

Paleoklimatologie (High resolution paleoclimatology)

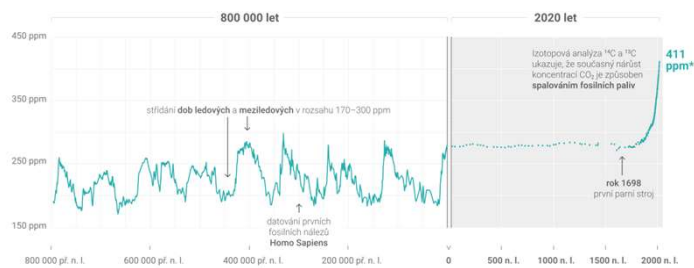
II. Příčiny kolísání a změn klimatu v holocénu

Druhy rekonstrukcí klimatu

Paleoklimatologie se může zabývat proxy-rekonstrukcemi:

- klimatotvorných faktorů
- meteorologických prvků (T, S)
- klimatologických charakteristik (PDSI, NAO)
- hydrometeorologických extrémů

V (paleo)klimatologii je často důležitější najít odpovědi na otázku **Proč?** než **Jak moc?**

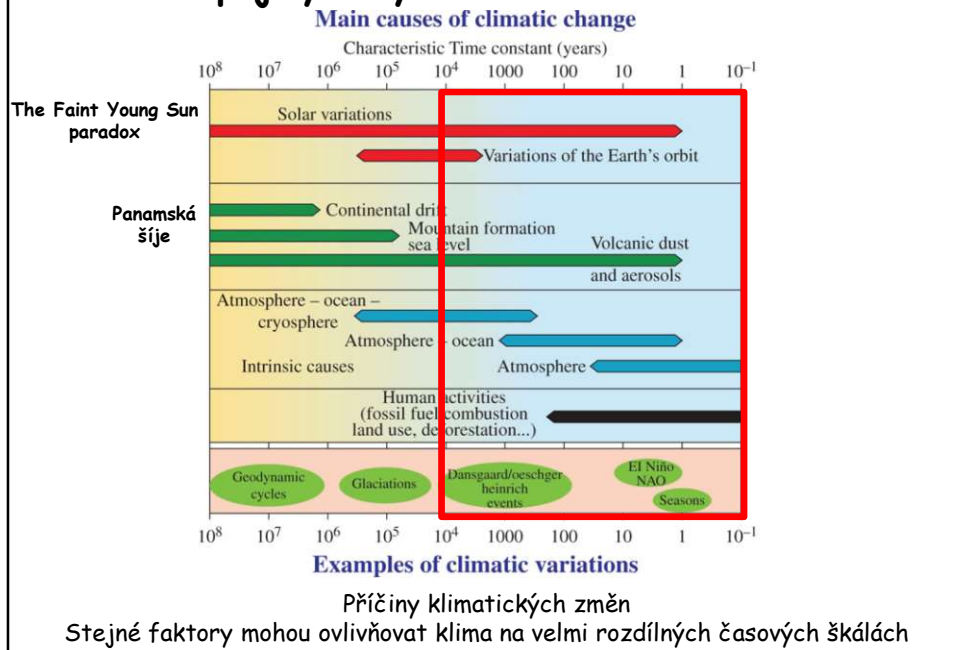


* V květnu 2020 dosáhly koncentrace CO₂ dosavadního maxima **417 ppm**
Hodnoty koncentrace CO₂ pocházejí z analýzy ledovcových vrstev EPICA v Antarkidě a z přímých měření na Mauna Loa, Havaj

VERZE 2.0
více info na faktoaklimatu.cz/koncentrace-co2

zdroj dat: NOAA – Národní úřad pro oceán a atmosféru Ministerstva obchodu Spojených států amerických

Základní pojmy a východiska

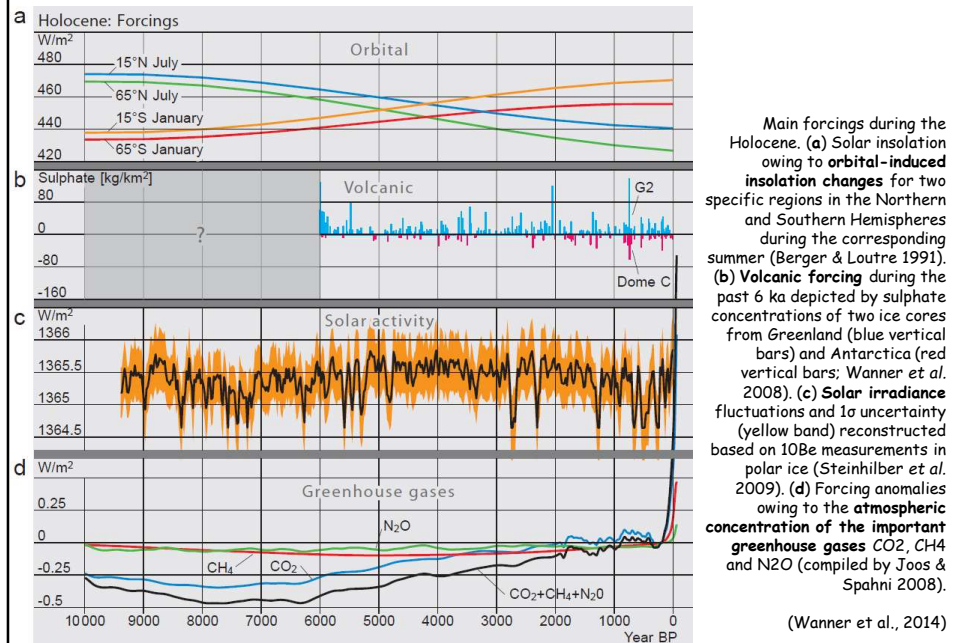


Příčiny kolísání a změn klimatu v holocénu

- Z hlediska změn klimatu v holocénu nás zajímají především změny orbitálních parametrů Země, změny v intenzitě slunečního záření a vulkanická činnost
- Tyto přirozené faktory zároveň dobře ukazují, jak lze výslednou variabilitu klimatu rozložit do několika časových škál či měřítek (Bradley, 2005, Mélières a Maréchal 2015).
- Vývoj klimatu v holocénu je superpozicí tří trajektorií:
 1. Postupné změny parametrů orbity v řádu 10^4 - 10^5 roků
 2. Změny v intenzitě slunečního záření v řádu 10^2 - 10^3 roků
 3. Změny v intenzitě vulkanické činnosti v řádu jednotek či desítek roků.

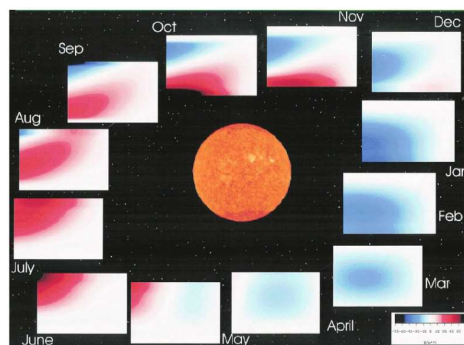
Během (pozdního) holocénu a především posledních dvou tisíc let lze okrajové podmínky pro kolísání a změny klimatu považovat za stále (uspořádání kontinentů, orografie), nebo se významně nezměnily (orbitální parametry, rozsah kontinentálních ledovců).

Příčiny kolísání a změn klimatu v holocénu



Změny orbitálních parametrů

- Na nejdelší časové škále formovaly klima holocénu především změny orbitálních parametrů, které shrnuje astronomická hypotéza M. Milankoviče.
- Změny excentricity, sklonu zemské osy a precesního pohybu nesouvisí se změnou v množství sluneční energie dopadajícího na horní hranici atmosféry (insolace), ale především s její re-distribucí během ročních období a také s její redistribucí v poledníkovém směru (od rovníku k pólům).



Schematic representation of insolation anomalies at the top of the atmosphere, relative to 1950 levels. Anomalies are colour-coded in Wm^{-2} . Each monthly panel shows (on the x-axis): changes from 10,000 calendar years B.P. (left) to today (right), and on the y-axis: latitude, from 90°N at the top, to 90°S at the bottom (figure prepared by A. Waple).

Změny orbitálních parametrů

- Zatímco před 10 tis. roky připadalo léto na severní polokouli v důsledku precesního pohybu na pozici Slunce v **přísluní**, nyní je to v **odsluní**.
- Teplá léta na NH na počátku Holocénu jsou nyní vystřídána teplými léty na SH.
- Insolace v létě na NH dosahovala maxima před 10ky, následně klesala a je blízko minima. Insolace v zimě na NH a v létě na SH postupně rostly.
- Důsledky: Postupně se ochlazující léta na NH se projevují **změnami ve složení vegetace**. Výrazně se **změnily srážky v tropech a subtropích**.
- Zvláště ve vyšších zeměpisných šířkách byl vývoj také ovlivněn existencí Laurentinského ledovcového příkrovu, který přetrval do cca 7ka.
- V nižších zeměpisných šířkách došlo k postupnému zeslabení monzunů na NH a ITCZ se postupně posunula k jihu (viz dále)

Změny orbitálních parametrů



- Přilehlé severní oblasti byly ochlazovány v důsledku velkého albeda a vysoké nadmořské výšky.
- Tento vliv tlumil efekt vysoké izolace na počátku Holocénu. V důsledku toho připadlo **klimatické optimum Holocénu** v těchto oblastech až na období 7-4 ka.
- Postupné změny orbitálních parametrů přerozdělení v intenzitě slunečního záření se projevily **postupnými změnami v druzích povrchů**
- Na základě pylových analýz bylo zjištěno, že lesy ve Skandinávii byly rozšířeny i v oblastech, kde se v současnosti nachází tundra.

Změny orbitálních parametrů

- Ve směru poledníku - jižněji 50. rovnoběžky se výrazně oteplilo od počátku holocénu do 8ka, pak byly teploty relativně stabilní.
- V tropech se změny v důsledku insolace projevily posunem ITCZ a změnami intenzity monzunů.
- ITCZ má tendenci sledovat Slunce, tedy v důsledku precesního pohybu Slunce tomu odpovídajících změn letních teplot se ITCZ a s ní související pásmo silných konvektivních srážek posunuly v průběhu Holocénu k jihu.

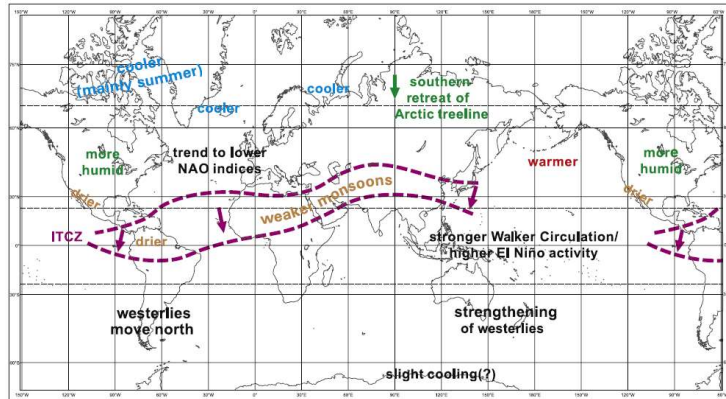
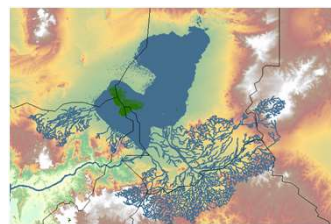


Fig. 18. Spatial synthesis: global climate change for the preindustrial period (AD -1700) compared to the MH (~6000 cal years BP).

Wanner et al. (2008)

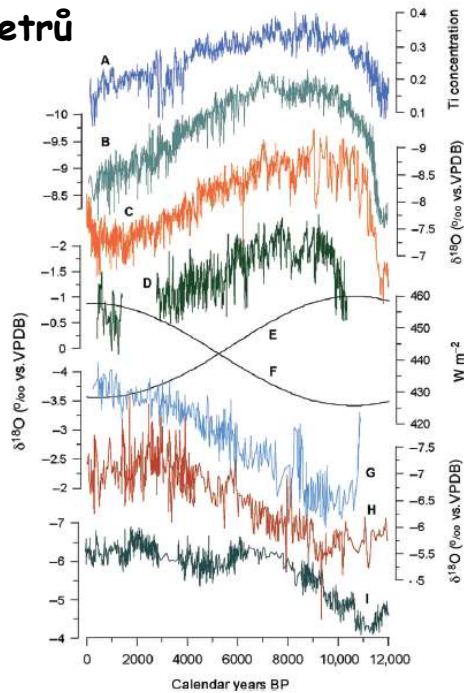
Změny orbitálních parametrů

- Monzunová cirkulace se lépe vyvíjí, jestliže se zemský povrch v létě zahřeje více než přilehlý oceán.
- Vysoká insolace na počátku Holocénu tak způsobila silnější monzun na NH. To potvrzují proxy z mořských sedimentů, hojnější dírkovci v důsledku silnějších výstupních proudů (jako reakce na silnější proudění vzduchu), nižší salinita, složení vegetace (palynologie), speleothems v Ománu.
- Z řady dalších proxy je patrná vlhká perioda 10-5 ka. Intenzifikace monzunu v JV Asii. $\delta^{18}O$ postupně roste během Holocénu, což potvrzuje postupné slábnutí monzunové cirkulace. Na SH je to opačně.
- Severní Afrika - silný monzun 14-5 ka, větší srážky z Atlantiku, existence jezer (Lake Megachad), menší přenos prachu větrem, větší odtok. Bohatá fauna a flóra.



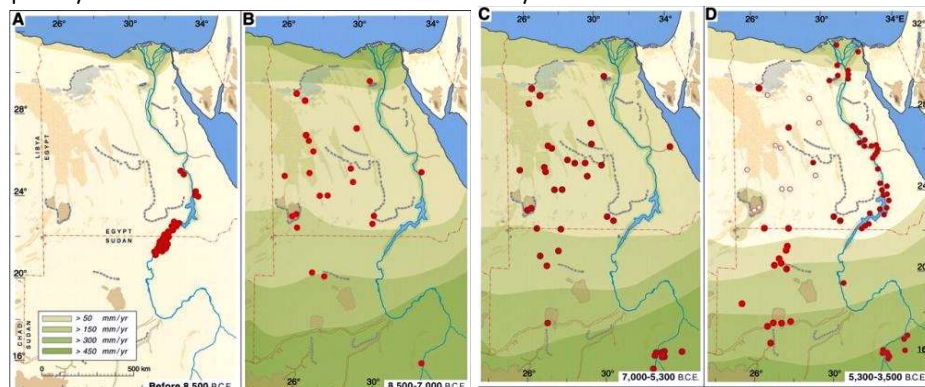
Změny orbitálních parametrů

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).



Změny orbitálních parametrů

Před 10.5 ka jsou lidská sídla omezena na údolí Nilu, do doby 7.4 ka se sídla rozšířila do přilehlých oblastí Z od Nilu. 7.4 až 5.6 ka - omezený rozsah sídelních oblastí.



Climate-related settlements in the eastern Sahara through the major phases of the Holocene. Red dots indicate main resettlement areas, white dots indicate more isolated settlements in climatic refuge locations and cyclical shifts of pastures. Precipitation zones are indicated by green nuances in the light of best estimates based on geological, archaeological and archaeo-botanical data.

(A) During last Glacial Maximum and late Pleistocene, that is 20,000 to 8,500 BC (22,000 to 10,500 years before present) the Sahara desert was devoid of any settlement outside the Nile Valley, and the desert stretched 400 km. farther south, than it does today.

(B) With the sudden onset of monsoon rain around 8,500 BC, the hyper-arid desert was replaced by savannah-like landscapes, which quickly became inhabited by prehistoric people. In the early Holocene optimum southern Sahara and the Nile Valley were apparently too humid and dangerous for appreciably human settlement.

(C) Around 7,000 BC human settlements have been well established throughout eastern Sahara, where they created a cattle-nomadic culture.

(D) Decreasing monsoon rain caused a beginning drying out of the Egyptian part of the Sahara around 5,300 BC. The prehistoric people were forced to seek into the Nile Valley, settling in oases or to emigrate to the Sudanese Sahara, where rainfall and surface water was still sufficient. Sahara's return to actual desert conditions about 3,500 BC coincided with the initial stages of Egyptian civilization in the Nile Valley. - Kuper and Kröpelin (2006).

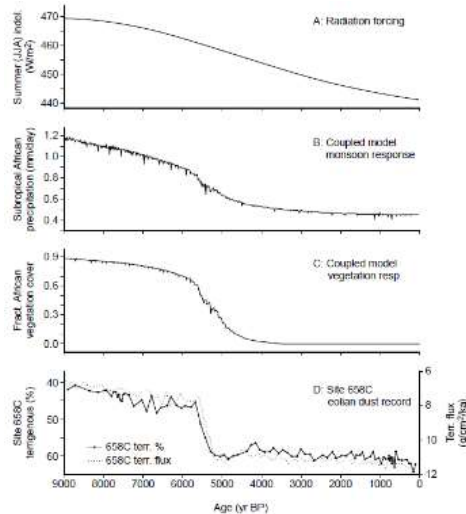
Změny orbitálních parametrů a zpětné vazby

- Podle Bradleyho (2005) neexistuje jednoduchý vztah mezi změnami v insolaci v důsledku změn v orbitálních parametrech (astronomickou hypotézou) na jedné straně a konkrétním vývojem klimatu na straně druhé.
- Sluneční záření je v atmosféře a na zemském povrchu významně transformováno (re-distribuíváno) v důsledku řady zpětných vazeb v klimatickém systému.
- Tato přerozdělení energie bylo navíc regionálně specifické.
- V prvé řadě pohlcování, rozptyl a odraz slunečního záření závisí na **typu a množství oblačnosti**.
- Na zemském povrchu je pak důležité **albedo** závisící na hlavních druzích aktivních povrchů
- Především v nižších zeměpisných šířkách hraje roli **evapotranspirace** a obsah vodní páry jako hlavního radiačně aktivního plynu.

Změny orbitálních parametrů a cirkulace

- Intenzivní insolace na severní polokouli a faktory přerozdělující energii slunečního záření způsobily **větší rozdíly v zahřívání** povrchu souše a oceánů.
- Následkem toho došlo ke **změnám v cirkulaci**, jejichž hlavním projevem byla zřetelně intenzivnější monzunová cirkulace na severní polokouli během časného holocénu.
- Vedle změn v monzunové cirkulaci se změnil horizontální teplotní gradient mezi rovníkem a polárními oblastmi, což **ovlivnilo planetární cirkulaci** (Hadleyho buňka).
- Během středního holocénu došlo k zintenzivnění západního přenosu v zimě (pozitivní fáze NAO) a naopak zeslabení v létě (negativní fáze AO/NAO) s četnějším výskytem blokujících anticyklón (Mauri et al. 2014)

Změny orbitálních parametrů a role vegetace



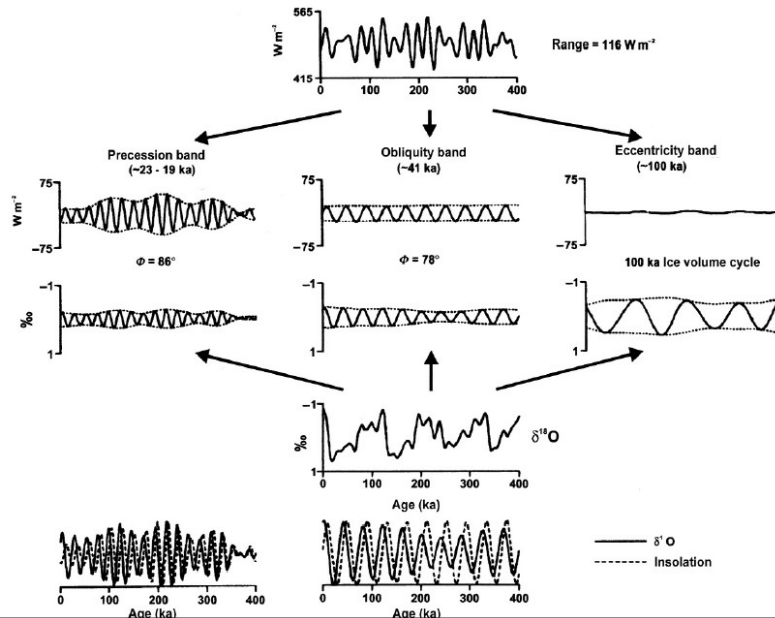
Model simulations (Claussen *et al.*, 1999) of the response of North African precipitation (b) and fractional vegetation cover (c) compared to radiation forcing - summer (JJA) radiation at 20°N (a) and the record of eolian (Saharan) dust in a sediment core from off the west coast of North Africa (deMenocal *et al.*, 2000a). The model incorporates vegetation feedbacks that seem to be important in generating a non-linear response to orbital forcing, at ~5500 BP. Reprinted from deMenocal *et al.* (2000a), with kind permission from Elsevier Science.

Změny orbitálních parametrů - role vegetace

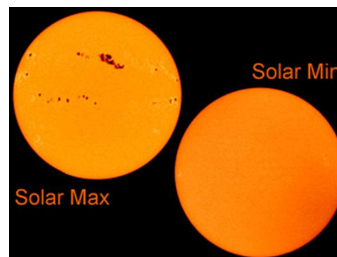
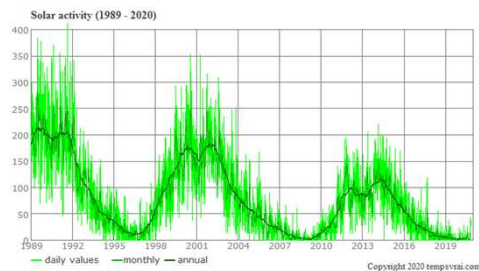
- Jestliže prvotní příčinou popsaných změn by měly být postupné změny v orbitálních parametrech a v insolaci, je zajímavé, že proxy-rekonstrukce i paleo-modely ukazují na **velmi náhlý** (abrupt) počátek (14 800 BP) i konec (5500 BP) periody vlhkého klimatu v severní Africe.
- Pokud se do modelů nezahrnou zpětné vazby vegetace a hydrologického cyklu, množství srážek neodpovídá tomu, který by mohl způsobit vznik velkých jezer a zelenou Saharu.
- **Vliv vegetace významně zesílil vliv postupných změn v důsledku precesního pohybu.** Navíc stejný mechanismus mohl hrát roli i ve vyšších zeměpisných šířkách (tundra - boreální lesy) .

Orbitální parametry nevysvětlují vše

Q1 65°N June

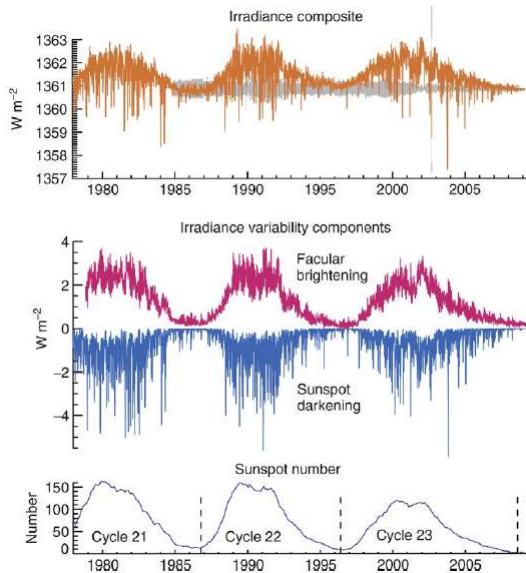


Změny v intenzitě slunečního záření



- Změny orbitálních parametrů jsou spojeny především s přerozdělením insolace v čase (sezonalita) i v prostoru (rovník - póly, SH - NH) a na kolísání a změnách klimatu se projevují velmi diferencovaně.
- Naopak změny v intenzitě slunečního záření na horní hranici atmosféry (solar irradiance) by měly být konstantní pro celou Zemi.
- Avšak není tomu tak, protože **reakce klimatického systému na změny intenzity slunečního záření mohou být regionálně odlišné** a to především v důsledku zpětných vazeb a interakcí v atmosféře.

Změny v intenzitě slunečního záření



Satellite measurements of solar faculae and sunspots for the last three solar activity cycles. The faculae increase energy emissions from the Sun, while sunspots reduce them. The net result is a 0.1% increase in total solar irradiance between the minimum and maximum of the solar cycles (top). **Unfortunately, longer measurements of these phenomena do not exist, and so, there is considerable uncertainty about how irradiance changed in the past.**

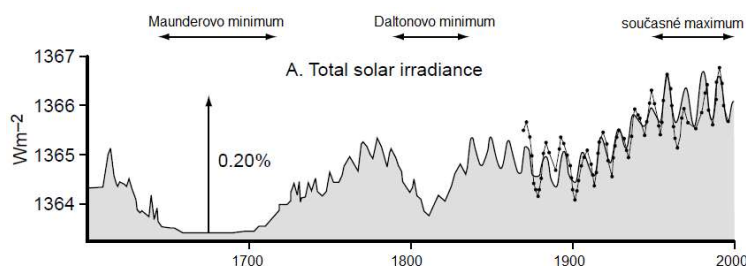
Lean (2010).

Změny v intenzitě slunečního záření

- Solární konstanta (1368 W m^{-2}) není konstanta.
- Především družicová měření za poslední tři dekády prokázala, že TSI (Total Solar Irradiance - integrovaná přes všechny vlnové délky) kolísá o cca 0.08 procent během přibližně **jedenáctiletého slunečního (Schwabeho) cyklu**.
- Maxima dosahuje v době maximální sluneční aktivity projevující se maximem slunečních skvrn.
- Navíc bylo prokázáno, že **intenzita UV záření kolísá více**. To je důležité z hlediska koncentrace stratosférického ozónu (vzrůst intenzity UV záření značí vyšší koncentraci O_3).
- Protože je ozón radiačně aktivním plynem, znamená to, že během maxim sluneční aktivity se více ohřívají horní vrstvy troposféry, což může souviset s intenzifikací proudění ve stratosféře a **změnám v cirkulaci**.
- Například podle modelových situací vede uvedený mechanismus na „letní polokouli“ k posunu jet-streamů a k pólům a také k rozšíření Hadleyho cirkulace stejným směrem.
- **I když současné změny v intenzitě záření jsou malé, mohl tento mechanismus vést v minulosti k významným změnám, pokud se intenzita záření měnila ve větším rozsahu (vztahy v uvedeném mechanismu nemusejí být lineární).**

Proxy data o intenzitě slunečního záření

- Na základě studia chování hvězd podobných Slunci bylo zjištěno, že současná intenzita slunečního záření je vysoká (Lean et al. 1992).
- Touto **metodou analogie** např. vzrostla TSI od konce 17. století (Maunderovo minimum) do současnosti o 0.24 procenta a krátkodobé změny v důsledku 11-ti letého cyklu jsou součástí těchto **dlouhodobějších kolísání**.
- Na základě analogie ale i modelových simulací se změna intenzity TSI o 0.24 % projeví změnou globální teploty vzduchu na Zemi o 0.2 - 0.4 °C.
- Tedy podstatná část dlouhodobých kolísání teploty na severní polokouli během posledního milénia (před zvýšením vlivu antropogenní činnosti) se dá vysvětlit kolísáním sluneční (a vulkanické) aktivity (Crowley, 2000).



Změny v intenzitě slunečního záření

- Změny TSI se v minulosti mohly projevovat kolísáním klimatu regionálně odlišně především v důsledku interakcí v atmosféře (cirkulace).
- Delší období nižší sluneční aktivity („**Grand Solar Minima**“ jako například Maunderovo minimum) se chladnějšími obdobími projevila především ve vnitřních částech kontinentů ve středních a vyšších zeměpisných šířkách.
- Chladnější podmínky se projevily i ve stejných šířkách Atlantiku a vedly k **ovlivnění cirkulace** charakterizované indexem sveroatlantské cirkulace (NAO).
- Uvedený mechanismus vedl se snížení tlakového gradientu mezi Azory a Islandem, nižším hodnotám NAO a zeslabení přenosu vlhkého a teplého vzduchu do Euroasie v zimě (**Projevila se malá doba ledová především v zimě?**).
- Uvedený mechanismus tedy mohl dále zesílit původní ochlazení v důsledku samotného minima sluneční aktivity.



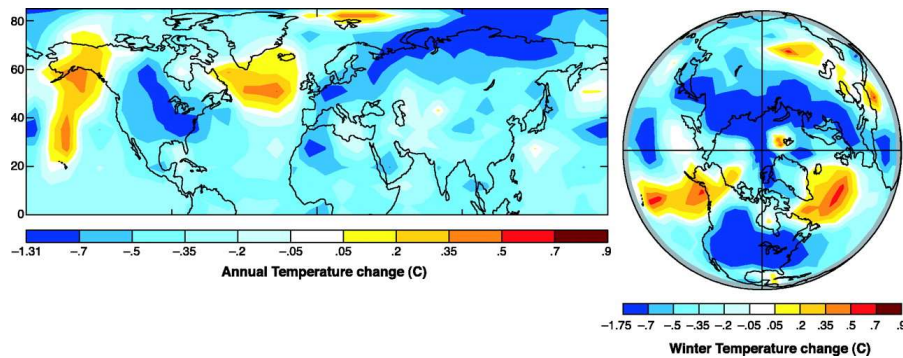
Peter Bruegel the Elder, 1565



The Frost Fair of 1814, by Luke Clenell

Změny v intenzitě slunečního záření

- To potvrzují modelové simulace, podle kterých byly zimy v období Maunderova minima o 1-2 °C chladnější než zimy o cca 100 let později, kdy byla intenzita slunečního záření vyšší (Shindell et al., 2001).
- To je navíc konzistentní s některými proxy rekonstrukcemi

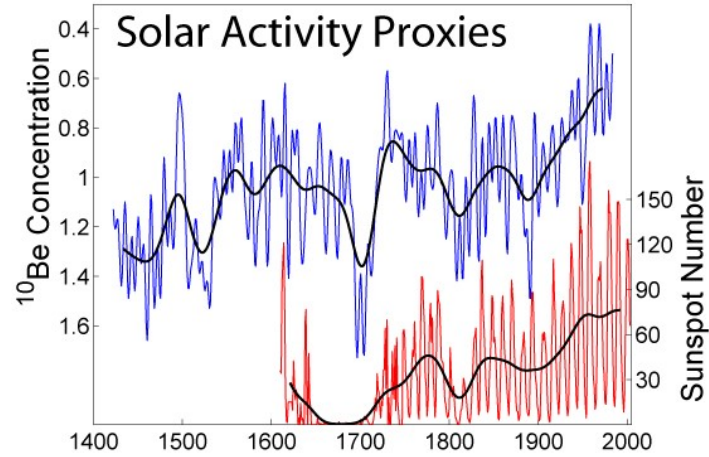


The change in winter surface air temperature between 1680 and 1780 (1680-1780), based on a GCM simulation in which solar irradiance was increased by 0.32 Wm^{-2} (0.1%) between those times. The GCM had an interactive stratospheric chemistry component so that UV effects on ozone could be included. The pattern of change is similar to that associated with a negative phase of the North Atlantic Oscillation. From Shindell et al. (2001).

Dlouhodobé změny v intenzitě slunečního záření

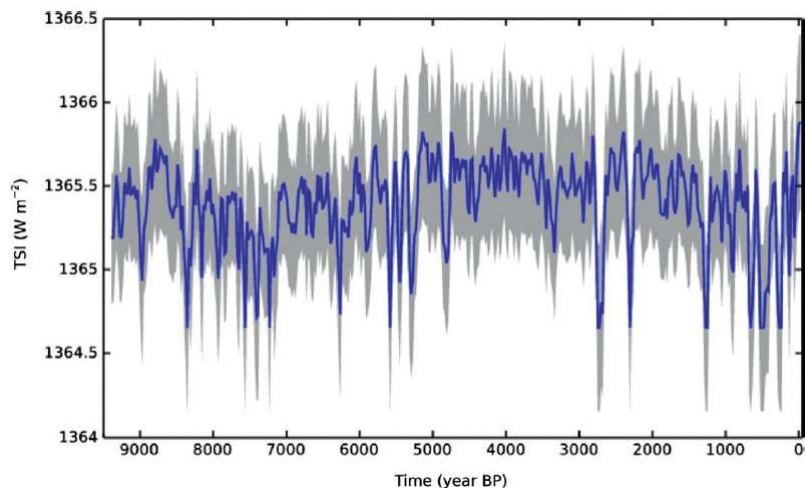
- Pokud se tedy intenzita slunečního záření změnila o cca 0.24 % během posledních stovek roků, jak se měnila během holocénu?
- Dlouhodobé změny TSI lze rekonstruovat na základě kosmogenních izotopů, které lze nalézt v přírodních archívech.
- Kosmické záření obsahuje izotopy **10Be** a **14C** a jejich koncentrace lze nalézt v některých proxy-datech.
- Během období **vysoké sluneční aktivity** je tok kosmického záření do atmosféry redukován což vede k **nižším koncentracím uvedených izotopů** - tedy existuje nepřímý vztah.
- Bohužel obsah izotopů ovlivňují další faktory, především magnetické pole země (jeho menší intenzita znamená zvýšenou produkci izotopů).
- Obsah **14C** závisí i na intenzitě ukládání uhlíku v hlubších vrstvách oceánu (např. vlivem termohalinní cirkulace).
- Tyto vlivy jsou však zřejmě relativně malé (Bard et al., 2000, Beer et al., 1996) a obsah **14C** lze použít jako proxy pro rekonstrukci TSI za posledních 1000 resp. 4000 roků.

Proxy data o intenzitě slunečního záření



Variations in solar activity, including variation in ^{10}Be concentration which varies inversely with solar activity. (Note that the beryllium scale is inverted, so increases on this scale indicate lower beryllium-10 levels) (zdroj wikipedie)

Proxy data o intenzitě slunečního záření

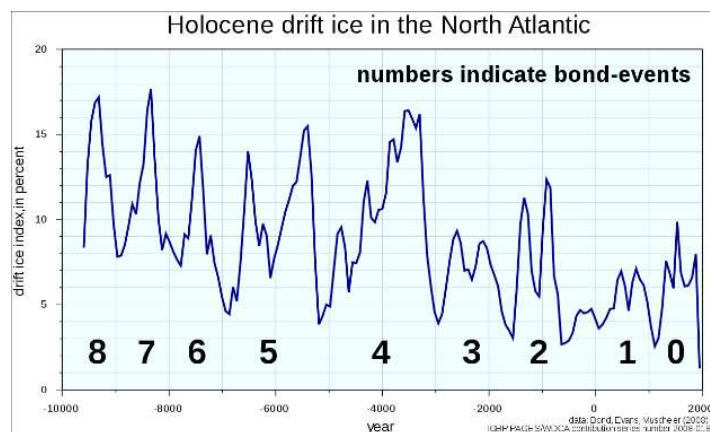


A reconstruction of total solar irradiance for the last 9300 years based on the relationship between the Sun's open magnetic field (which modulates galactic cosmic rays reaching the Earth) and ^{10}Be measured in ice cores, after taking into account changes in the Earth's magnetic field. The shaded band is the 1s uncertainty considering the uncertainties of the calibration and of the reconstruction of the Sun's open magnetic field record. (Steinhilber et al. 2012).

Periodicita změn v intenzitě slunečního záření?

- S kolísáním sluneční aktivity souvisí i otázka tzv. **Bondových cyklů** (Bond et al., 2001).
- Podle autorů časové změny v IRD (Ice Rafted Detritus/Debris) v sedimentech na dně severního Atlantiku velmi dobře odpovídají variabilitě sluneční aktivity rekonstruované podle 14C anomálií.
- Tato kolísání mají zřetelně vyjádřenou frekvenci cca 1450 - 1500 roků, v současnosti se udává spíše 1000 roků.
- Takových cyklů bylo identifikováno osm, některé velmi dobře koreluje s kolísáním klimatu a typickými obdobími, jiné se naopak ve variabilitě klimatu nijak neodrážejí.
- Obdobná periodicita byla nalezena také v izotopech kyslíku v datech GISP2 (Greenland Ice Sheet Project).
- Tzv. Bondovy cykly jsou v odborné literatuře často diskutovány, není zcela jasný jejich mechanismus propojení se sluneční aktivitou (přes období zvýšeného/sníženého tání grónského ledovce).

Periodicita změn v intenzitě slunečního záření?



Tzv. bondovy cykly: 0 - Malá doba ledová (1500AD), 1 - LALIA (600AD), 3 - 2200BC (See [4.2 kiloyear event](#); collapse of the [Akkadian Empire](#) and the end of the Egyptian [Old Kingdom](#)), 4 - 3900BC ([Sahara Desert](#) reforms by 3500-3000 BC, ending [Neolithic Subpluvial](#)), 5 - 6200BC (8.2K event.), 8 - 9100BC (transition from the [Younger Dryas](#) to the [boreal](#))

Změny v intenzitě slunečního záření

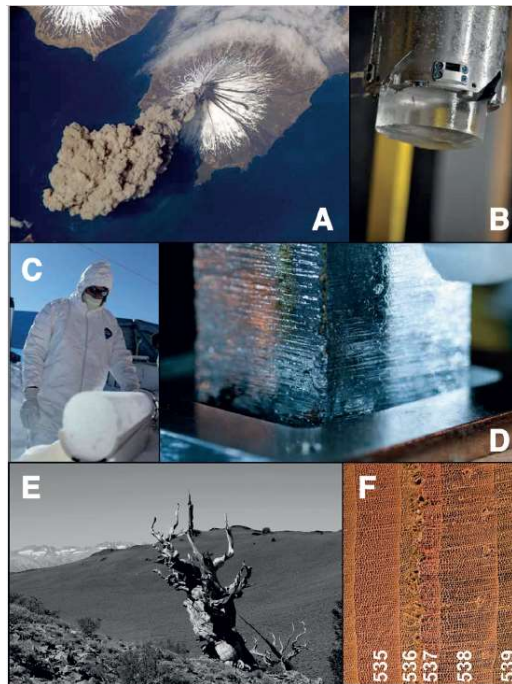
Pro poslední milénium ^{14}C i ^{10}Be indikují, že sluneční aktivita byla vysoká v období cca 1100 - 1250 a naopak minima připadla na období 15. století a na konec 17. století. Poté vzrostla a ve 20. století byla na úrovni hodnot pro 12. století.



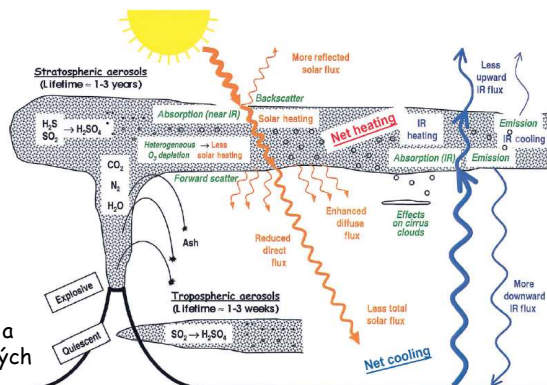
Total solar irradiance from AD 843 to 1961, estimated from ^{10}Be variations, recorded in an Antarctic ice-core, scaled to the estimates of Lean et al. (1995) (cf. Fig. 2.4). Other estimates of the magnitude of change in TSI from the Maunder Minimum to the present are higher - up to 0.65%, which, if correct, would simply amplify the scale of change shown here (data from Bard et al., 2000).

Vulkanická činnost

(A) Injection of ash and aerosols into the atmosphere; (B) ice core section from WAIS Divide (Antarctica) sticking out of the core barrel. High annual snowfall at this site enables individual annual layers to be identified and counted; (C) ice core section from TUNU (Greenland) that contains a record of volcanic sulfate aerosols; (D) the ice is slowly melted and a variety of elements and chemical species are simultaneously analyzed; (E) bristlecone pine ring-width minima indicate that summer cooling often occurred when major volcanic eruptions dimmed the Earth's surface; (F) frost rings from a Siberian pine in Mongolia. The narrow, distorted rings for 536 and 537 CE indicate a drastic cooling in the northern hemisphere which was caused by a large volcanic eruption. Image credits, A-F: NASA, M. Twickler, M. Sigl, S. Masclin, M. Sigl, D. Breger (Micrographic Arts).



Vulkanická činnost



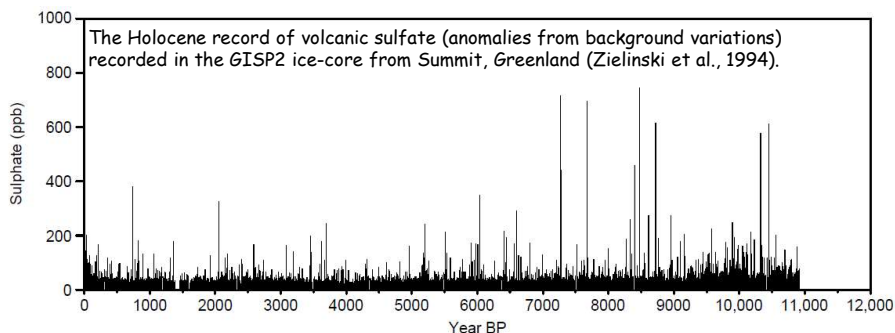
- Velikost radiačního účinku vulkanických erupcí závisí především na **velikosti erupce, poloze (zeměpisné šířce), roční době, směru** vyvržených částic a plynů, **typu a velikosti** vyvržených látek.
- Množství popela a sloučenin síry v atmosféře snižuje množství dopadajícího záření na zemský povrch a tak ho ochlazuje.
- Velké částice popela dopadají relativně rychle na zemský povrch, ovlivňují počasí pouze regionálně a na krátkou dobu.
- Sloučeniny síry společně s vodní párou vytvářejí aerosoly síry a ty zůstávají v atmosféře několik roků.
- V případě erupcí v tropických zeměpisných šířkách jsou aerosoly distribuovány ve vyšších vrstvách atmosféry po celé Zemi, naopak aerosoly z erupcí vyšších zeměpisných šířek mají spíše regionální vliv.

Vulkanická činnost a dopady na klima

- Vulkanické erupce mohou mít **krátkodobý ochlazující efekt** na klima, který je výsledkem radiačního účinku aerosolů ze sopečných erupcí, které redukuje přísun sluneční energie k zemskému povrchu.
- S tím jsou spojeny i **vlivy na cirkulaci**, které se ve většině případů projeví zesílením proudění v planetárních (Rossbyho) vlnách.
- To vede k negativním teplotním odchylkám v určitých oblastech a pozitivním v jiných. Například oteplení ve vnitrozemí kontinentů na severní polokouli v zimě korelovalo s velkými erupcemi ve 20. století.
- Takovéto efekty mohou být ještě zesíleny, pokud počáteční efekt ochlazení je **zesílen zpětnými vazbami**.

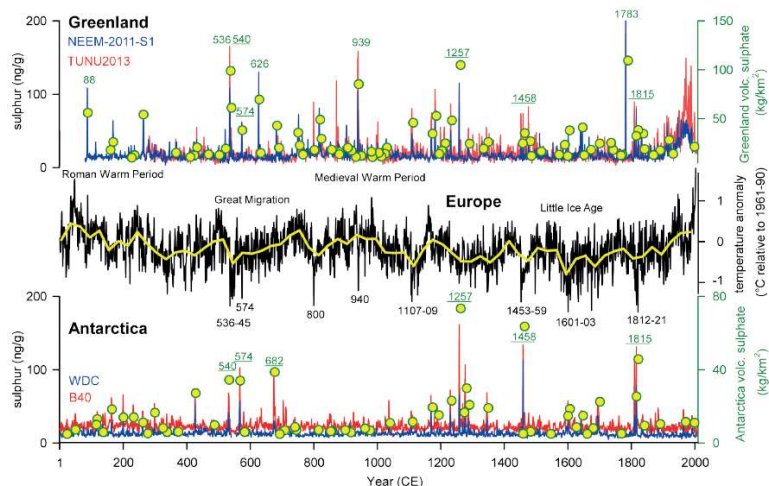
Proxy o vulkanické činnosti během holocénu

Zdroje dat o vulkanické činnosti - historické záznamy a obsah sloučenin síry v ledovcových jádrech Grónska a Antarktidy. Zdroje z obou polokoulí je nutné porovnávat, aby bylo zřejmé, zda šlo o globální vlivy a kde se zhruba nacházelo místo erupce.



- V datech GISP2 lze identifikovat období zvýšené vulkanické činnosti 9500-11,500 BP.
- V časném holocénu se vyskytly podle proxy-dat četné erupce silnější než Tambora v roce 1815, která zřejmě byla nejsilnější za poslední dvě století.

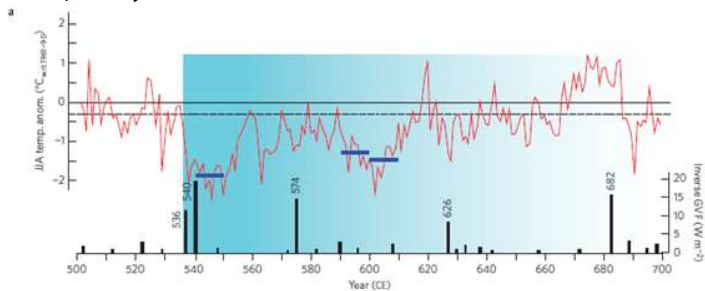
Vulkanická činnost v historické době



Ice-core records of sulfur from two ice cores in Greenland and two ice cores in Antarctica (Sigl et al. 2013, 2014), used among others to infer atmospheric deposition (yellow circles). More than 100 individual eruptions are reconstructed and attributed to either mid-to high latitude eruptions (e.g. Iceland, Alaska) and low-latitude eruptions (underlined for selected events) based on the timing of sulfate deposition over the ice-sheets. Reconstructed dates are given for some large volcanic eruptions (Sigl et al. 2015) as are time periods of strong summer cooling in Europe indicated by tree-ring reconstructions (black curve, PAGES-2k Consortium 2013).

Vulkanická činnost a časové měřítko změn

- Teplotní efekt se projeví ve většině případů jen **několik málo roků**. Avšak období zvýšené vulkanické činnosti či shluk několika velkých erupcí se mohl projevit i v **dekádové a multi-dekádové variabilitě**.
- Například jedním z faktorů, který stál za počátkem chladného období v době raného středověku a období stěhování národů, byly zřejmě tři sopečné erupce v letech 536, 540 a 574.
- Jejich přesná lokalizace není známa, i když byly jednoznačně prokázány analýzou ledovcových jader v Grónsku i v Antarktidě (Büntgen et al., 2016, Sigl et al., 2015).

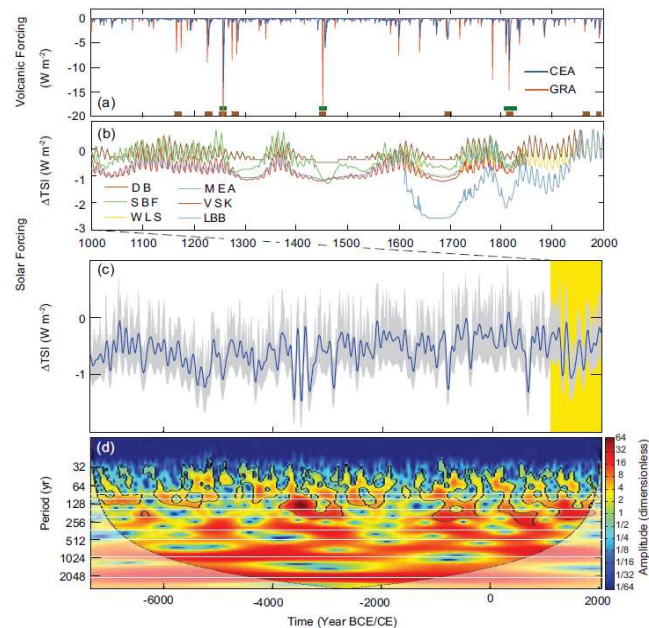


Büntgen et al. (2016)

Vulkanická činnost

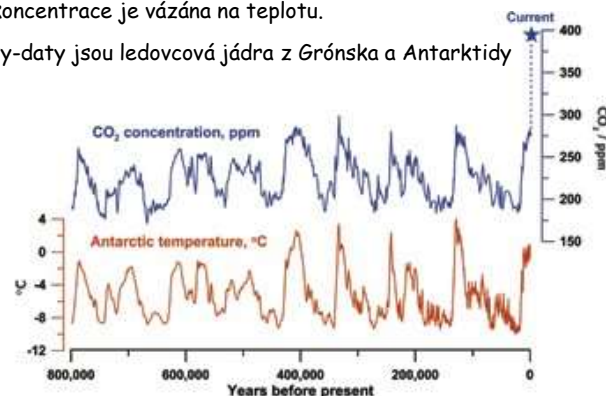
- Podle některých prací byl výbuch sopky Samalas (1257) jedním z faktorů, které stály za počátkem malé doby ledové
- Na druhou stranu byly vulkanické erupce hlavní příčinou náhlých ochlazení v létě na severní polokouli („**roky bez léta**“ - 1816, 1601, 1453, 1109, 574, 541)
- Přes problémy s interpretací a homogenizací dat o vulkanické činnosti, modelové simulace potvrzují, že tato činnost byla během holocénu významným klimatotvorným faktorem
- Společně s kolísáním sluneční aktivity vysvětluje hlavní rysy přihozených kolísání a změn klimatu během min. 2000 roků.
- Role vulkanické činnosti byla zvláště významná v určitých obdobích.
- Například velmi chladné období druhé poloviny Maunderova minima v západní Evropě bylo zesíleno intenzivní vulkanickou činností v tomto období (D'Arrigo et al., 2002, Shindell et al., 200X).
- North et al. (2006) uvádějí jako období zvýšené vulkanické činnosti konec 13. století, 17. století a počátek 19. století, i když jednotlivé chronologie se mohou částečně lišit.

Vulkanická činnost



Chemické složení atmosféry

- Vedle uvedených tří hlavních vnějších faktorů mohly kolísání a změny klimatu během holocénu souviset i se změnami atmosférické koncentrace hlavních tzv. radiálně aktivních plynů (především CO_2 , CH_4 , N_2O).
- Změny v obsahu vodní páry se neuvažují, její působení je považováno za zpětnou vazbu, protože její koncentrace je vázána na teplotu.
- Hlavními proxy-daty jsou ledovcová jádra z Grónska a Antarktidy



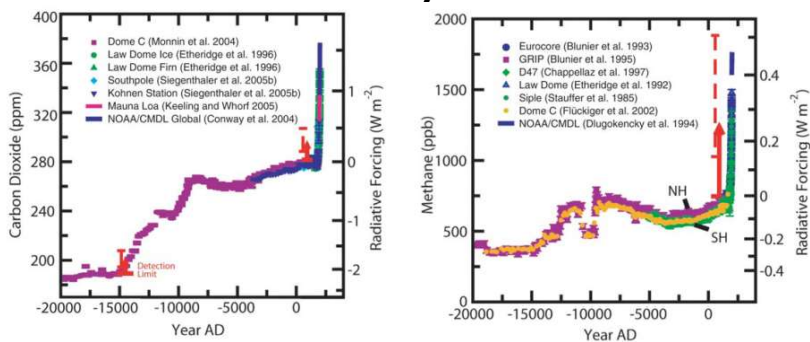
Data from ice cores have been used to reconstruct Antarctic temperatures and atmospheric CO_2 concentrations over the past 800,000 years. Temperature is based on measurements of the isotopic content of water in the Dome C ice core. CO_2 is measured in air trapped in ice, and is a composite of the Dome C and Vostok ice core. The current CO_2 concentration (blue star) is from atmospheric measurements. The cyclical pattern of temperature variations constitutes the ice age/ interglacial cycles. During these cycles, changes in CO_2 concentrations (in blue) track closely with changes in temperature (in red).

Source: Figure by Tereza Škaková, data from Lüthi et al. 2008 and Touzel et al. 2007

Chemické složení atmosféry

- Během posledních 800 tis. roků kolísala koncentrace CO_2 ve velmi dobře vyjádřených kvazi-periodách odpovídajících glaciálům s koncentrací cca 180 ppm a interglaciálům, během kterých koncentrace CO_2 dosahovala koncentrace 280-300 ppm.
- Koncentrace metanu kolísaly v rozmezí hodnot 600 - 790 ppb (parts per billion by volume).
- Tento charakter pravidelných kolísání je porušen počátkem antropocénu.
- Jestliže kolísání obsahu CO_2 v atmosféře během holocénu byla relativně malá, dominuje jim výrazný nárůst ve 20. století.
- Současná koncentrace CO_2 je přes 400 ppm, obsah metanu se oproti předindustriálnímu období zdvojnásobil.
- Radiační působení v porovnání s rokem 1750 je asi 2.5 W.m^2 .

Chemické složení atmosféry



Evolution of atmospheric carbon dioxide and methane over the last 22,000 years. Joos (2005).

- Z obrázku je patrné, že koncentrace CO_2 i CH_4 na konci posledního glaciálu rostly a od počátku holocénu začaly mírně klesat. Takový vývoj zhruba odpovídá předchozím glaciálům/interglaciálům.
- Avšak zhruba ve středním holocénu se tento pokles zastavil a nejprve koncentrace CO_2 a poté i NH_4 začaly opět růst, což však už je v porovnání s předchozími obdobími neobvyklé.
- Podle jedné teorie souvisí uvedené chování s činností člověka, především s procesy odlesňování a následně s rozvojem zemědělství, především pěstováním rýže (Ruddiman, 2003, 2005, 2007).

Chemické složení atmosféry

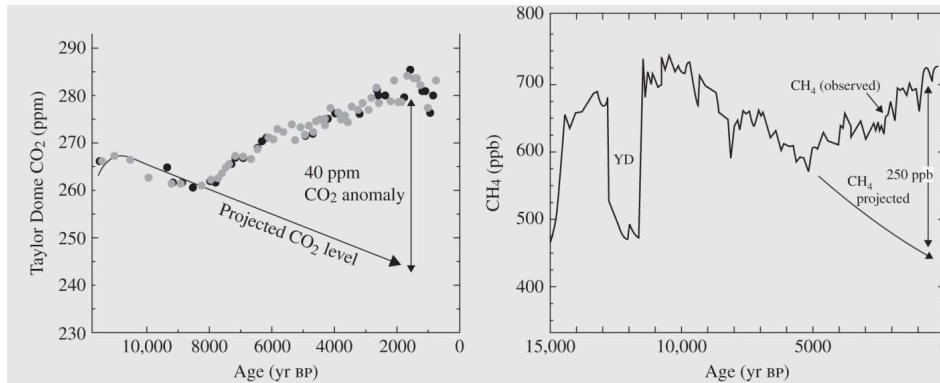


Fig. B22.1 Observed trajectories of atmospheric carbon dioxide and methane concentrations during the Holocene, together with trajectories expected in Ruddiman's hypothesis.

Source: Modified from Ruddiman (2003). Reproduced with permission of Springer Science+Business Media.

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

Chemické složení atmosféry

- Do 18. století koncentrace CO₂ vzrostly za posledních 8000 roků o 20 ppm, koncentrace NH₄ za posledních 5000 o 100 ppb. Podle Ruddimana je tento nárůst neobvyklý, především při porovnání s předchozím interglaciálem. Pokud by Země měla směřovat k dalšímu glaciálu, měly by koncentrace klesat.
- Avšak glaciály a interglaciály nebyly identické, podle vývoje orbitálních parametrů by měl být současný interglaciál velmi dlouhý (jako před 400 tis. roky).
- Dále podle některých prací je nárůst koncentrace metanu součástí jeho přirozené variability. Pokud jde o nárůst CO₂, ten byl zaznamenán během interglaciálu MIS11 před 400 tis. roky, kdy měly orbitální parametry obdobné hodnoty jako v současnosti.
- Stejně jako v případě metanu může být vzestup koncentrace CO₂ součástí přirozeného uhlíkového cyklu. Koncentrace terestrického 12C rostla především před 5000 lety, kdy se přirozeně formovaly velké bažiny (peatland) a jen málo poté, kdy by to mohlo souviset s procesy odlesňování.
- Je také otázka, zda tehdejší množství populace by bylo schopno vyprodukovat množství CO₂ a NH₄ odpovídající uvedenému vzestupu jejich koncentrací.

Chemické složení atmosféry

- Přes řadu argumentů uvedená teorie W. Ruddimana naznačuje obecnější poznatek.
- Tedy že člověk měnil přírodní prostředí od okamžiku, kdy se „zastavil“ a přestal být pouze sběračem a lovcem.
- Je jenom otázka, kdy se intenzita jeho působení na vývoj klimatu a přírodního prostředí obecně stala dostatečně závažnou.

Koncentrace troposférických aerosolů - neměnily se v před-instrumentálním období, poté výrazně narůstají. Jejich vliv na klima (radiační působení) je velmi závislé na řadě faktorů (zdroje, chemické složení, vlastnosti, interakce s oblačností atd.). V atmosféře zůstávají relativně krátce. Obecně mají ochlazující účinek na klima, například ale tzv. **black carbon** má pozitivní působení.

Přirozené změny v druzích povrchů

- **Přirozené změny** v druzích povrchů se nepovažují za klimatotvorný faktor avšak jsou zahrnuty ve zpětných vazbách. Jsou reakcí klimatického systému na působení vnějších faktorů
- Související především s **rychlým ústupem zalednění** ve vysokých zeměpisných šířkách během časné fáze holocénu a jsou výsledkem zpětné vazby na změny teploty.
- Dále například s postupným zvyšováním hladiny oceánu a změnou vegetačního krytu
- Změny povrchů primárně ovlivňují **albedo a to přímo i nepřímo**. Přímá vazba na albedo souvisí s rozsahem zalednění v polárních oblastech.
- Nepřímá vazba na albedo souvisí se změnami v cirkulaci, následnými změnami srážkového režimu (hydrologického cyklu) a následně pak se změnami v rozsahu a druhovém složení vegetace.

Změny v druzích povrchů

CLIMEX - CGWM

BVVL1999

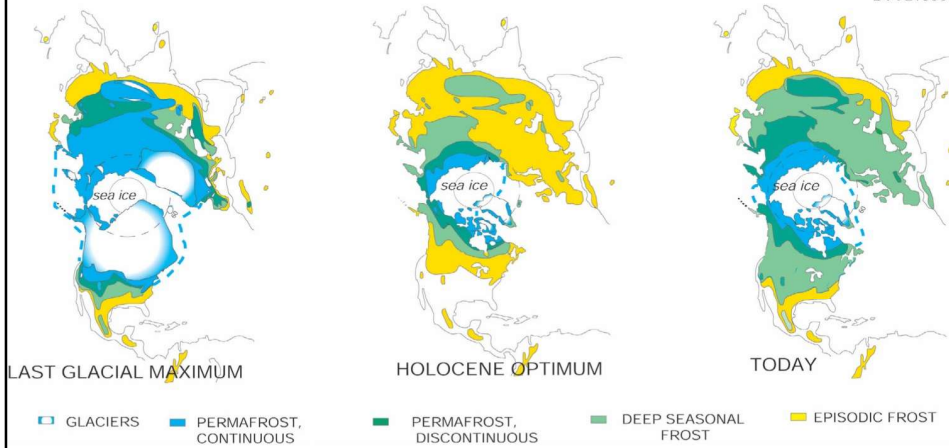
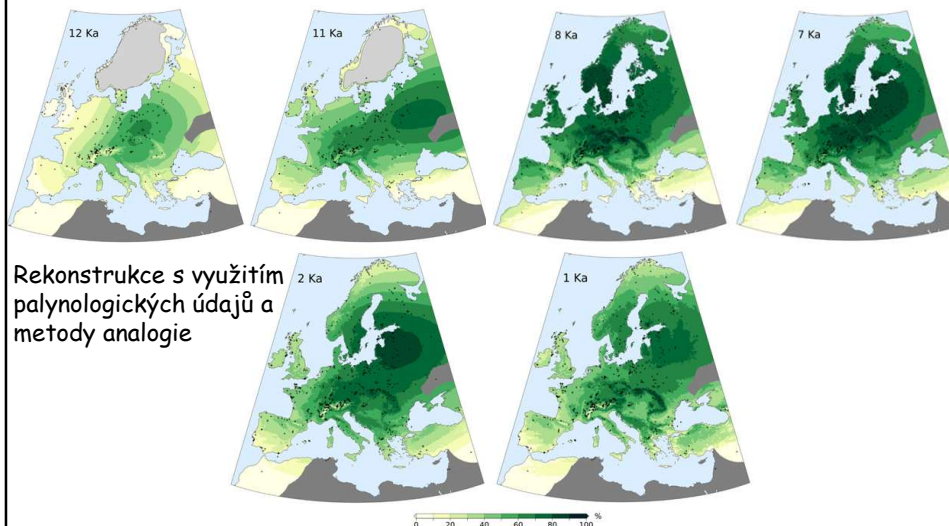


Fig. 22.2 Changes in permafrost between glacial and interglacial stages: (left) the last glacial maximum, about 20,000 years ago; (middle) the Holocene Climatic Optimum (9000–5000 years ago); and (right) the 20th century.

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

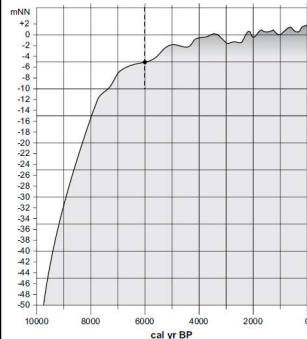
Změny v druzích povrchů



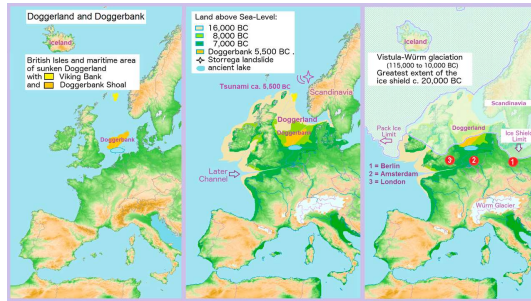
Rekonstrukce s využitím
palynologických údajů a
metody analogie

Maximální zalesnění ~8,500 - 6,000 BP (v západní Evropě dříve), ve východní Evropě pozitivní trend do 6,250 BP, stagnace a částečný nárůst kolem 6,500 BP, poté obecný pokles (v Alpách již od 8200 BP)
Zanon et al. 2018

Přirozené změny v druzích povrchů

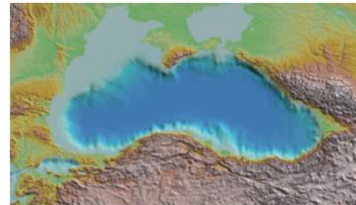


Sea level changes in the area of the southern North Sea (modified after Behre, 2003)



Evropské pobřeží v současnosti, během časného holocénu a během vrcholu posledního glaciálu (Wikipedie)

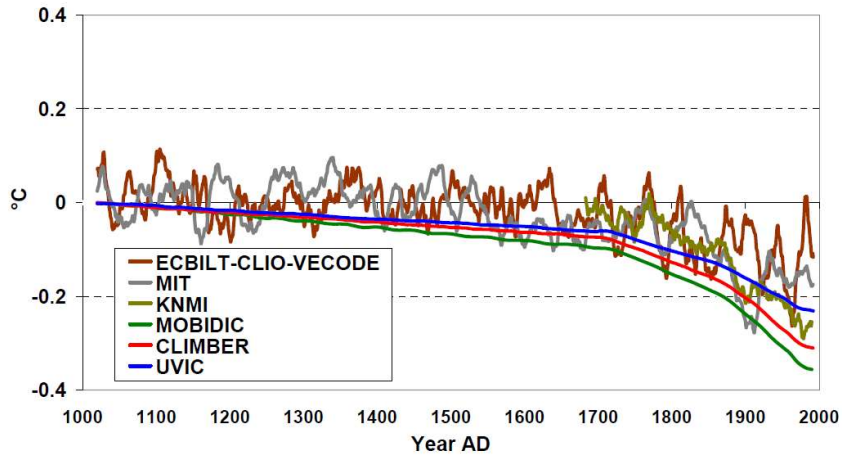
Původní pánev Černého moře zaplavená mořskou vodou před cca 8000 roky



Antropogenní změny v druzích povrchů

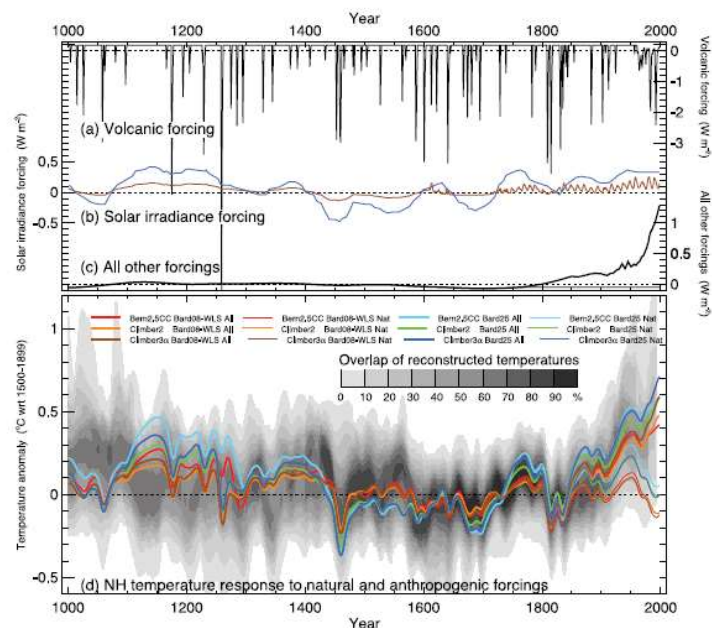
- Od středního holocénu dochází ke změnám v druzích povrchů v důsledku antropogenní činnosti.
- Ke změnám docházelo od neolitické revoluce s rozvojem zemědělství, později s postupným odlesňováním a kolonizací. Tyto procesy primárně způsobily změnu albeda a možná i změny v chemickém složení atmosféry
- Rozsah antropogenních změn postupně roste a lze jej kvantifikovat za posledních cca 1000 roků.
- Názor na vývoj klimatu vlivem antropogenních změn nejednotný. Některé práce uvádějí, že změny v landuse během posledních 1000 roků měly na globální klima ochlazující účinek až 0.4 °C (Bauer et al. 2003).
- Jiné práce naopak konstatují výrazné oteplení regionálního rozsahu během 20. století.
- Existuje řada regionálních studií vývoje landuse, studium změn v globálním měřítku nejsou tak četné. Kaplan et al. (2009) rekonstruovali proces odlesňování za poslední 3 tisíce let na základě údajů o hustotě obyvatel v Evropě.
- Autoři dokladují, že dosavadní práce výrazně podhodnocovaly vliv antropogenní činnosti na klimatický systém v předinstrumentálním období.

Antropogenní změny v druzích povrchů



Decrease in mean global temperature over the Northern Hemisphere due to the biophysical feedback (increased albedo) of an estimated decrease in forest cover between AD 1000 and 2000 as simulated by six different climate models (see details on the climate models in Brovkin et al., 2006). Land-use changes were based on HYDE [History Database of the Global Environment] version 2.0 for the period AD 1700-2000, and on a constant rate of decrease in forest cover between 1000 and 1700 (from Brovkin et al., 2006; modified).

Shrnutí



Shrnutí

- Řada studií, která hledá příčiny v kolísání a změnách klimatu v hlavních externích faktorech tak činí pouze na základě jednoduché korelační závislosti či na základě porovnání spekter.
- Mechanický přístup však ještě nemusí znamenat kauzální vztahy. V hledání příčin a ověřování hypotéz hrají významnou roli **modelové experimenty**.
- Je zřejmé, že ne všechna variabilita klimatu během holocénu měla konkrétní příčinu v klimatotoorných faktorech
- Nejznámějším příkladem je 8.2k event. Související s kolapsem části ledovcového štítu (Laurentide Ice Sheet), velmi rychlým výtokem tavné vody do severního Atlantiku a prudký, krátkodobým ochlazením.
- Do stejné kategorie procesů patří jevy související s vnitřní variabilitou klimatu, jako jsou ENSO, NAO, PDO.
- I když víme, že tyto jevy mají vysokofrekvenčním složku kolísání, **velmi málo víme o jejich dlouhodobém kolísání**.
- Důležitou roli může hrát i náhodná (stochastická) povaha klimatického systému, především v případě náhlých změn (abrupt), které při překročení určitých prahových hodnot mohly v důsledku nelineárních vztahů dostat systém do nových podmínek (Rahmstorf and Alley, 2002).