednění při nižší solární konstantě (Faint Sun Paradox – paradox mdlého slunce) – snížené záření kompenzováno zesíleným skleníkovým efektem
- **~2,5 Ga** – doklady pro první zalednění (dosažena mezní teplota pro vznik zalednění)



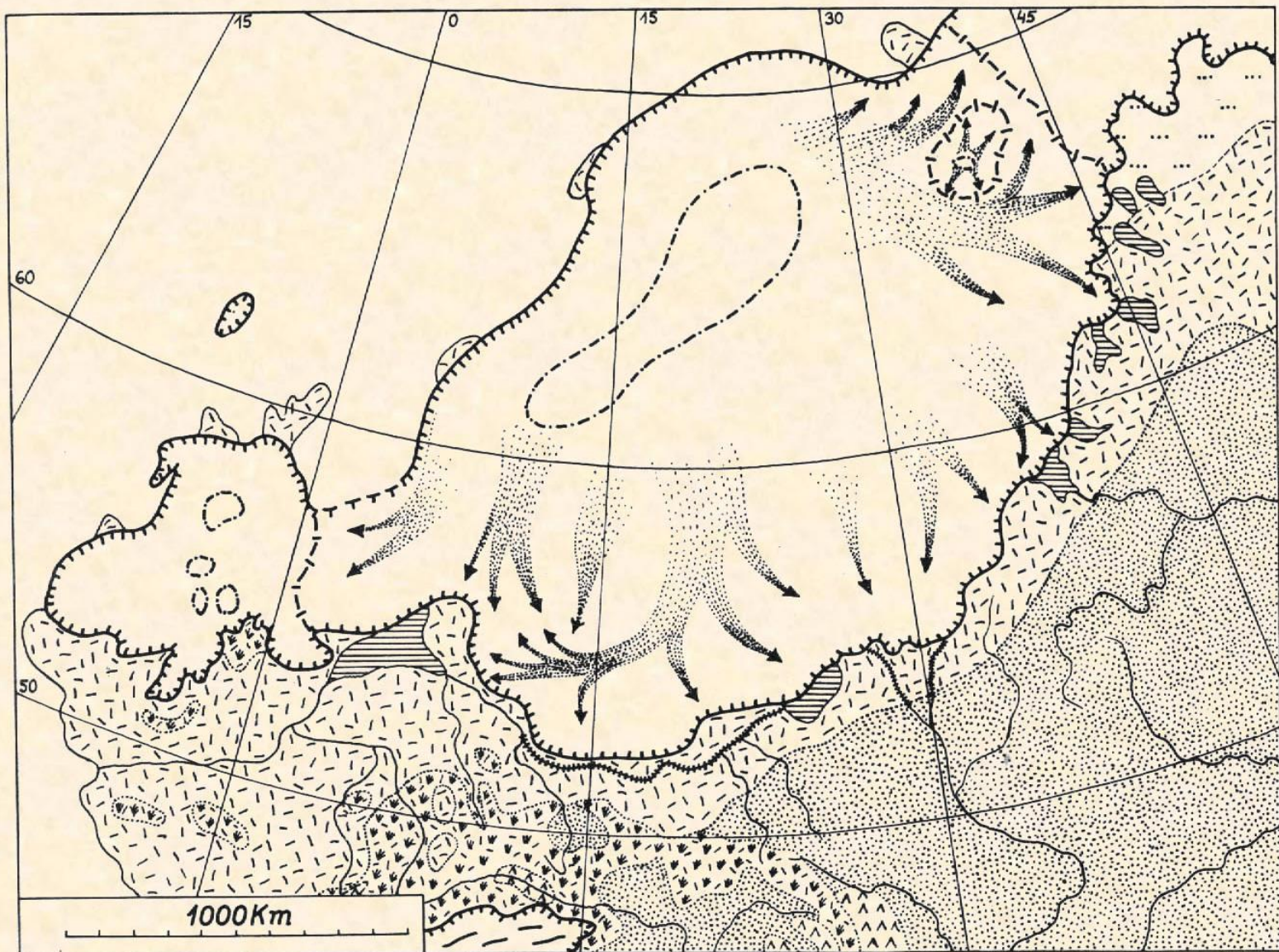
- **~2,5 až 0,9 Ga** – Země bez ledovců přes nízkou svítivost Slunce a slabší skleníkový efekt
- **0,9 až 0,6 Ga** – tři hlavní fáze zalednění (včetně ledu v nízkých šířkách)
- **600 až 100 Ma** – převážně mírné klima s dvěma fázemi růstu ledu – velká sezónní kolísání na superkontinentech (Gondwana, Pangea)
- **100 až 50 Ma** – mírné klima bez zalednění (změny v rozdělení pevnin-oceánů nemohou adekvátně vysvětlit vysoké polární teploty) – snad vysoké koncentrace CO₂
- **50 až ~3 Ma** – postupné ochlazování a vysušování Země – faktory: tektonika litosférických desek, CO₂ (snad dvojnásobek koncentrace mezi 50–3 Ma), oceánský transport tepla – menší vliv zdvihu Tibetu v Asii 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 (CO₂, CH₄); 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

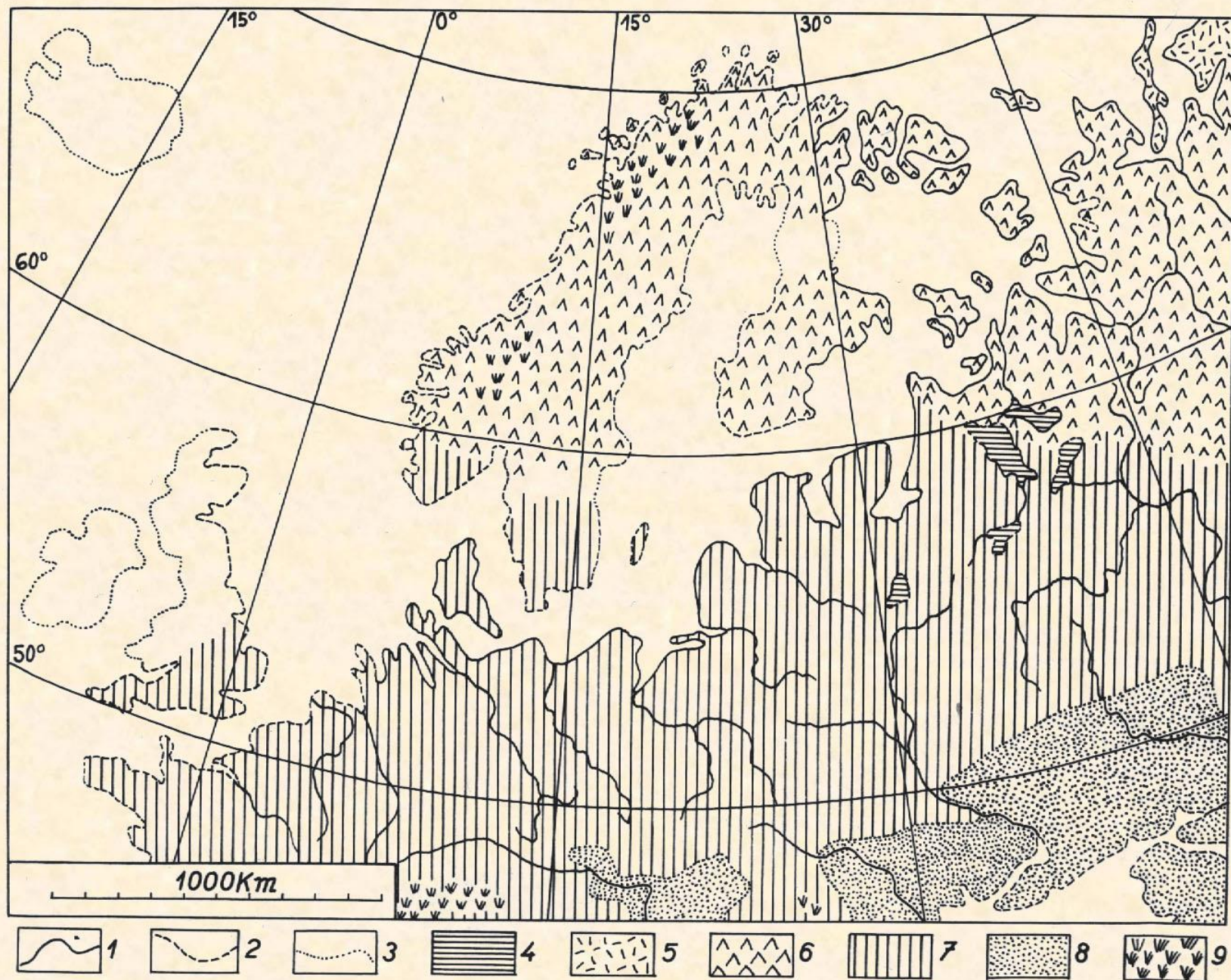
- posledních 2,588 miliónů let se dělí na holocén (cca 11-12 tisíc let před současností - BP) a pleistocén
- 15-20 kvartérních klimatických cyklů – střídání glaciálů a interglaciálů
- holocén – současný interglaciál, jsme na rozhraní jeho druhé a třetí třetiny, silně ovlivněn činností člověka (antropocén)
- periodizace holocénu – postglaciální klimatické optimum (6000–8000 let BP)



Kvartérní klimatický cyklus a jeho vliv na vegetaci, sedimentaci, tvorbu půd i odnos (Ložek 1984).

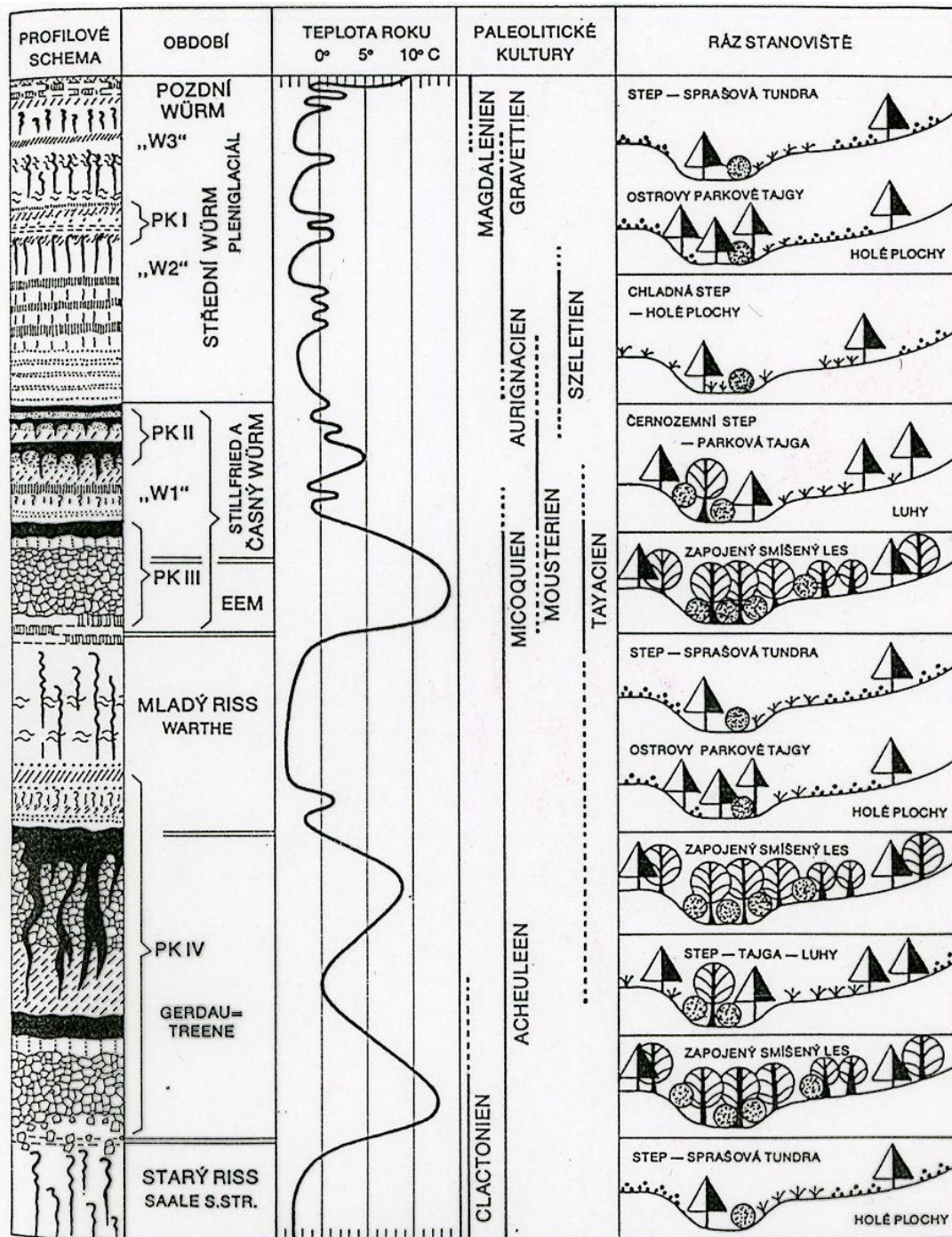


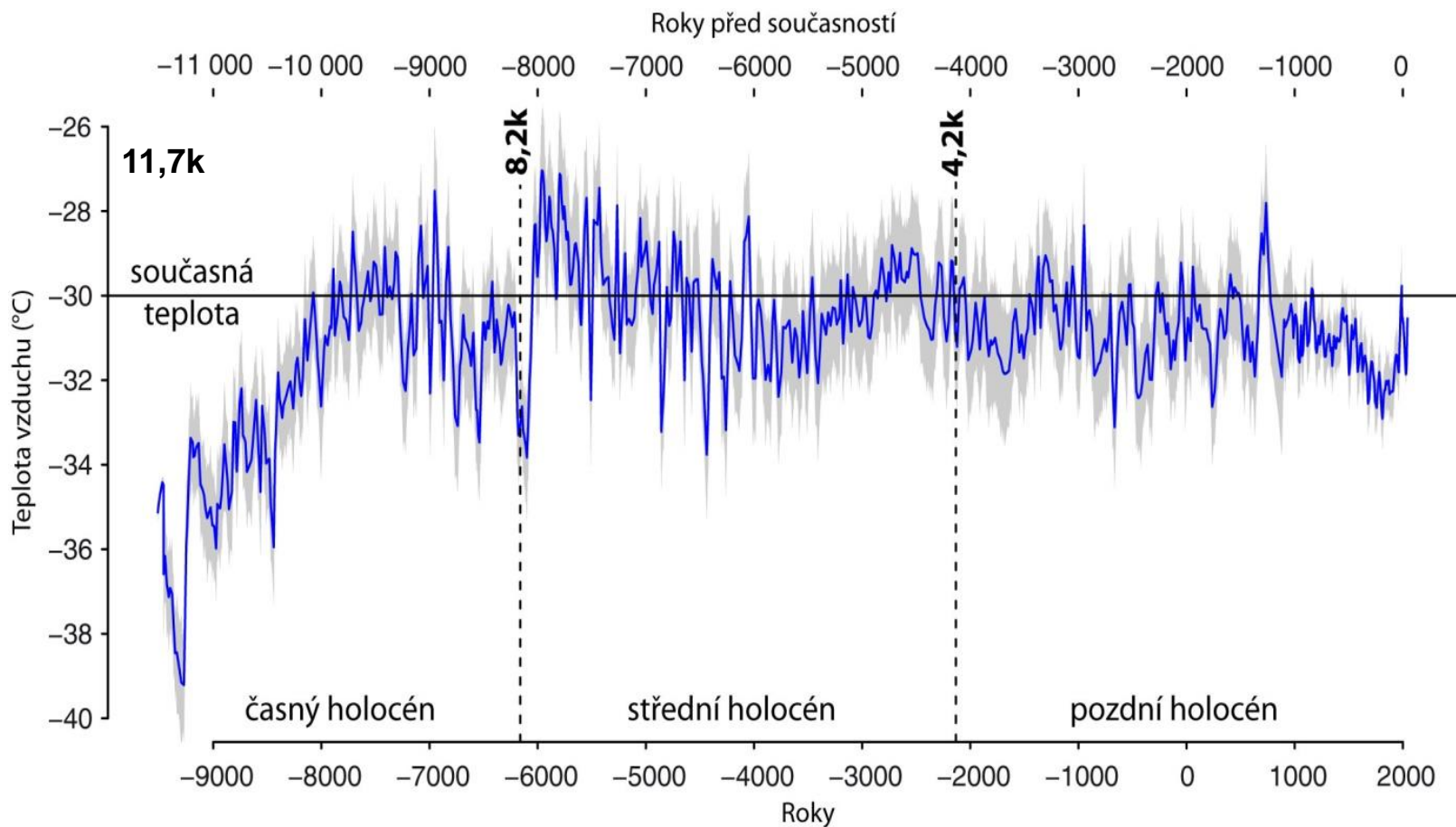
Severní a střední Evropa na vrcholu posledního zalednění před zhruba 20 tisíciletími. 1 okraj zalednění, 2 jádra tvorby ledu a hranice okrsků živěných z jednotlivých jader, 3 horská zalednění, 4 hlavní směry pohybu ledu, 5 řeky živěné tavnými vodami, 6 příledocová jezera, 7 polární pustiny, 8 tundra (příledocová vegetace), 9 horské tundry a hole, 10 lesy (tajga), 11 chladné stepy (podle Gerasimova 1965).



Severní a střední Evropa v posledním interglaciálu. 1 pobřeží moře zachycené, 2 pobřeží moře předpokládané, 3 pobřeží doplněné, 4 jezera, 5 tundra, 6 tajga, 7 smíšené listnaté lesy, 8 stepi, 9 alpské hole (Gerasimov 1965, upraveno).

Klimatické výkyvy
středního a mladého
pleistocénu zachycené ve
sprašových sériích suchých
oblastí střední Evropy
(Ložek, 1984)



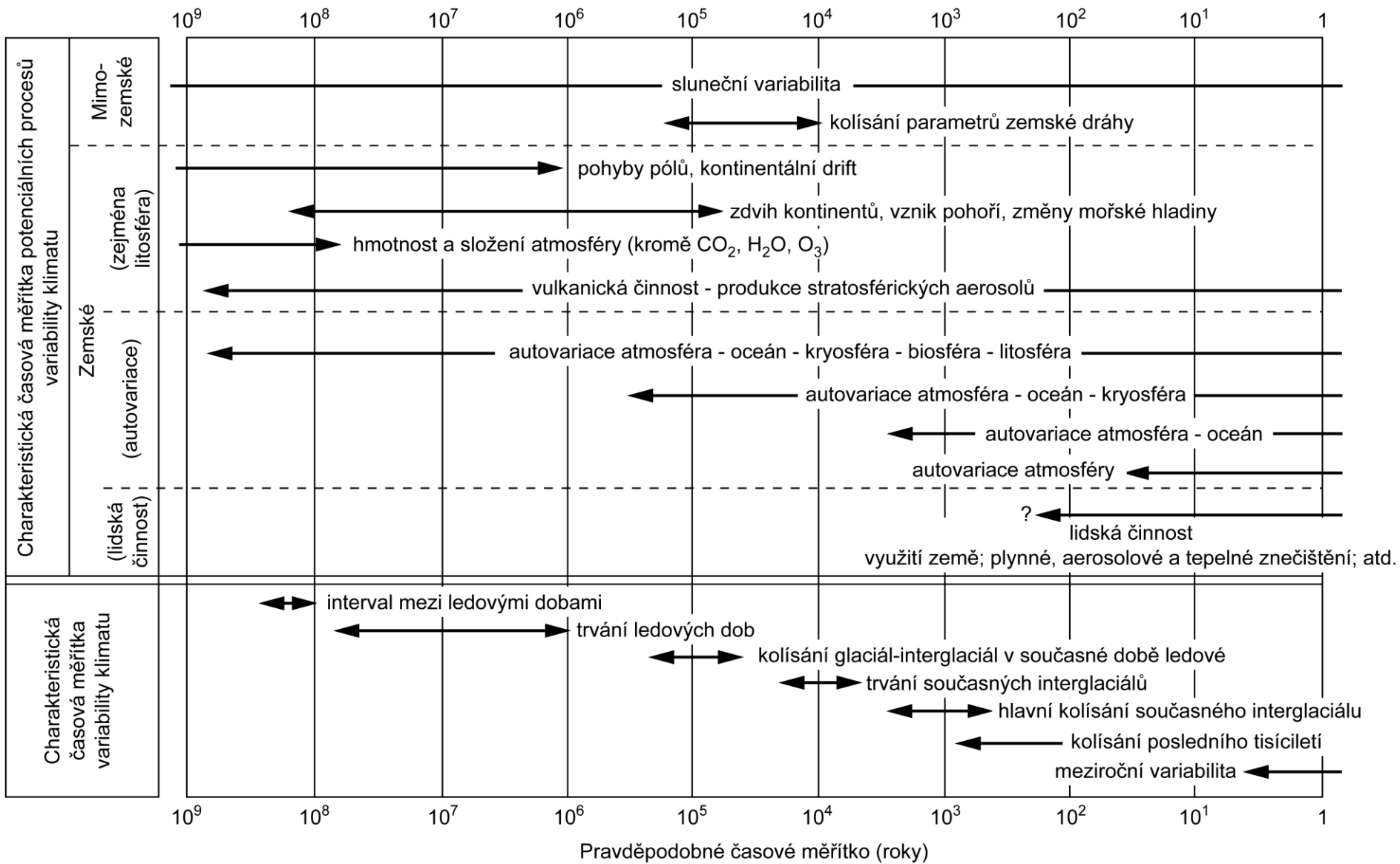


Rekonstrukce průměrné roční teploty vzduchu v centrální části Grónska (modrá čára) doplněná odhadem nejistot (šedá) během holocénu. Vodorovná čára značí průměrnou teplotu období 1988–2015. Rekonstrukce byla sestavena na základě obsahu izotopů argonu a dusíku v ledovcových jádrech (GISP2) podle Kobashiho et al. (2017). Svislé čáry označují hranice časného, středního a pozdního holocénu podle Walkera et al. (2012)

6.5 Časová měřítko pravděpodobně působících klimatotvorných faktorů

- 10^9 a – dlouhodobé kolísání svítivosti Slunce (kompenzace nižší svítivosti skleníkovým efektem)
- 10^7 – 10^8 a – paleogeografické faktory (např. kontinentální drift, změny oceánské cirkulace)
- 10^6 a – tektonické fluktuace a snad dlouhodobé změny orbitální insolace?
- 10^3 – 10^5 a – externí vlivy (orbitální působení), interní vlivy zpětných vazeb v systému pevnina – moře – vzduch – led (včetně CO_2)
- 10^0 – 10^2 a – sluneční proměnlivost, vulkanická činnost, vnitřní zpětné vazby a interakce v systému oceán - atmosféra

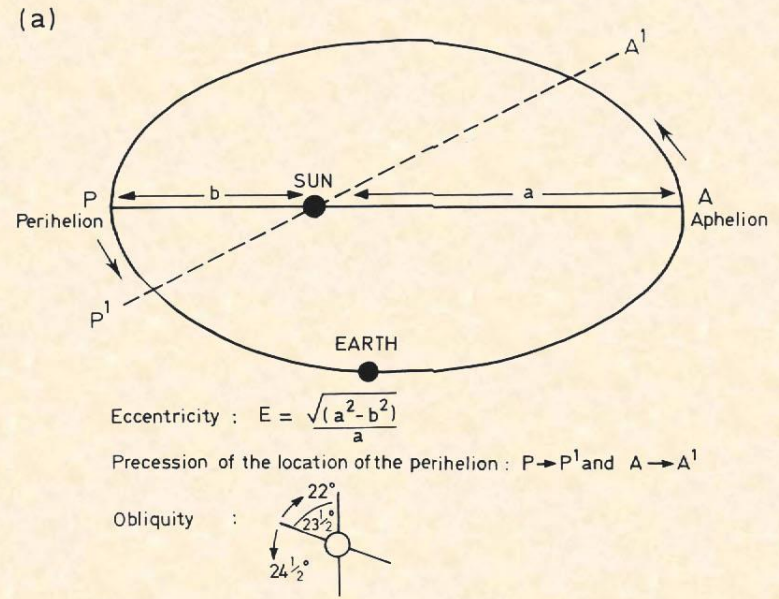
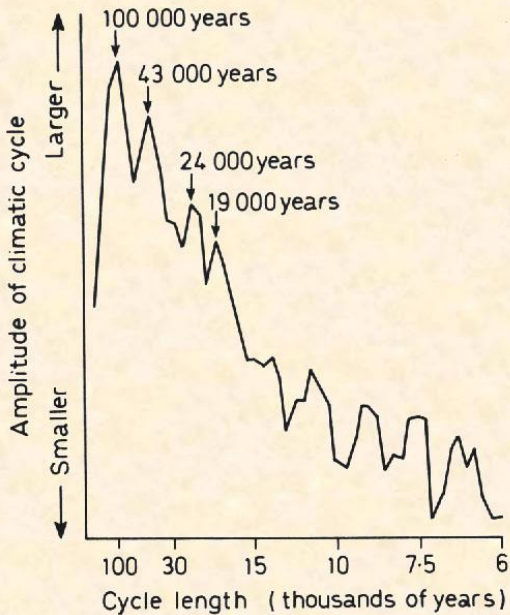
Význam **paleoklimatického modelování** pro poznání minulých klimát a jejich příčinné podmíněnosti.



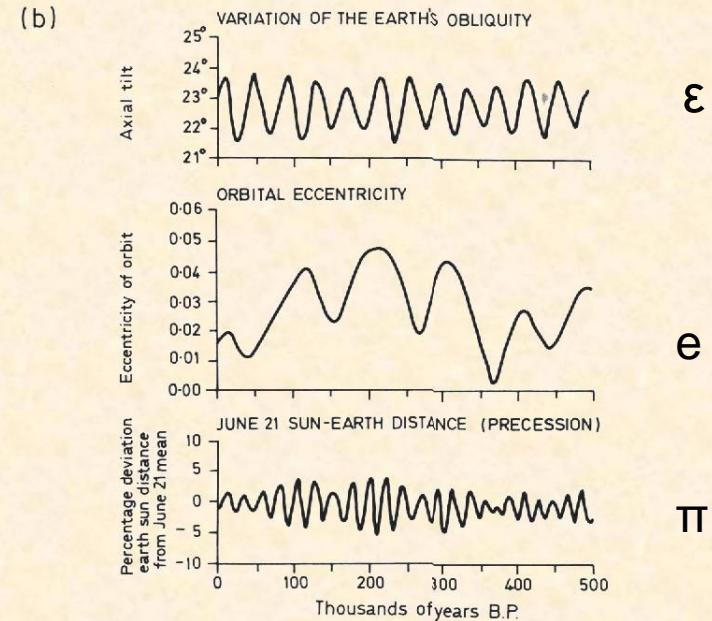
Charakteristické faktory a procesy ovlivňující variabilitu klimatu a jejich časová škála (Bradley, 1999)

6.6 Hypotézy klimatických změn

- za nejvěrohodnější hypotézu objasňující kvartérní klimatické cykly je považována **Milankovičova astronomická hypotéza**, založená na změně parametrů oběžné dráhy Země kolem Slunce:
 - **sklon zemské osy ε** (úhel sevřený rovinou ekliptiky a rovinou světového rovníku): 22–24,5°, asi 41 000 let
 - **délka perihelu π** (úhlová vzdálenost přísluní od jarního bodu, pohybujícího se v důsledku precese): 21 000 let
 - **výstřednost zemské dráhy e** : 0,0007–0,0658, 100 000 let



Spectrum of climatic variations over the past 500 000 years. The graph shows the importance of the climatic cycles of 100 000 years (eccentricity); 43 000 years (obliquity) and 24 000 and 19 000 years (precession of the location of the perihelion). The curve is constructed from an isotopic record of two Indian Ocean cores (from Imbrie and Imbrie (1979) by permission of Macmillan, London and Basingstoke).

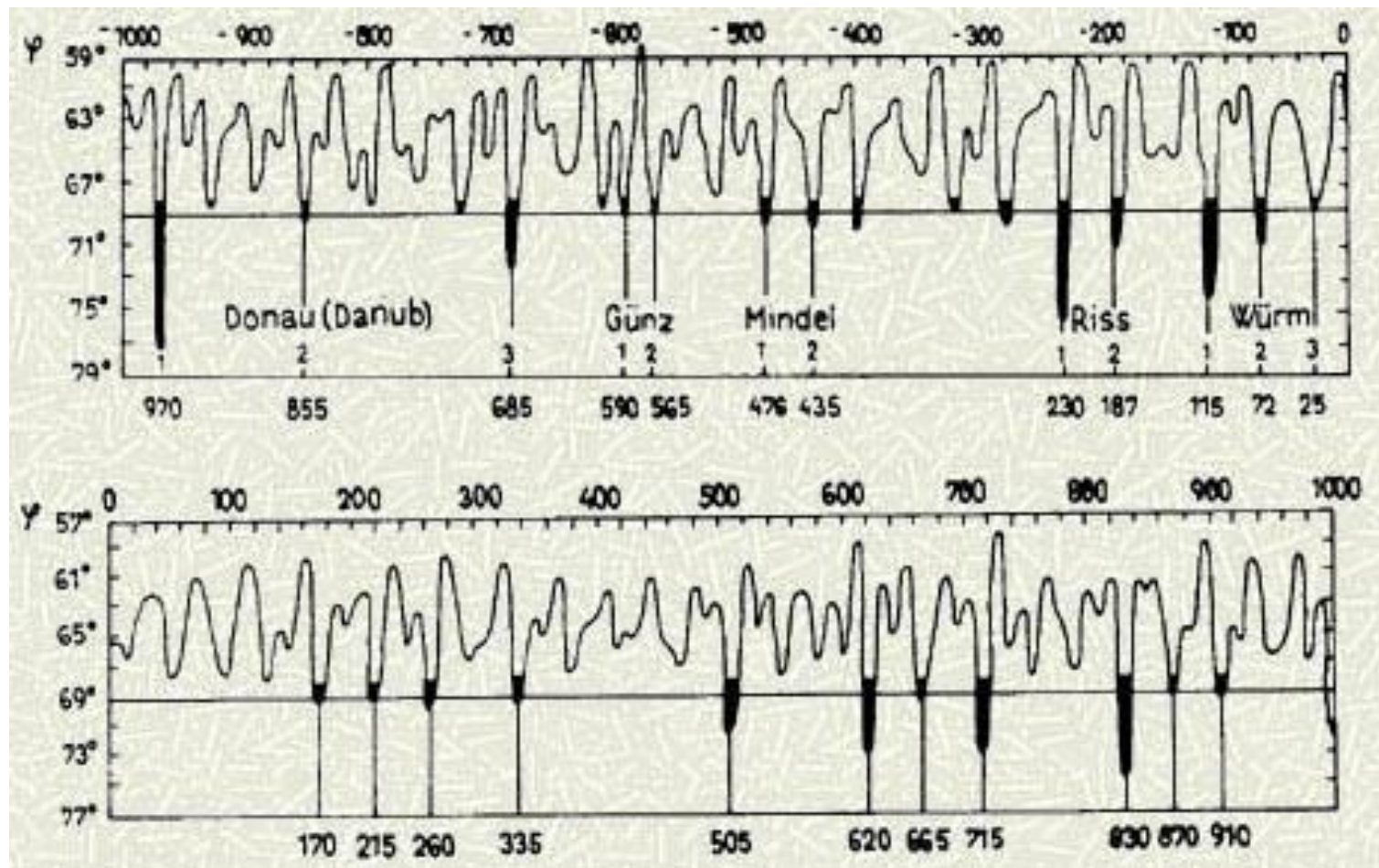


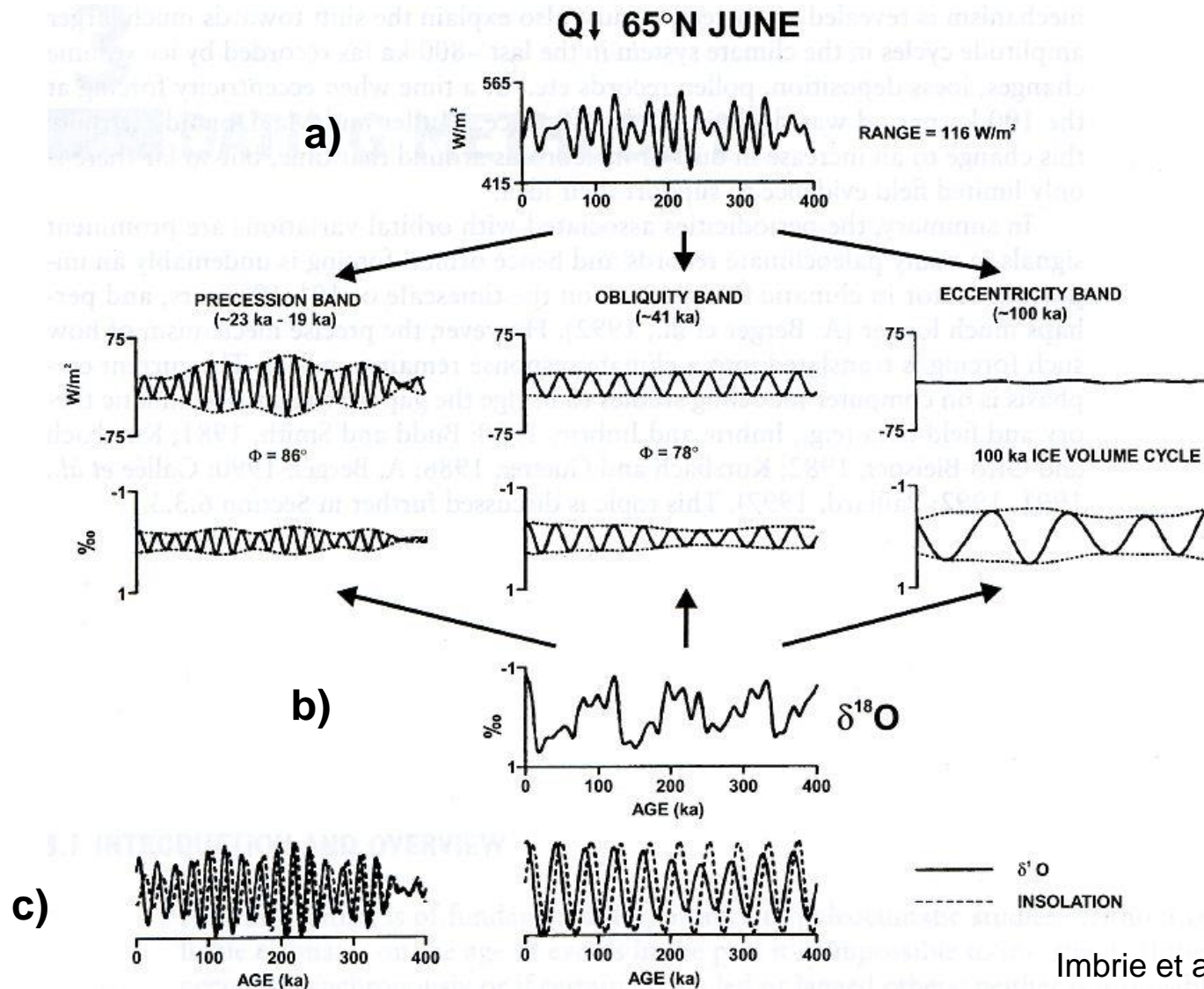
Vhodné podmínky pro zalednění na Severní polokouli:

- relativně teplé zimní a relativně chladné letní období
- nejmenší ϵ , největší e , π blízké 90° nebo 270°

(a) Schematic diagram showing the variations in the three orbital components: obliquity (axial tilt), orbital eccentricity and precession of perihelion; (b) variations in these three components, from 500 000 years ago to the present, as a function of time (reproduced with permission from Broecker and Van Donk, *Rev. Geophys.*, 8, 169-196 (1970). Copyright by the American Geophysical Union).

- **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**

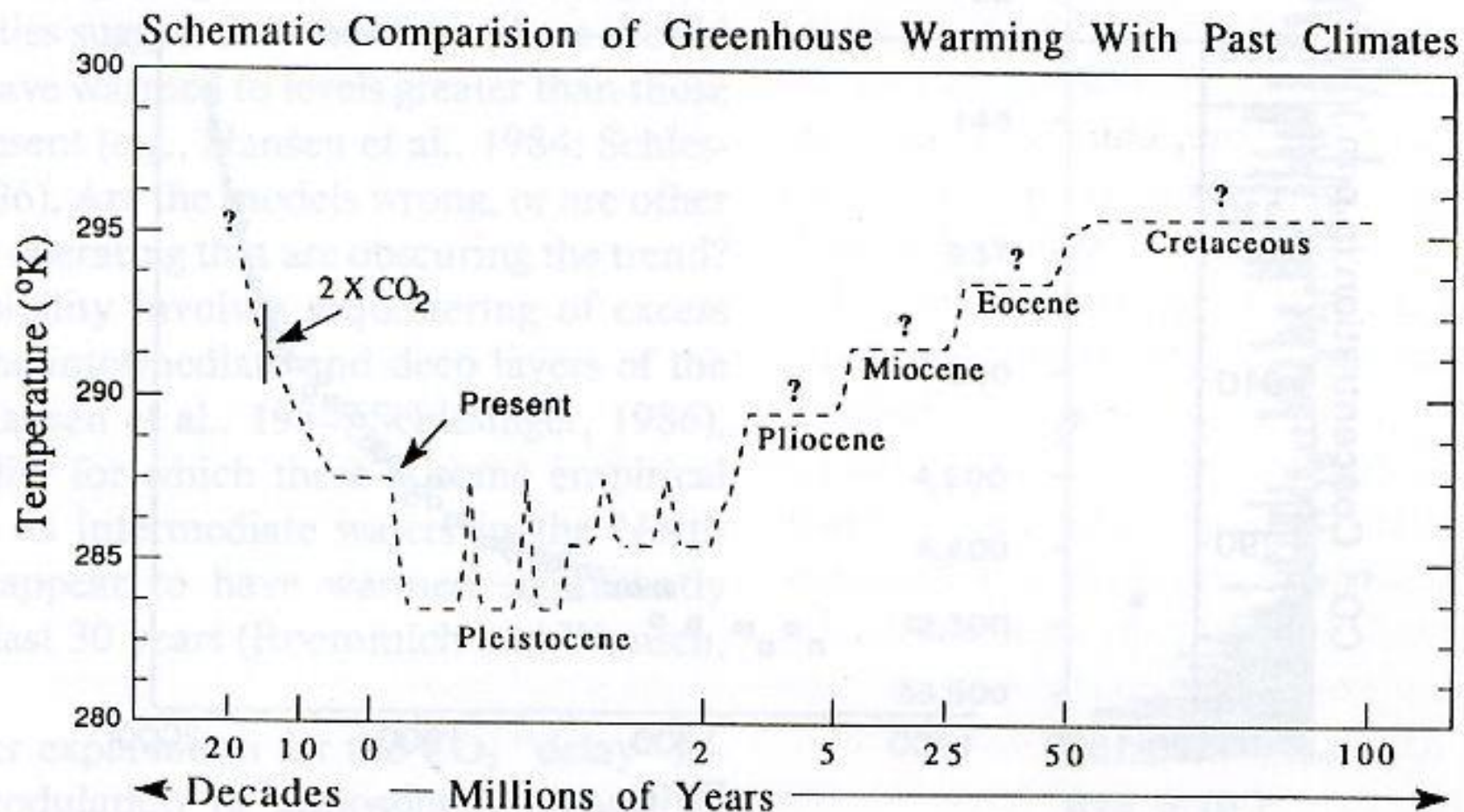




Imbrie et al., 1993

Insolace na 65° s. š. v posledních 400 000 letech podle parametrů zemské dráhy (a) v porovnání s objemem kontinentálního ledu odvozeného podle $\delta^{18}O$ v mořských sedimentech (b) s hlavními komponentami téže frekvence. (c) dokumentuje koherenci mezi radiačním 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. (3. vydání – 2015).

Jansen, E., Overpeck, J. (2007): *Palaeoclimate*. In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Marquis, M., Averyt, K. Tignor, M. M. B., LeRoy Miller, H., Chen, Z., eds.: *Climate Change 2007. The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, Cambridge, s. 433-497.

Wanner, H., Beer, J., Butikofer, J. et al. (2008): Mid- to Late Holocene climate change: an overview. *Quaternary Science Reviews*, 27, 1791–1828.

Jones, P. D., Briffa, K. R., Osborn, T. J. et al. (2009): High-resolution palaeoclimatology of the last millennium: a review of current status and future prospects. *The Holocene*, 19, 3–49.

Hughes, M. K., Swetnam, T. W., and Diaz, H. F. (2011): *Dendroclimatology. Progress and Prospects*. Springer, Dordrecht, Heidelberg, London, New York, 365 s.

Masson-Delmotte, V. (2014): Information from paleoclimate archives. In: Stocker, T. F. et al.: *Climate Change 2013. The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, Cambridge, s. 383-464.

Wilson, R. et al. (2016): Last millennium northern hemisphere summer temperatures from tree rings: Part I: The long term context. *Quaternary Science Reviews*, 134, 1–18

Büntgen, U., Urban, O., Krusic, P.J. et al. (2021): Recent European drought extremes beyond Common Era background variability. *Nat. Geosci.* 14, 190–196. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00698-0>