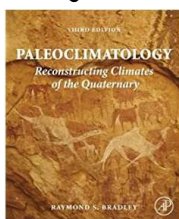


Paleoklimatologie, část II. (High resolution paleoclimatology)

Petr Dobrovolný
dobro@sci.muni.cz
Geografický ústav PŘF MU



Zdroje informací



Bradley, R.S., 2011. High-resolution paleoclimatology.
In: M.K. Hughes, T.W. Swetnam and H.F. Diaz (eds).
Dendroclimatology: Progress and Prospects.
Developments in Paleoenvironmental Research 11,
Springer, Berlin, 3-15.



The Holocene 19,1 (2009) pp. 3-49

High-resolution palaeoclimatology of the last millennium: a review of current status and future prospects

P.D. Jones,^{1*} K.R. Briffa,¹ T.J. Osborn,¹ J.M. Lough,² T.D. van Ommen,³ B.M. Vinther,⁴ J. Luterbacher,⁵ E.R. Wahl,⁶ F.W. Zwiers,⁷ M.E. Mann,⁸ G.A. Schmidt,⁹ C.M. Ammann,¹⁰ B.M. Buckley,¹¹ K.M. Cobb,¹² J. Esper,¹³ H. Goosse,¹⁴ N. Graham,¹⁵ E. Jansen,¹⁶ T. Kiefer,¹⁷ C. Kull,¹⁸ M. Küttel,⁵ E. Mosley-Thompson,¹⁹ J.T. Overpeck,²⁰ N. Riedwyl,⁵ M. Schulz,²¹ A.W. Tudhope,²² R. Villalba,²³ H. Wanner,⁵ E. Wolff²⁴ and E. Xoplaki⁵

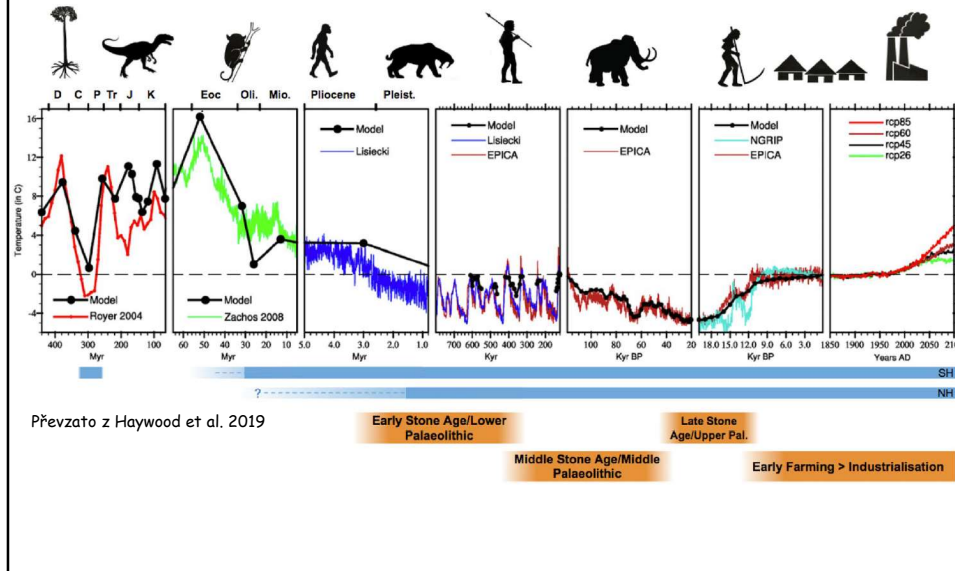
Climatic Change (2009) 94:247-259
DOI 10.1007/s10584-009-9588-0

The future of the past—an earth system framework for high resolution paleoclimatology: editorial essay

M. K. Hughes · C. M. Ammann

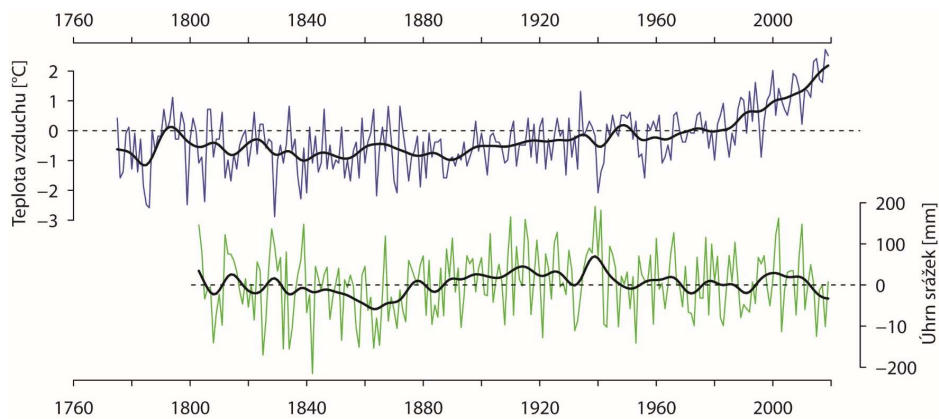
Paleoklimatologie

Zabývá kolísáním a změnami klimatu v minulosti, před počátkem přístrojových měření a pozorování.



Klimatologie instrumentálního období

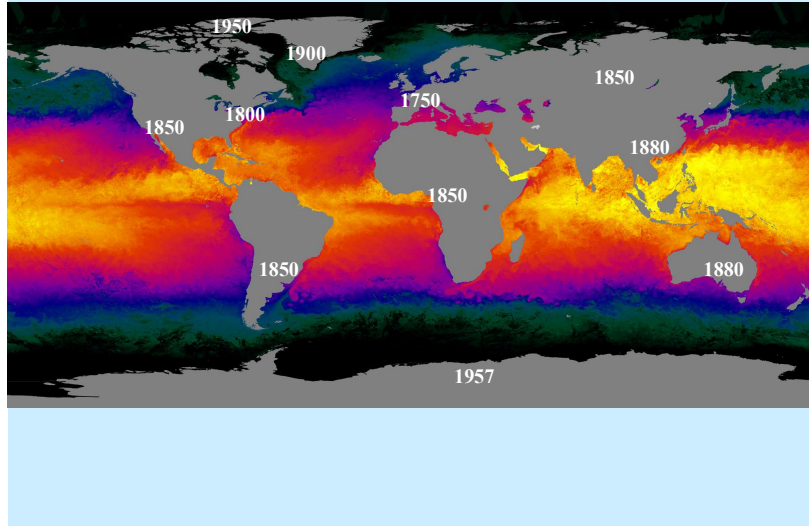
Klima je výsledkem působení klimatotvorných faktorů, má však také svoji vnitřní variabilitu.



Variabilita průměrné roční teploty vzduchu (1775 - 2019) a ročních úhrnů srážek (1803 - 2019), průměrné řady pro Českou republiku, hodnoty jsou vyjádřeny v podobě odchylek od referenčního období 1961 - 1990

Klimatologie instrumentálního období

Earliest instrumental records on land



Klimatologie instrumentálního období

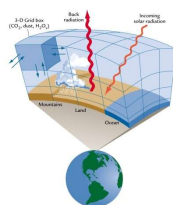
Údaje z instrumentálního období jsou nejspolehlivějším zdrojem informací o počasí a podnebí, avšak pokrývají pouze krátké období historie Země



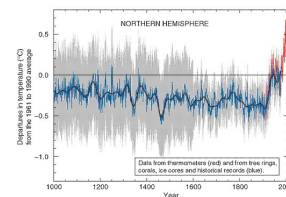
- Tyto údaje jsou nedostatečné k **pochopení** a **odhalení příčin** dlouhodobých změn
- Údaje z instrumentálního období nezahrnují **nejvýznamnější případy** extrémních projevů počasí, které známe z historie
- Údaje z instrumentálního období nás neinformují o **dopadech** kolísání klimatu a o dopadech meteorologických extrémů na **přírodu a společnost**



K pochopení fungování klimatického systému je třeba hledat **alternativní údaje** o jeho minulém vývoji



modelování



rekonstrukce

Proxy údaje a rekonstrukce klimatu



Proxy-based rekonstrukce

Přírodní archívy paleoklimatologie

Antropogenní archívy historické klimatologie



paleobotany



ice cores



tree rings



dokumentární prameny

Paleoklimatologie s vysokým rozlišením

High resolution paleoclimatology (HRP) involves studies of natural archives as proxies for the past climate variations at a temporal scale that is comparable to that of instrumental data. This generally means annually resolved records ... Proxy archives are used to reconstruct climate in the pre-instrumental period quantitatively (Bradley, 2011).

High-resolution paleoclimatology is the study of climate variability and change on interannual to multi-century time scales. Its primary focus is the past few millennia, a period lacking major shifts in external climate forcing and earth system configuration (Hughes and Ammann, 2009)

Paleoklimatologie s vysokým rozlišením se zabývá

- rekonstrukcí klimatu porovnatelnou s instrumentálními měřeními
- kvantitativní rekonstrukcí
- rekonstrukcí klimatu „našeho světa“

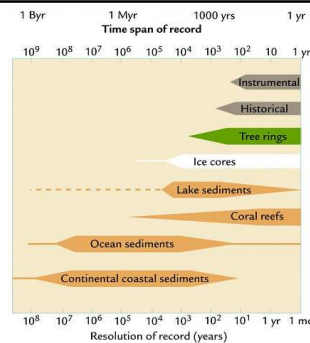
Paleoklimatologie s vysokým rozlišením

- Časově pokrývá především **pozdní Holocén** (6ka BP), případně dobu historickou (dva tisíce roků).
- I když některé dendrochronologie pokrývají téměř celý holocén, jejich využití pro rekonstrukci klimatu v celém časovém rozsahu je často limitováno řadou aspektů (viz dále)
- Ke studiu minulého klimatu využívá různých druhů **proxy-dat**. Tyto se nacházejí především v **přírodních archívech** (mořské a jezerní sedimenty, ledovcová jádra, korály, krápníky (speleothems), letokruhy stromů etc.).
- Pro HRP mají význam zvláště takové, které vznikají **ročními přírůstky**.
- Do HRP lze zařadit i údaje z **antropogenních archívů**, kterými se zabývá historická klimatologie.
- Pro území českých zemí pokrývají antropogenní archívy zhruba pro poslední milénium a pro kvantitativní rekonstrukci klimatu období po roce 1500.



Význam HRP

- Klima se mění na různých **časových škálách** a zcela jistě nerozumíme celému spektru klimatických módů i kolísání a změn klimatu.
- K poznání příčin a mechanismů současné globální změny klimatu může významným způsobem přispět studium procesů, které vedly k jeho změnám a kolísání v minulosti.
- Tedy v době, kdy kolísání a změny klimatu byly výsledkem působení **přirozených klimatotvorných faktorů**.
- S ohledem na současnou změnu klimatu HRP umožňuje posoudit případný **antropogenní vliv**.
- Zasazuje variabilitu současného klimatu do dlouhodobé perspektivy (**detekce**)
- Studuje změnu klimatu s ohledem na klimatotvorné faktory a forcing mechanismy (**atribuce**)
- Umožňuje významně rozšířit naše znalosti o četnosti výskytu a intenzitě **hydrometeorologických extrémů** (HME) či cirkulačních módů (NAO, ENSO)
- Poskytuje data, na kterých lze **validovat klimatické modely** vývoje budoucího klimatu a sestavovat např. sensitivity studies



Předpoklady HRP pro rekonstrukci klimatu

Data requirements (Bradley, 2011)

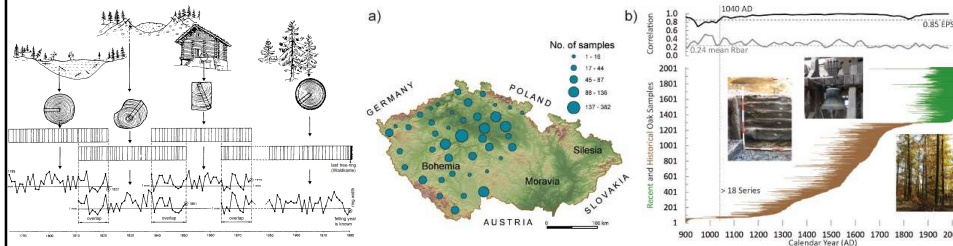
- 1) an **accurate chronology** can be established; this generally requires **replication** of the archive being sampled
- 2) the archive can be sampled in detail, ideally at seasonal to **annual resolution**, but at least at the resolution of a few years
- 3) the parameter being measured is reasonably well **understood** in terms of its **relationship to climate** (i.e., its mechanistic and seasonal response) so that it can be calibrated in terms of climate, using the instrumental record as a yardstick for interpreting the paleo-record
- 4) the relationship between the proxy and climate observed today has been similar in the past (the principle of **uniformitarianism**)
- 5) the record captures variance of climate over a wide **range of frequencies**, or at least the window of variance which the proxy does capture is known

Bohužel „ideálně“ to funguje pouze u některých dendrochronologií, ...

Ad1. Kvalitní chronologie

- Primárním předpokladem je vytvoření přesné a **spolehlivé** chronologie z dostatečného **počtu vzorků**.
- Díky možnostem velkého počtu vzorků jsou dendrochronologie takřka ideálním **chronometrem**, a proto jejich využívání bylo primárně pro datování.
- Bohužel požadavek dostatečného počtu replikací ideálně funguje především v dendroklimatologii. V práci s jinými typy proxy-dat je problematický z hlediska **časové** či **finanční náročnosti**, destrukce vzorků, atd.
- V případě historické klimatologie je nerealizovatelný. Avšak spolehlivost a kvalita řad teplotních či srážkových indexů sestavených z dokumentárních pramenů se však posuzuje jiným způsobem.
- V případě dendroklimatologie to lze udělat statisticky (viz dále). V případě historické klimatologie rozhoduje **relevance zdroje** z hlediska aktuálnosti, ... (blíže viz Brázdil et al. 2010).

Ad1. Kvalitní chronologie



Způsob sestavení chronologie (vlevo, podle Schweingruber 1983) a prostorové a časové pokrytí chronologie šířek letokruhů dubu z Čech: (a) počty vzorků pro jednotlivé okresy v Čechách; (b) časové rozložení jednotlivých vzorků doplněné nahoře statistickým hodnocením kvality chronologie: R_{bar} - průměrná korelace mezi vzorky a klouzavé průměry za 31 roků hodnot EPS. Horizontální čáry označují hranici statistické významnosti (R_{bar}) resp. obecně přijímanou hodnotu (0.85) kvality chronologie

Ad1. Kvalitní chronologie



Časové značky (time markers) v chronologii (for cross-dating)

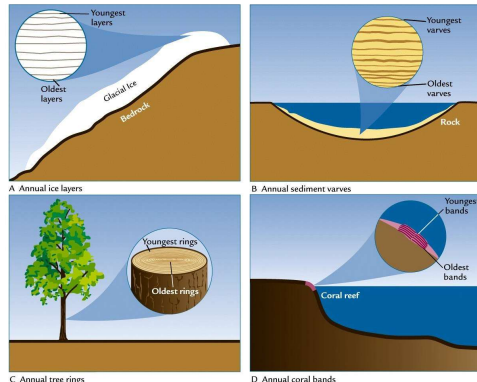
- Koncentrace síranů (sulfate peaks) pocházející z velkých sopečných erupcí známého data
- Vrstvy pyroklastik (tephra layers, tefra z řeckého prach), vznikají při velkých sopečných erupcích
- Vrstvy sedimentů z významných historických povodní v profilech jezerních sedimentů
- Radioaktivní izotopy z testů nukleárních zbraní nacházející se v sedimentech a ledovcových jádrech

Ad2. Vysoké časové rozlišení

- Princip vytváření ročních přírůstků je v přírodních proxy-datech poměrně četný a tyto přírůstky jsou často velmi dobře identifikovatelné.

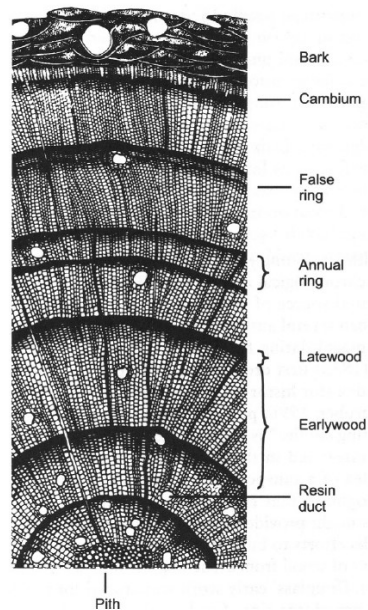
- V případě letokruhů stromů se roční cyklus promítá nejen do šířky letokruhů, ale i do hustoty dřeva či koncentrace stabilních izotopů.

- Někdy lze detekovat sezónní změny (časné a pozdní dřevo). Naopak v řadě případů nejde o „roční“ charakteristiku, ale i kratší období související např. s vegetačním obdobím, hydrologickým cyklem, obdobím tání sněhu atp. To je nutné zohlednit při kalibraci (viz dále).
- Například maximální koncentrace ^{18}O v korálech během ročního cyklu odpovídá minimu SST, vrstva jílu („clay cap“) u každé vrstvy jezerních sedimentů vyznačuje zimní období atp.



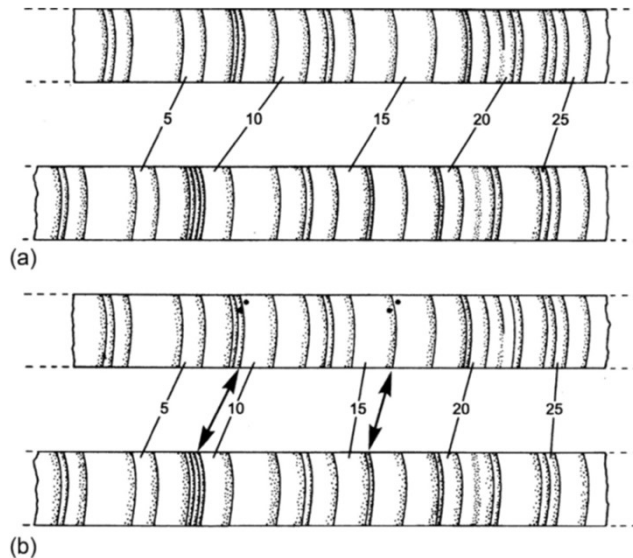
Ad2. Vysoké časové rozlišení

- Jeden či více každoročních záznamů však z různých důvodů může chybět (missing ring)
- Naopak stromy vytvářejí „nepravé letokruhy“
- Proto je důležité mít několik vzorků (angl. replication, sample depth).
- Vedle identifikace chybějících „roků“ to umožňuje také potlačit lokální specifika.



Ad2. Vysoké časové rozlišení

Křížové datování (cross-dating) umožňuje identifikovat nepravé či chybějící letokruhy)

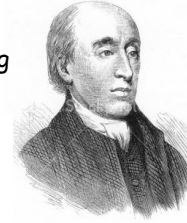


Ad3. Porozumění druhům proxy

- V obecném postupu kvantitativní rekonstrukce je po sestavení chronologie nutné zjistit, na jaké vlastnosti klimatu (meteorologické prvky či klimatologické charakteristiky) data reagují (teplota, srážky, sluneční svit, sucho, ...).
- Tato vazba by měla být fyzikálně vysvětlitelná, korelace ještě neznamená kauzální vztah.
- Ve většině případů je zapotřebí, aby tyto prvky či charakteristiky měly dobře vyjádřený roční cyklus. Například stromy rostoucí v tropech nemají zřetelné letokruhy.
- V případě dendroklimatologie obecně platí, že identifikovatelný signál je možné najít u tzv. **faktoru v minimu**.
- Stromy rostoucí v polohách, kde je jejich růst limitován teplotními poměry či (ne)dostatkem vláhy mají v ročních přírůstcích dobře vyjádřený klimatický signál.
- Faktory, které ovlivňují růst stromů, jsou zřejmé. Avšak s tím, jak se zvyšují možnosti extrahovat jiné druhy informací, tak je nutná znalost z dalších disciplín (ekofyziologie, anatomie dřevin atp.)

Ad4. Princip uniformity (uniformitarianism)

- Původně v geologii: **James Hutton** (1785): The Earth had a long history and this history could be interpreted in terms of processes currently observed.



- **Charles Lyell** - skotský geolog a botanik, zakladatel stratigrafie

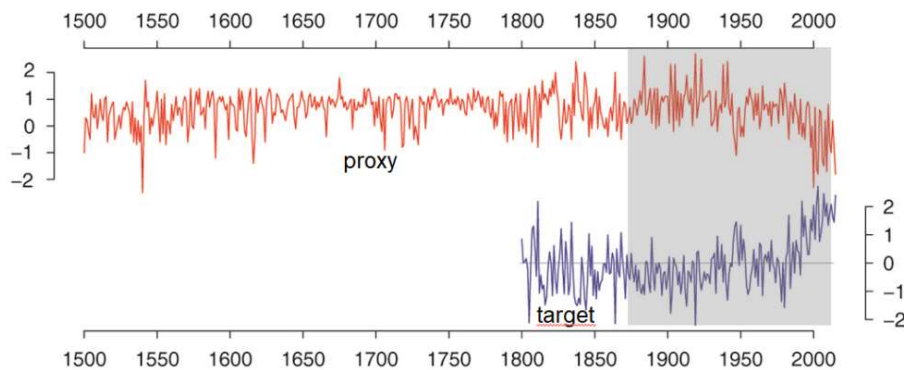


The continuing uniformity of existing processes should be used as the framework for understanding history of the Earth.

- Proxy rekonstrukce musejí být mj. založeny na principu uniformity (**aktuálnosti**), podle kterého současný charakter vztahu mezi proxy daty a instrumentálními měřeními byl stejný i v minulosti.
- To vychází z obecného principu kvantitativní rekonstrukce, která je založena na hledání funkce odezvy pro relativně krátké současné období, pro které jsou k dispozici proxy data a data z instrumentálního období, na která se proxy-data kalibrují (target).

Ad4. Princip uniformity (uniformitarianism)

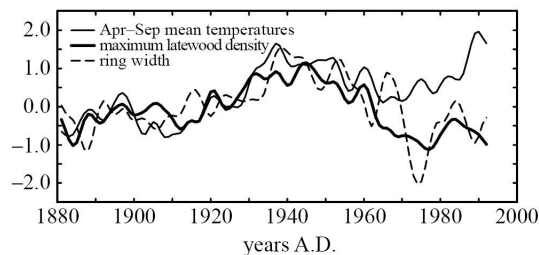
- Vztah nalezený pro období kalibrace, nejčastěji sestavený s využitím statistických metod, je aplikován na proxy-data v minulosti.



Příklad obecného modelu kvantitativní rekonstrukce založený na existenci společného období, pro které jsou k dispozici proxy-data i data z instrumentálního období (target)

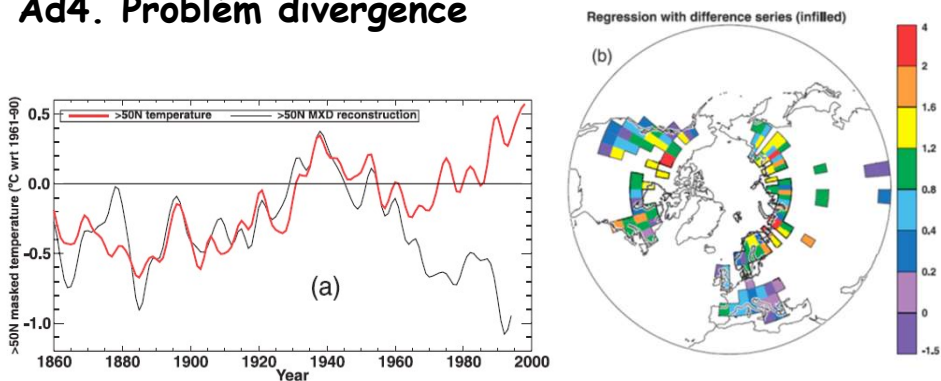
Ad4. Problém divergence

- Zřejmě i v důsledku rychlosti současné změny klimatu (globálního oteplování) některé z archivů nereagují sejným způsobem na variabilitu klimatu jako v nedávné minulosti.
- Na tento problém poprvé upozornil K. Briffa (1998) - šířka letokruhů nevykazovala tak těsný vztah s teplotou vzduchu. TRW nekopírovaly nárůst teplot.
- Efekt se začal v řadách projevovat kolem r. 1950.



Shlazené řady šířky letokruhů (čárkovaně) a hustoty pozdního dřeva (tučně) v podobě standardizovaných dvacetiletých klouzavých průměrů, odchylky od průměru 1881-1940 v porovnání s průměrnými teplotami vzduchu dubna až září (odchylky za stejné období, tenká plná čára). Podle [Briffa et al. \(1998\)](#).

Ad4. Problém divergence



(a) Instrumental temperatures (red, heavier line) and tree-ring density reconstructions of temperature (black, thinner line) averaged over all land grid boxes north of 50°N, smoothed with a 5-year low-pass filter.

(b) map showing where the average temporal pattern of divergence between tree-ring density chronologies and mean warm season temperatures is most apparent. The smoothed difference between the black and red curves in figure (a) were regressed against the local difference curves produced from the averages of data in each grid box. Where the regression slope coefficients are progressively greater than 1.0 (the yellow, orange and red boxes, which are generally the most northerly locations), the greater is the local difference between density and temperature. In the areas shown blue and light purple (areas further south), the difference is apparent but of lower magnitude. The areas shown as dark purple (basically the most southern regions) do not show the divergence [note change in scale on color bar] (from Briffa et al., 2004).

Ad4. Problém divergence – možné příčiny

- Hledání možných příčin je důležité i proto, že podobný efekt „decoupling“ či ztráty koherence se mohl vyskytnout i v minulosti. Např. v IPCC zprávě z r. 2007 je vyjádřena obava o věrohodnost proxy-rekonstrukcí:

„Any significant shift in the recent growth response of trees would invalidate the assumptions that underlie the simple regression-based approach to reconstructing past temperature changes. It is important to stress that not all high-latitude regions display this apparent decoupling between observed and dendroclimatically estimated temperatures.“

- **Příčiny** mohly souviset s posunem od dominantní role teploty vzduchu („temperature-controlled“) k režimu, ve kterém jsou stromy ovlivňovány vlhkostními poměry. A to až do situace, kdy vliv teploty na růst stromů mění znaménko z pozitivního na negativní.
- Divergence má ale zřejmě řadu příčin, mezi které dále patří rostoucí role výskytu sucha, změny v intenzitě UV-záření v důsledku změn v koncentraci ozónu či znečištění ovzduší (Jones et al. 1998, Briffa et al. 2004).
- V poslední době převládají názory, že divergence je způsobena antropogenními aktivitami a týká jen nedávné minulosti. I když nepanuje konsenzus.
- Ne všechny řady z vysokých zeměpisných šířek totiž ukazují decoupling. Problém může souviset s tím, že v řadě chronologií chybí dostatečné zastoupení recentních (post 1980-) vzorků.

Ad4. Problém divergence – možné příčiny

- Od jisté hranice nárůstu teploty mohou být stromy fyziologicky stresovány, pokud nedojde k souběžnému nárůstu vlhkosti
- Reakce růstu stromů na současné globální oteplování může být zpožděná či nelineární
- Změny v sezonalitě (posun doby tání sněhu, posun začátků ročních období)
- „Globální stmívání“ vlivem růstu obsahu aerosolů v atmosféře (d' Arrigo et al. 2008)
- Nevhodné věkové složení vzorů stromů v chronologiích

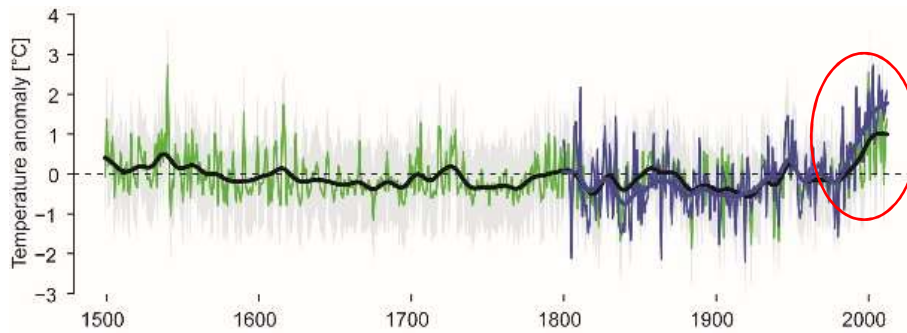
Podle některých studií však problém divergence řeší zkvalitnění recentních částí chronologií a vhodný způsob standardizace (Frank, Buentgen).

Naproti tomu je zřejmé, že současná změna klimatu způsobuje **degradaci** či **úplnou ztrátu některých přírodních archívů**, např.

- Tání ledovců ve vysokých horách nízkých a středních zeměpisných šířek.
- Velmi vysoké povrchové teploty oceánu (SST) či acidifikace negativně ovlivňuje korálové útesy (bělení).

Ad4. Problém divergence

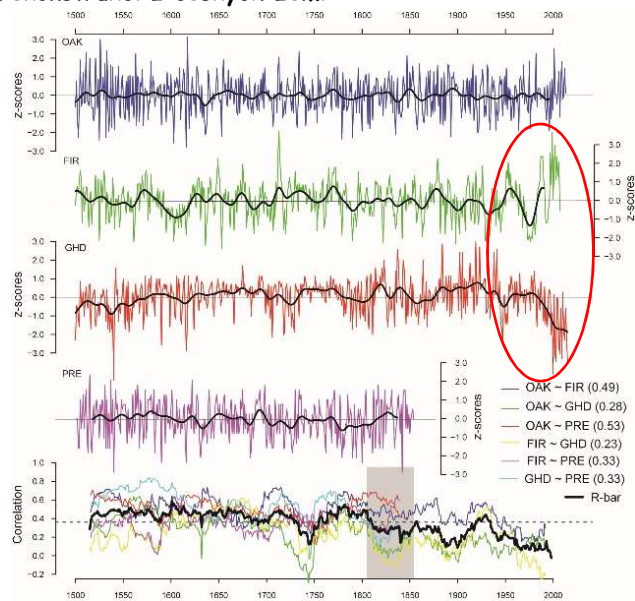
na příkladu rekonstrukcí z českých zemí



Measured (blue) and reconstructed (green) mean Czech April-August temperatures in the 1499-2015 period; temperatures indicate anomalies with respect to the 1961-1990 period. Thick blue and black lines represent measured and reconstructed temperatures smoothed by Gaussian filter for 30 years; grey area approximates 95% confidence interval constructed as two units of standard error (SE) of the estimate from the linear regression (Možný et al., 2016).

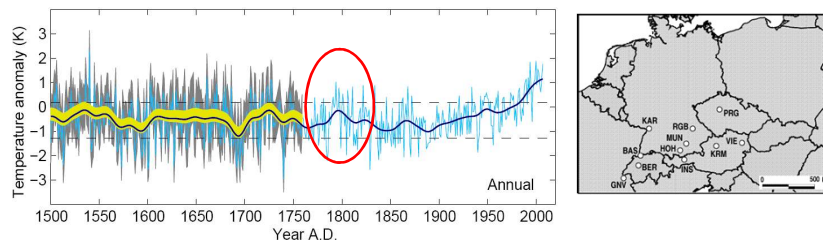
Ad4. Problém divergence

na příkladu rekonstrukcí z českých zemí

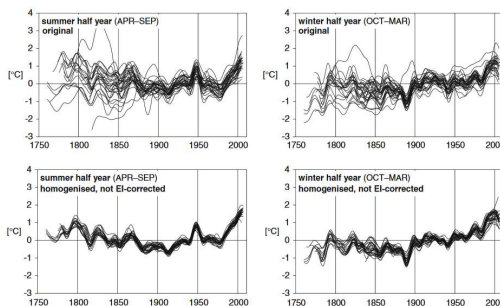


Ad4. Early instrumental paradox

- Případné problémy s principem uniformity nemusejí souviset pouze s vlastnostmi proxy-dat, ale mohou souviset s kvalitou instrumentálních měření.
- Charakteristickým rysem vývoje teplot je zřetelně vyjádřené teplejší období na konci 18. a na počátku 19. století, které lze např. identifikovat v průměrných ročních teplotách sestavených na základě dokumentárních pramenů.
- Vyšší teploty byly zaznamenány i v jiných částech Evropy, například ve Švýcarsku (Brönnimann, 2015). V širším regionu Alp je podle databáze HISTALP uvedené období charakterizováno jako teplé a suché (Auer et al., 2007).



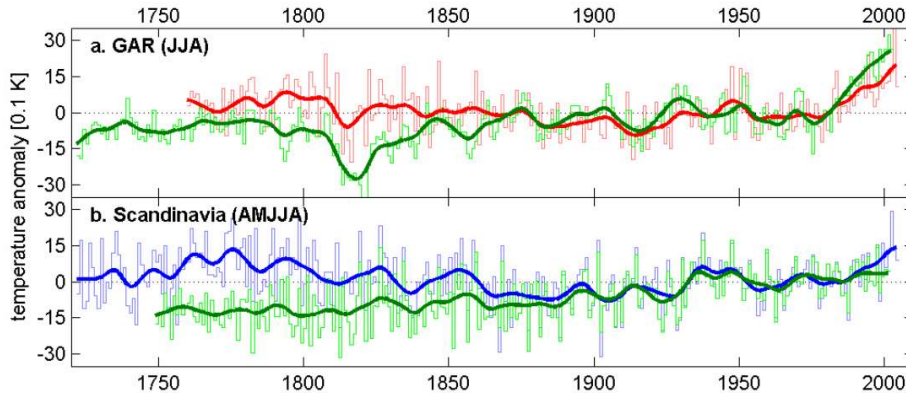
Ad4. Early instrumental paradox



The 32 seasonal temperature series of the HISTALP long series subset in the GAR before (upper graphs) and after (lower graph) homogenization but before EI-bias correction. The "original" series were only subject to outlier correction and completing of gaps. All series are 20-year Gaussian low-pass filtered

- V posledních dekadách 18. století začíná ve střední Evropě mnoho pravidelných meteorologických měření a pozorování, která jsou základem pro získání dlouhých teplotních řad.
- Vysoké teploty tohoto období tedy mohou částečně souviset i s nedokonalou radiační ochranou teploměrů na prvních meteorologických stanicích. Ve střeoevropských řadách korigovali tento efekt Böhm et al. (2010).
- Protože vysoké letní teploty v tomto období nelze jednoznačně identifikovat v proxy-datech, je tento jev označován jako „časný přístrojový paradox“ (early instrumental paradox; Frank et al., 2007).

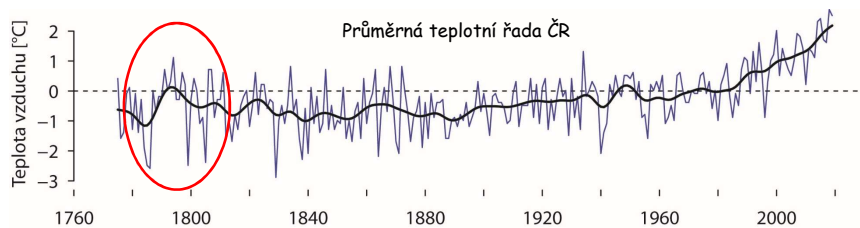
Ad4. Early instrumental paradox



The EI paradox depicted by the graphical comparison between instrumental and proxy data 1722-2004.
 a. Summer (JJA) temperature anomalies of GAR observational data (red; 27 longest stations from HISTALP, Aueret al. 2006) versus tree-ring width data (green; Büntgen et al. 2005) b. Late spring and summer (April-August) temperature anomalies of UST observational data (blue; Bergström and Moberg 2002; Moberg et al. 2002) versus grain harvest data from Austlandet (green; Nordli 2001b). Shown are anomalies from the 1961-90 average (stairs) and their 20-years Gaussian low-pass filtered trends (lines).
 Podle Hiebl (2006).

Ad4. Early instrumental paradox

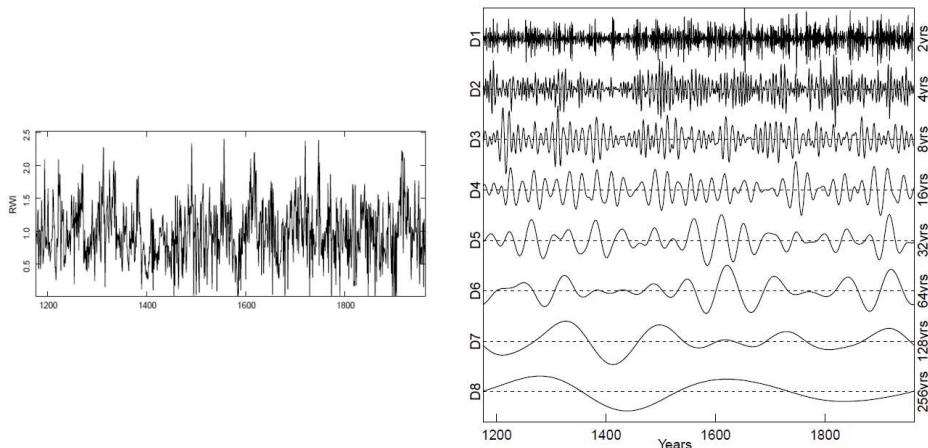
Vysoké teploty kolem roku 1800 však dále zmiňují např. Moberg et al. (2003) ve Skandinávii a v neposlední řadě je lze identifikovat i v teplotní řadě Prahy, Klementina (Brázdil et al., 2012).



- Toto krátké oteplení mělo zřejmě dokonce **globální charakter**, protože ho lze nalézt i v globálních teplotních řadách (Brönnimann, 2015).
- **Hlavními příčinami** oteplení podle tohoto autora byly nárůst sluneční aktivity po ukončení Maunderova minima, absence velkých sopečných erupcí v tropických šířkách, následné oteplení povrchu oceánů a intenzivnější přenos tepla do vyšších zeměpisných šířek, tedy i do Evropy.

Ad5. Frequency response

- Jedním z problémů HRP a obecně celé paleoklimatologie je otázka, do jaké míry proxy-data a z nich sestavené rekonstrukce zachovávají **vysokofrekvenční a nízkofrekvenční signál**.
- Zda jsou schopny zachytit jak meziroční či dekadovou variabilitu klimatu, avšak i dlouhodobá kolísání v řádu stovek či tisíců roků.



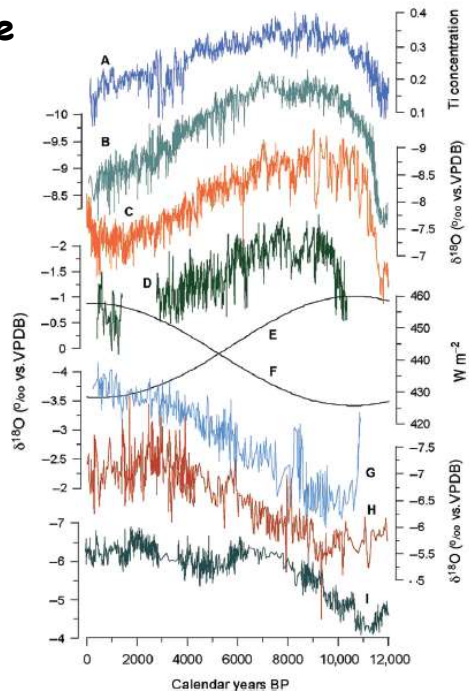
Ad5. Frequency response

- Některé práce prokázaly, že HR proxy mají nízkofrekvenční charakteristiky spektra odlišné od dat z instrumentálního období (lépe: from the spectrum of the climatic environment in which they are situated).
- Souvisí to s faktem, že přírodní proxy data obsahují i variabilitu, která nesouvisí s variabilitou klimatu. Například:
 - Dlouhodobý trend v důsledku biologického růstu (koráli, stromy)
 - Zhutnění jednotlivých vrstev (ledová jádra, sedimenty)
 - Faktory působící během ukládání, avšak nesouvisející s variabilitou klimatu (jezerní sediment, speleotherms)
 - Difuze izotopů jednotlivými vrstvami firnu
- V důsledku uvedených procesů většina proxy-dat potlačuje nízkofrekvenční informaci (dlouhodobé trendy).
- Jednou z mála výjimek jsou speleotherms. Obecně je toto ale velmi vážný problém v paleoklimatologii.



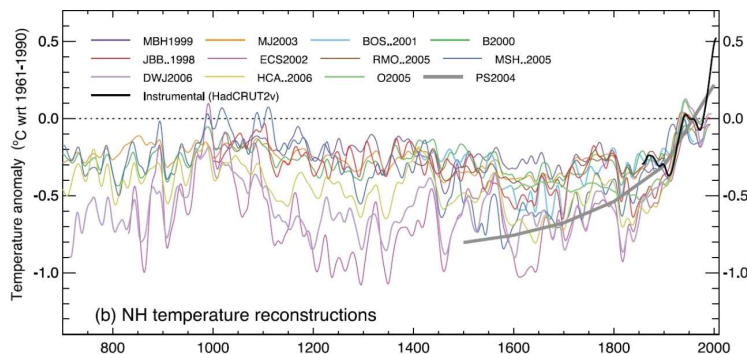
Ad5. Frequency response

Oxygen isotope records from three caves in the Northern Hemisphere and three in the Southern Hemisphere, plus (a) the Cariaco Basin Ti record (Haug et al., 2001). (b) Sanbao Cave, southern China, 31N (Dong et al., 2010); (c) Dongge Cave, central China, 25N (Dykoski et al., 2005; Wang et al., 2005); (d) Qunf Cave, southern Oman, 17N (Fleitmann et al., 2003b); (e) and (f) insolation curves for July at 10N and January at 10S, respectively; (g) Botuvera Cave, southeastern Brazil, 27S (Wang et al., 2006); (h) Cueva del Tigre Perdido, eastern Peruvian lowlands, 7S (van Breukelen et al., 2008); (i) Liang Luar Cave, Indonesia, 8S (Griffiths et al., 2009). From Burns (2011).



Ad5. Frequency response

- Problém je možné do jisté míry řešit aplikací speciálních metod. V dendroklimatologii je takovou metodou např. **RCS (Regional Curve Standardization)** - viz dále)
- Jiným způsobem je např. kombinace různých druhů proxy, které obsahují jak vysokofrekvenční tak nízkofrekvenční signál (Moberg et al. 2005).



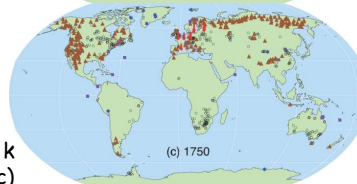
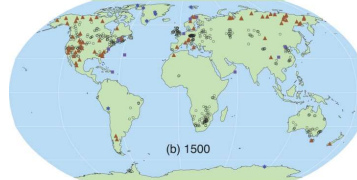
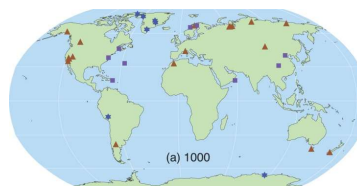
Porovnání několika různých proxy-rekonstrukcí teploty vzduchu severní polokoule (IPCC 2007)

Sporné otázky proxy-rekonstrukcí

- Pro řadu period nemáme důkazy o jejich globálním rozměru, případně je zřejmé, že měly své regionální zvláštnosti (klimatické optimum Holocénu, MWP -> MCA).
- Maxima / minima teplých / chladných období se časově neshodují pro různé části Země
- Relativně jasné příčiny některých událostí (8.2K) vycházejí z dat severní Ameriky, Evropy a severního Atlantiku, nelze je ale potvrdit z dat z tropů.
- Interpretace je často závislá na měřítku - v rámci klimatického optima holocénu se vyskytlo 8.2K event. Toto chladné období trvalo krátce (150 roků s maximálním projevem asi 20 roků), ale také mohlo být součástí chladnějšího období o trvání 600 roků.
- Statistická podstata kalibrace

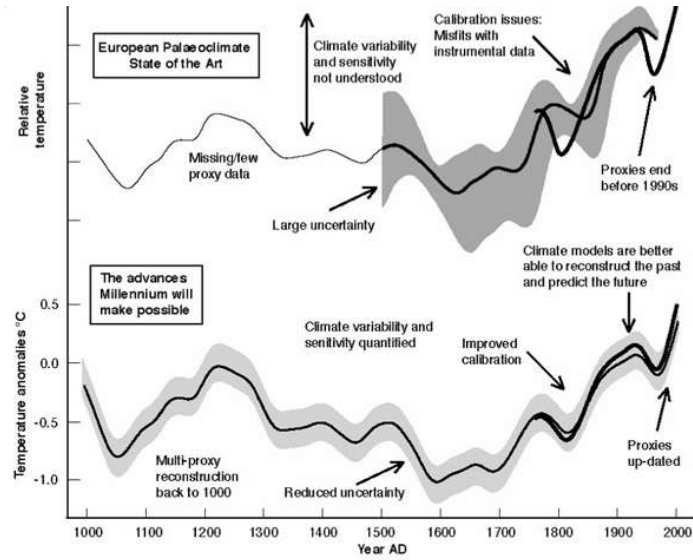
Problémy paleoklimatologie

- Řada HRP rekonstrukcí je založena na dendrochronologiích, které mají problém s principem uniformity, divergencí a také se schopností zachytit nízkofrekvenční signál.
- Proxy údaje jsou stále z relativně omezeného počtu míst
- Problém porozumění informacím obsažených v multi-proxy rekonstrukcích
- Problém příčinné souvislosti (kauzální nexus)



Lokality s různými typy proxy dat využitelných k rekonstrukci klimatu od r. 1000 (a), 1500 (b) a 1750 (c)

Problémy paleoklimatologie



Schematický diagram shrnující omezení (nahore) a cíle (dole) současné paleoklimatologie (podle projektu Millennium)