

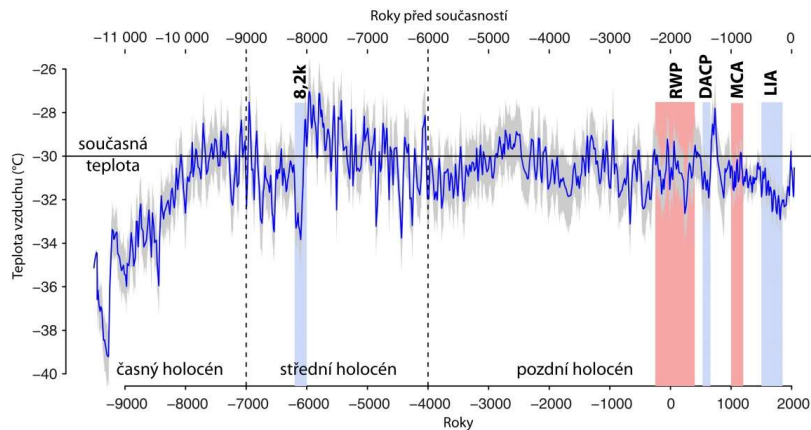
Paleoklimatologie (High resolution paleoclimatology)

V. Vývoj klimatu v holocénu I. (do počátku letopočtu)

Periodizace holocénu

- Existuje několik klasifikačních systémů, které holocén dělí na kratší časová období, žádný z nich nemá univerzální použití.
- Pokud již tyto systémy vymezují jednotlivé fáze holocénu z hlediska vývoje klimatu, mají jen regionální platnost
- **Blytt-Sernanderův klasifikační systém** byl sestaven na základě analýz zbytků rostlin nacházených v rašeliništích severní Evropy a je využíván především k charakterizování vývoje vegetace v holocénu
- Dělí holocén na „chronozones“ **preboreál** (10-9 tisíc let před současností), **boreál** (9-8 tisíc let), **atlantik** (8-5 tisíc let), **subboreál** (5-2,5 tisíc let) a **subatlantik** (2500-současnost).
- Naproti tomu Wanner et al. (2008) či Brooke (2018) dělí holocén na **časný** (11,7-9 tisíc let), **střední** (9-6 tisíc let) a **pozdní** (6 tisíc let-současnost)
- Tři období zdůrazňují pouze hlavní rysy vývoje klimatu v holocénu.
- Při podrobnějším studiu dalších dostupných proxy dat či rekonstrukcí z různých částí severní polokoule se ukazuje jeho **značná časová i prostorová variabilita**.

Periodizace holocénu



Vývoj teplot v holocénu včetně odhadu nejistot rekonstruovaný na základě obsahu izotopů argonu a dusíku v ledovcových jádrech Grónska (GISP2) podle Kobashi et al. (2007). Data dostupná na <https://www.ncdc.noaa.gov/paleo/study/22057>. Fáze časného, středního a pozdního holocénu jsou vymezeny podle Wanner et al. (2008) a barevné sloupce označují chladná, resp. teplá, období zmíněná dále

Periodizace holocénu

Časný holocén (Preboreál a Boreál, cca 11,7-9 tisíc let) - postupné rychlé oteplování jako reakce na vývoj orbitálních parametrů - koincidence precesního pohybu a sklonu zemské osy vedly k nejvyšším hodnotám insolace v létě severní polokoule ve vysokých zeměpisných šířkách. Oteplování bylo zpomalováno ochlazujícím vlivem stále ještě rozsáhlého zalednění. Oteplení ve vysokých šířkách, zvýšená humidita ve středních a nízkých z.š.

Střední holocén (Atlantik 9-6 tisíc let) - Hypsithermal, Altithermal, climatic optimum - stále vysoké úhrny slunečního záření v důsledku orbitálních parametrů, rozpadu pevninského zalednění a působení zpětných vazeb (zmenšení zalednění a nárůst vegetace - nižší albedo)

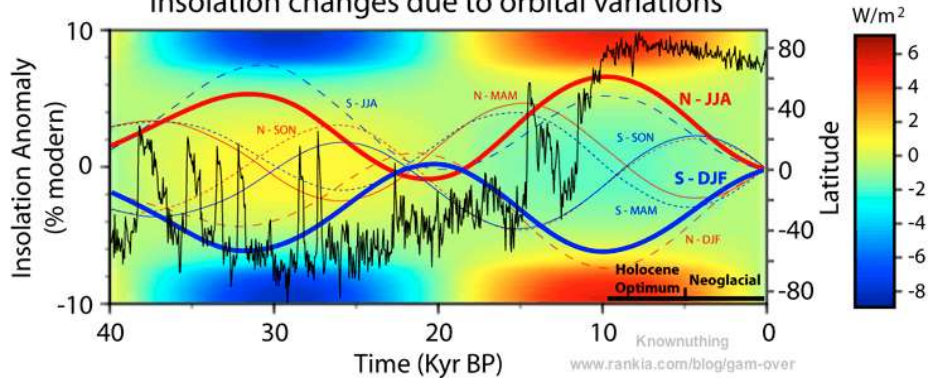
Pozdní holocén (Subboreál a Subatlantik, 6 tisíc let-před-industriální období) - Neoglaciál - postupné ochlazování v důsledku poklesu insolace ve vysokých šířkách NH s několika výraznými fázemi rozšiřování ledovců, vysušování v nižších šířkách

Na **globální úrovni** tyto fáze odpovídají vývoji hlavních **klimatotvorných faktorů**,

Na **regionální** a lokální úrovni však proxy-data ukazují řadu specifických rysů vývoje klimatu, které jsou projevem **zpětných vazeb** v klimatickém systému a jeho **vnitřní variabilitou**.

Vývoj podle klimatotvorných faktorů

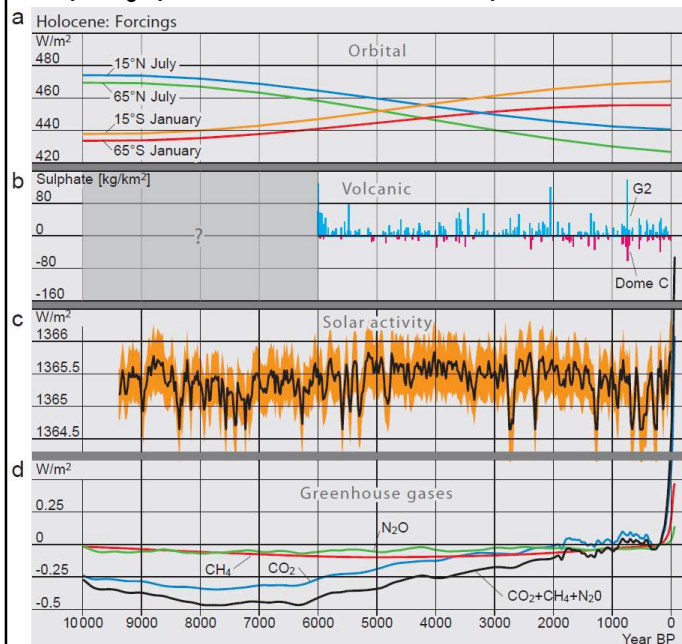
Insolation changes due to orbital variations



Změny v množství insolace pro roční období na severní a jižní polokouli (tučně je léto N a S polokouli). Černá čára - teploty podle $\delta^{18}\text{O}$ (NGRIP Greenland ice cores). Barevná škála ukazuje kolísání v insolaci v závislosti na čase a zeměpisné délce v důsledku změn ve sklonu zemské osy

This figure essentially shows how global temperature changes respond mainly to persistent changes in insolation caused by changes in obliquity that are symmetrical for both poles. Changes in seasonality insolation caused by the precession cycle (modified by eccentricity) are asymmetric and less important for the global response, although they cause profound changes in regional climatic differences. The Holocene Climatic Optimum corresponds to high insolation surplus in polar latitudes (red area), while Neoglacial conditions represent the first 5,000 years of a 10,000 year drop into a high glacial insolation deficit in polar latitudes (blue area).

Vývoj podle klimatotvorných faktorů



Main forcings during the Holocene. (a) Solar insolation owing to **orbital-induced insolation changes** for two specific regions in the Northern and Southern Hemispheres during the corresponding summer (Berger & Loutre 1991). (b) **Volcanic forcing** during the past 6 ka depicted by sulphate concentrations of two ice cores from Greenland (blue vertical bars) and Antarctica (red vertical bars; Wanner et al. 2008). (c) **Solar irradiance** fluctuations and 1σ uncertainty (yellow band) reconstructed based on ^{10}Be measurements in polar ice (Steinhilber et al. 2009). (d) Forcing anomalies owing to the **atmospheric concentration of the important greenhouse gases** CO_2 , CH_4 and N_2O (compiled by Joos & Spahni 2008).

(Wanner et al., 2014)

Vývoj klimatu v časném a středním holocénu

- Rekonstrukce globální teploty ukazují, že rozdíl mezi teplotou maximální fáze posledního glaciálu a teplotou v současnosti byl 5 °C pro celou Zemi
- V mírných zeměpisných šířkách Evropy tento rozdíl činil 10-12 °C a ve vyšších šířkách v oblasti Grónska dosáhl až 20 °C (**polar amplification**).
- Po skončení glaciálu během časně fáze holocénu teploty výrazně rostly a již v průběhu této fáze dosáhly parametry zemské dráhy hodnot, které by odpovídaly maximálním úhrnům slunečního záření v létě na severní polokouli.
- Postupný nárůst teplot v tomto období však byl zpomalován ochlazujícím účinkem ustupujícího kontinentálního zalednění ve vysokých zeměpisných šířkách, které přetrvávalo až do doby kolem 6000 let před současností (Mélières, Maréchal, 2015).
- To je jeden z důvodů, proč tzv. **klimatické optimum holocénu** s nejvyššími teplotami připadlo až na období středního holocénu (Nesje, Dahl, 1993; Wanner et al., 2008), tedy na období, během kterého již úhrny slunečního záření podmíněné orbitálními parametry Země postupně klesaly.

Časný holocén

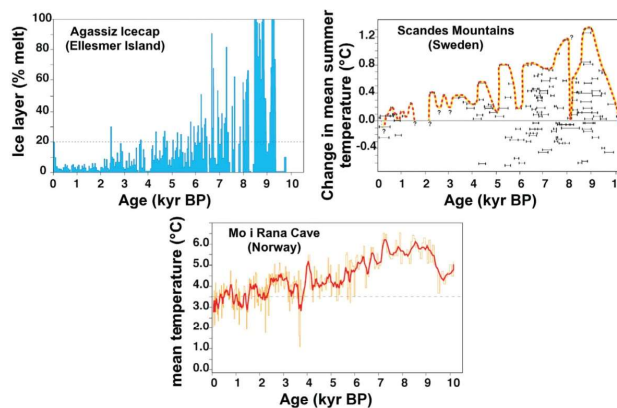


Fig. 22.1 Evidence of overall cooling at high latitudes in the Northern Hemisphere during the Holocene: (top left) reduction in the number of summer melting episodes of the small ice sheet in Ellesmere Island, Canada (Koerner and Fisher 1990); (top right) reduction in summer temperatures in the Scandes (Sweden), reconstructed from changes in altitude of the pine forest (data from Dahl and Nesje 1996); (bottom) the reduction in global mean temperature deduced from isotopic measurements in a stalagmite in the Mo i Rana cave, Norway (Lauritzen and Lundberg 1998).

Source: Bradley et al. (2003). Reproduced with permission from Springer Science+Business Media and R.S. Bradley.

Climate Change: Past, Present and Future, First Edition, Marie-Antoinette Mélières and Chloé Maréchal.
© 2015 John Wiley & Sons, Ltd. Published 2015 by John Wiley & Sons, Ltd.
Companion website: www.wiley.com/go/melijeres/climatechange

Časný holocén

CLIMEX - CGWM

BVVL1999

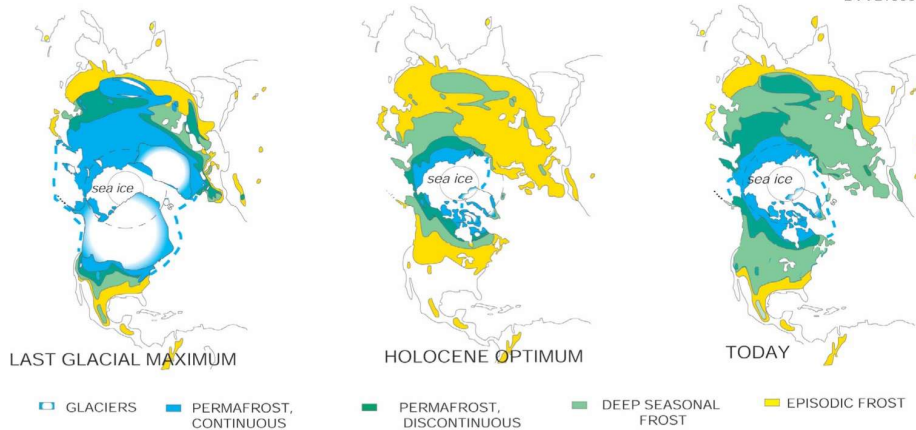


Fig. 22.2 Changes in permafrost between glacial and interglacial stages: (left) the last glacial maximum, about 20,000 years ago; (middle) the Holocene Climatic Optimum (9000–5000 years ago); and (right) the 20th century.

Source: Van Vliet-Lanoë and Lisitsyna (2001). Reproduced with permission from Springer Science+Business Media and Brigitte Van Vliet-Lanoë.

Climate Change: Past, Present and Future, First Edition. Marie-Antoinette Mélières and Chloé Maréchal.
© 2015 John Wiley & Sons, Ltd. Published 2015 by John Wiley & Sons, Ltd.
Companion website: www.wiley.com/go/melieres/climatechange

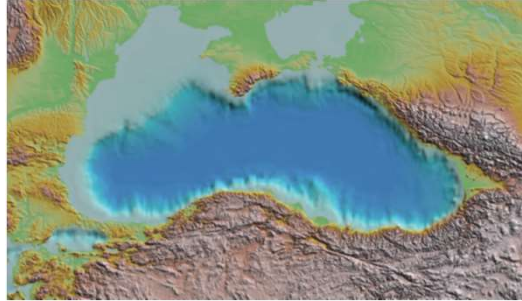
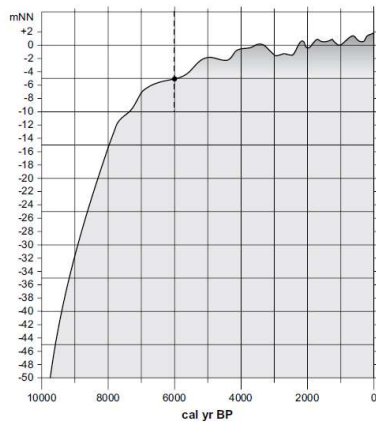
8.2k event

Vývoj klimatu v holocénu v důsledku vzájemného působení klimatotvorných faktorů byl jen obecným rámcem, který byl komplikován výskytem chladných/teplejších a sušších/vlhčích období.



- 8.2k cold event (6.2BC), Lake Agassiz
- 3.5k BC - end of the Green Sahara,
- 3.3k BC Iceman Ötzi, Copper Age and Piora event
- 4.2k dry event (2.2 BC), Akkadian Empire
- 1.2BC, Late Bronze Age collapse
- 900-cca 300 BC, Iron Age Cold Epoch
- 325 BC, Pytheas of Massalia, Thule Island

Změny hladiny oceánu



Now part of the Black Sea, the areas shown in grey were dry land until a flood some 8,000 years ago.

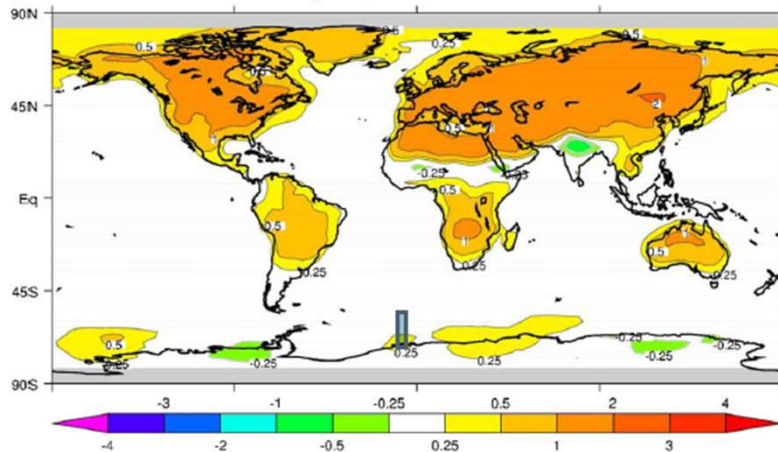
Sea level changes in the area of the southern North Sea (modified after Behre, 2003). NN means "Normalnull". It is the classical German reference level, defined by the average at the Amsterdam North Sea gauge.

Klimatické optimum holocénu

- „hypsithermal“ či „altithermal“ period
- Klimatické optimum středního holocénu podle Blytt-Sernanderova klasifikačního schématu odpovídá **teplému období atlantiku**.
- Oteplení bylo patrné především v severní Evropě a obecně ve vyšších zeměpisných šířkách, méně v jižní Evropě (Davis et al., 2003; Kaufman et al., 2004).
- Ve střední Evropě byly průměrné teploty vyšší než v současnosti a klima bylo také znatelně vlhčí.
- Například podle rekonstrukcí založených na pylové analýze byly červencové teploty ve střední Evropě vyšší asi o 4 °C oproti současnosti (Huntley, Prentice, 1988).
- Na základě studia kvartérních sedimentů a půdní stratigrafie byly v klimatickém optimu holocénu průměrné roční teploty na našem území asi o 3 °C vyšší (Czudek, 2005) a srážkové úhrny zhruba dvojnásobné (Ložek, 1999) v porovnání se současností.

Klimatické optimum holocénu

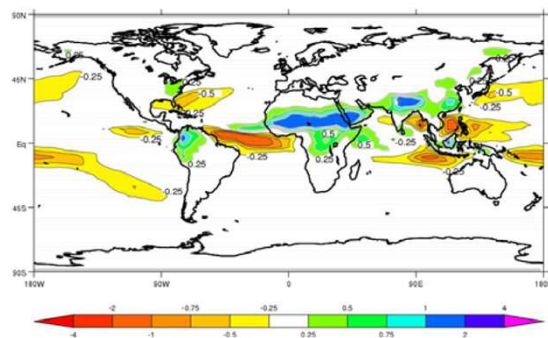
Anomálie teploty středního holocénu



Ensemble mean of PMIP2 simulations: JJAS mean surface air temperature (C) and precipitation (mm/day) differences between Mid-Holocene and preindustrial (0 ka). Braconnot et al. (2007)

PMIP2 - Paleoclimate Modelling Intercomparison Project

Klimatické optimum holocénu



Difference of precipitation (mm/d) between Mid-Holocene (6000 yr BP) and preindustrial conditions for the ensemble mean of PMIP2 simulations. Figure from Braconnot et al. (2007).

(Goosse, 2014)

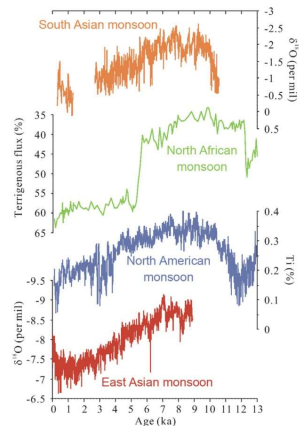


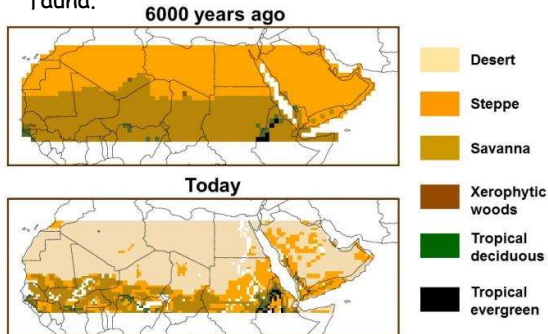
Fig. 22.3 The changes in monsoon intensity on the three continents during the Holocene, as recorded by different proxies. The intensity of the monsoon is at a maximum in the first half of the Holocene. The South Asian monsoon trace shows the $\delta^{18}\text{O}$ signal from a stalagmite in the Oufri cave in south Oman (Fleitman et al. 2003). The West African monsoon trace shows terrigenous deposits (in %) in the tropical Atlantic Ocean sediment off the West African coast (deMenocal et al. 2000). The North American monsoon trace shows titanium, Ti (%) in the layered deposits of the Cariaco basin off the coast of Venezuela, revealing input from rivers due to the hydrological cycle (Haug et al. 2001). The East Asian monsoon trace shows the $\delta^{18}\text{O}$ signal from a stalagmite in the Dongge cave in South China (Wang et al. 2005).

Source: Wang et al. (2009). Reproduced by permission of PAGES News.

Climate Change: Past, Present and Future, First Edition. Marie-Annoisere Mèlières and Chloé Marchal
© 2015 John Wiley & Sons, Ltd. Published 2015 by John Wiley & Sons, Ltd.
Companion website: www.wiley.com/go/melieres/climatechange

Humidní období v Africe

- V důsledku zesílení afrického monzunu (max. TSI v létě severní polokoule) převládalo v Africe vlhké humidní období od 16 000 do 5 000.
- Sahara byla „zelená“, četná jezera a typická fauna.



Vegetation in Africa at 6,000 years ago and today from Hoelzmann et al. (1998). Prior to about 5,000 years ago, vegetation had expanded across what is now the Sahara desert.

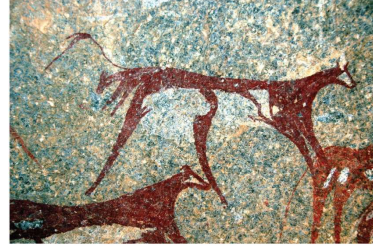
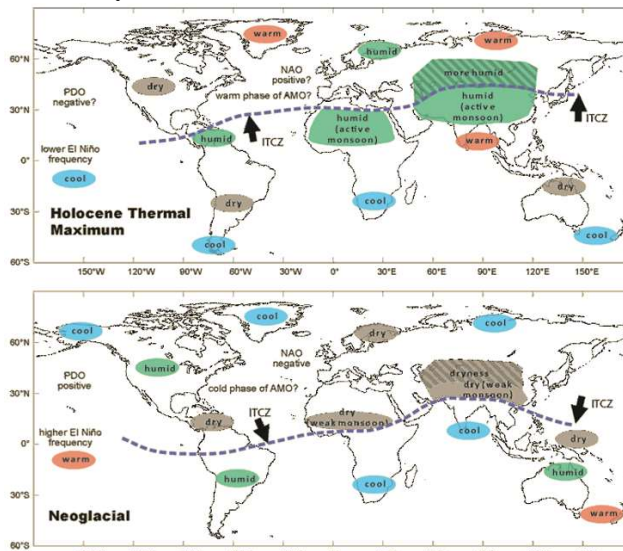


FIG. 22.4 (a) Cave paintings in Djebel Aweinat (south-east Libya), now a desert region, indicating neolithic pastoral activity during the wet phase of the Holocene. (b) Erosion sediments in north Mali, now a desert region, showing lake deposits that existed during the wet phase of the first half of the Holocene.

Source: (a) Thierry Tillet. Reproduced with permission (b) © CNRS Photothèque/Nicole Petit-Maire.

Climate Change: Past, Present and Future, First Edition, Marko-Aminette Milières and Chloé Marchal. © 2015 John Wiley & Sons, Ltd. Published 2015 by John Wiley & Sons, Ltd. Companion website: www.wiley.com/go/indlers/climatechange

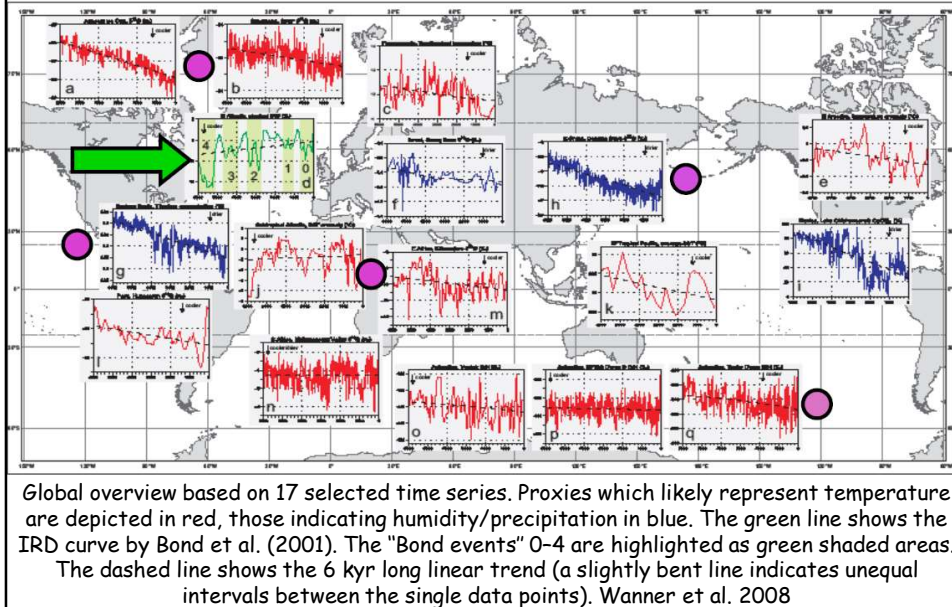
Příčiny humidního období v Africe



The shift from the Holocene Thermal Maximum to the Neoglacial involved a complete reorganization of the Earth's climate, mainly directed by the southward migration of the Intertropical Convergence Zone (ITCZ) and the weakening of the African, Indian and Asian summer monsoons Source: H. Wanner & S. Brännimann, 2012, PAGES news 20, 44-45.

- Poté, co insolace na severní polokouli v létě začala klesat, došlo k postupnému posunu letní polohy ITCZ k jihu, postupnému poklesu srážek v oblasti kolem 30° s.z.š. a vysušování klimatu.
- Postupné ochlazení léta na severní polokouli a zmenšování teplotního gradientu pól - rovník v oceánu vedlo k zvýšení variability ENSO.

Pozdní holocén - neoglaciál



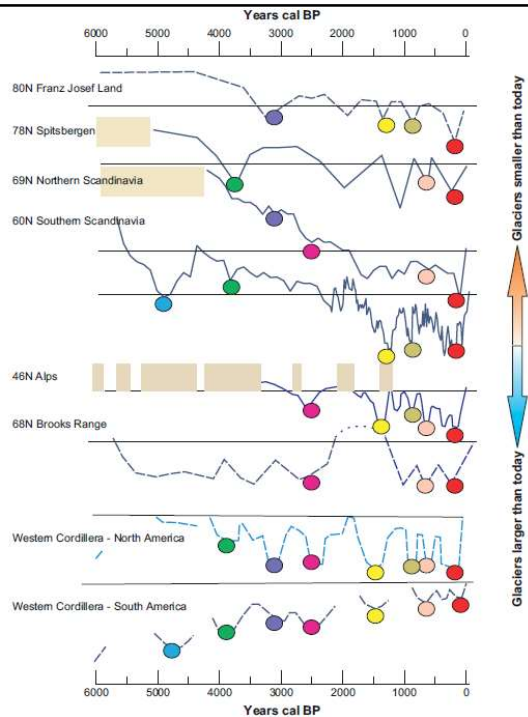
Pozdní holocén - neoglaciál

- Během posledních 6000 let se Země postupně mírně ochlazovala, což se zřetelněji projevilo především ve vyšších zeměpisných šířkách
- V severní Evropě, kde bylo zaznamenáno několik období rozšiřování, ale i následného ústupu, ledovců (Denton, Karlén, 1973; Nesje, Dahl, 1993).
- Postupné ochlazování dalo nejmladší fázi holocénu označení „neoglaciál“ a je v souladu s postupnou změnou orbitálních parametrů Země (Wanner et al., 2008).
- V porovnání s předchozími fázemi holocénu se však jedná o období relativně stabilního klimatu se střídáním teplých/chladných a vlhkých/suchých období.
- Počátek subboreálu (5-2,5 tisíc let BP) byl zřejmě ještě o cca 1 °C teplejší než současnost (Czudek, 2005)
- Postupné ochlazování pokračovalo během subatlantiku (2.5 tis. let BP), kdy bylo klima zřejmě také vlhčí (Ložek, 1999).
- To nepřímě dokládá také zvýšená četnost sesuvů na území ČR i Polska.

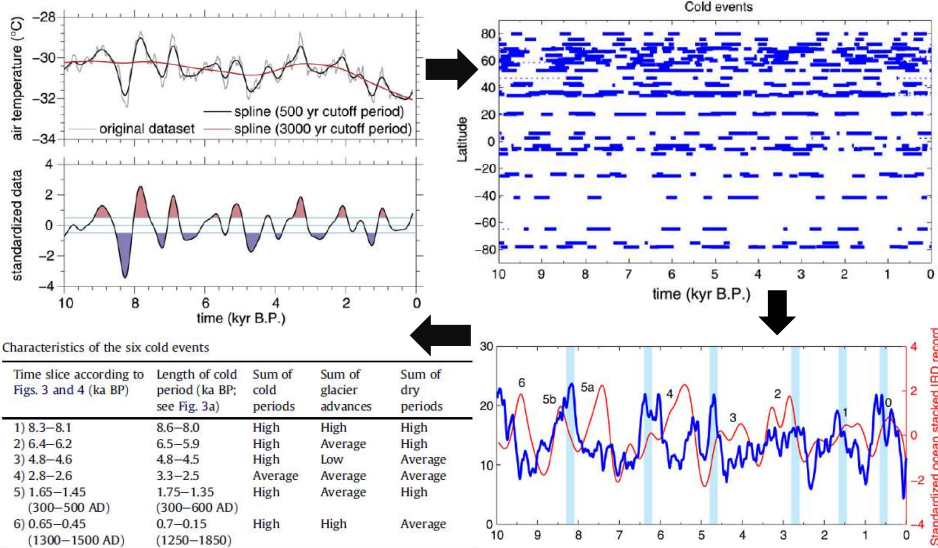
Pozdní holocén - neoglaciál

Timing and relative scale of eight time series of glacier advances and retreats during the last 6000 years, covering important glacial regions of the globe. Most series, except for the two Scandinavian curves, are discontinuous because they are based on geomorphic evidence. For easier interregional comparison all series are presented as curves. The curve for the Alps is the best constrained by documentary and tree-ring data, especially for the last 3500 years (Holzhauser et al., 2005). Except for the Alps and Scandinavia, the precise periods of the glacier retreats are not known and are shown on the picture arbitrarily. The coloured dots mark possible simultaneous Neoglacial advances. The brown shaded areas indicate indirect evidence (wood above the modern tree limit, buried soils etc.).

(Wanner et al. 2008)

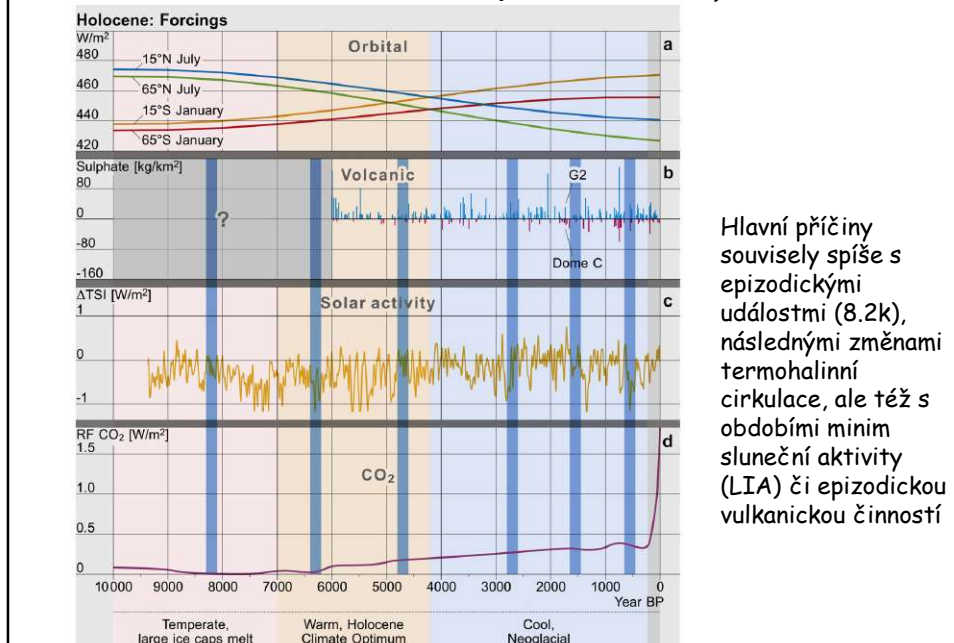


Chladná období holocénu (Wanner et al. 2011)



Šest chladných období (8200, 6300, 4700, 2700, 1550 and 550 years BP), která neukazují na cyklické chování, spíše na různé příčiny.

Chladná období holocénu (Wanner et al. 2011)



Rychlé změny klimatu v Holocénu (Mayewski et al. 2004)

Na základě padesáti řad proxy identifikovali šest období rychlých změn klimatu (RCC - Rapid Climate Change):

- 9000–8000 cal yr B.P. - 8.2k
- 6000–5000 - cool poles, dry tropics RCCs
- 4200–3800
- 3500–2500
- 1200–1000
-
- 600–150 - malá doba ledová - cool poles, wet tropics RCC

Většina z nich je charakteristická ochlazením ve vysokých z. š. a ariditou v tropických z.š. a změnami atmosférické cirkulace

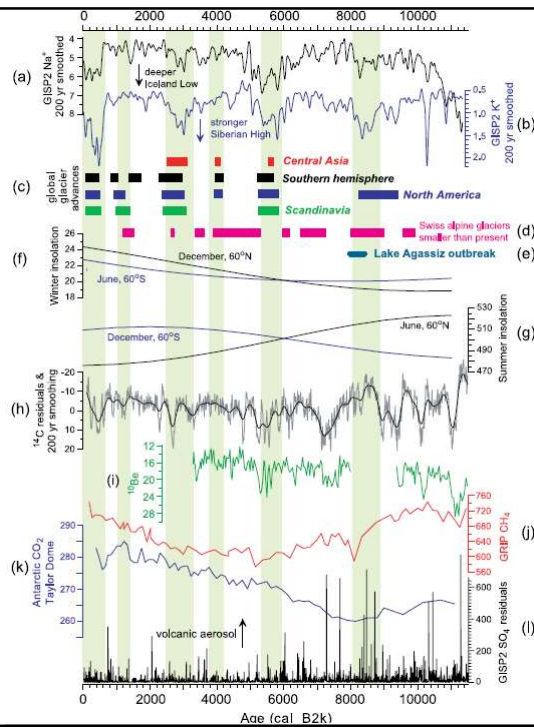
Avšak během poslední RCC (Malá doba ledová) bylo v tropech humidní klima

Některé z těchto období korespondují s civilizačními krizemi (disruption)

Rychlé změny klimatu v Holocénu

Climate forcing series and globally distributed discontinuous glacier advance records plus GISP2 proxy for atmospheric circulation, included as a continuous record example. Green bands represent timing of RCC tuned to high-resolution GISP2 record.

(Mayewski et al. 2004)



Poslední 3 milénia

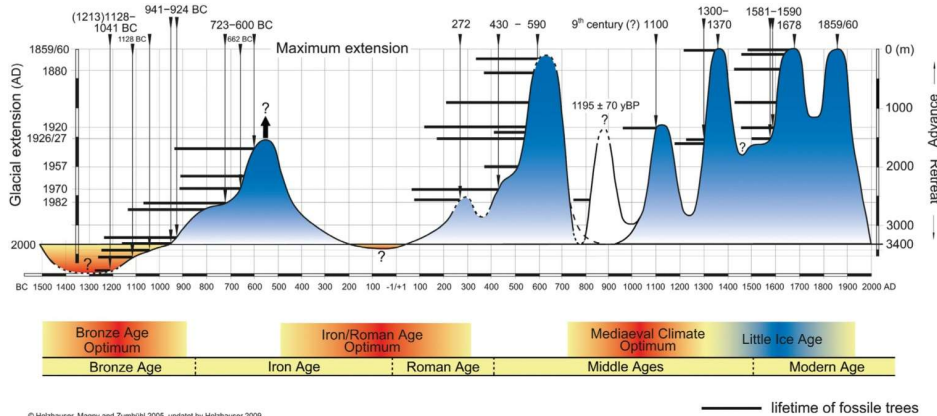


Fig. 22.9 The variations in the length of the Aletsch glacier (Swiss Alps) over the past 3000 years (reconstructed). The maximum length occurred during the Little Ice Age, between the 14th and 19th centuries. Since 1850, the glacier front has retreated by more than 3 km. The left-hand scale shows the length of the glacier at different periods. Horizontal lines indicate the lifespan of tree trunks that have been discovered.

Source: Holzhauser (2009). Reproduced with permission of Hanspeter Holzhauser.

Climate Change: Past, Present and Future, First Edition. Marie-Antoinette Mélières and Chloé Maréchal.
© 2015 John Wiley & Sons, Ltd. Published 2015 by John Wiley & Sons, Ltd.
Companion website: www.wiley.com/go/melieres/climatechange

Nejasné rysy vývoje klimatu v holocénu

- Některé rekonstrukce klimatu Evropy na základě pylové analýzy indikují, že oteplení ve středním holocénu bylo větší v zimě než v létě (Mauri et al., 2015),
- To však nelze vysvětlit tradiční interpretací Milankovičovy hypotézy ani současnými modelovými simulacemi.
- Regionální rozdíly ve vývoji klimatu během holocénu i závěry některých studií tedy naznačují, že v tomto složitém vývoji hrály vedle vývoje orbitálních parametrů Země významnou roli také další přirozené klimatotvorné faktory
- Především **sluneční aktivita** (Beer, Geel, 2009; Turner et al., 2016), **vulkanická činnost** (Kobashi et al., 2017), **vnitřní variabilita** klimatického systému (Goslin et al., 2018) a pravděpodobně i **antropogenní faktor** (Ruddiman et al., 2016).