



# Kodaňská diagnóza

zpráva světu o nových poznatcích klimatologie

I. Allison, N.L. Bindoff, R.A. Bindaschadler, P.M. Cox, N. de Noblet, M.H. England, J.E. Francis, N. Gruber, A.M. Haywood, D.J. Karoly, G. Kaser, C. Le Quéré, T.M. Lenton, M.E. Mann, B.I. McNeil, A.J. Pitman, S. Rahmstorf, E. Rignot, H.J. Schellnhuber, S.H. Schneider, S.C. Sherwood, R.C.J. Somerville, K. Steffen, E.J. Steig, M. Visbeck, A.J. Weaver.  
The University of New South Wales Climate Change Research Centre (CCRC), Sydney, Australia,

Český překlad zprávy (která má v originále 64 stran) napsal Jiří Došek a upravil a doplnil Jan Hollan (*Ekologický institut Veronica*). Překlad neobsahuje žádné fotografie, originál je mnohem působivější. Adresa překladu: <http://amper.ped.muni.cz/gw/diagnosis>.

Vysvětlení mnoha níže užívaných termínů lze najít ve dvojjazyčném Glosáři ze čtvrtého svazku Čtvrté hodnotící zprávy IPCC v adresáři [http://amper.ped.muni.cz/gw/ipcc\\_cz](http://amper.ped.muni.cz/gw/ipcc_cz).

## Obsah

Předmluva.....	2
Exekutivní shrnutí.....	3
Skleníkové plyny a uhlíkový cyklus.....	4
Atmosféra.....	6
Extrémní jevy.....	9
Povrch země.....	11
Permafrost a hydráty.....	13
Ledovce a ledové čepice.....	14
Ledové štíty Grónska a Antarktidy.....	15
Ledové šelfy.....	18
Mořský led.....	19
Oceány.....	22
Globální hladina moře.....	24
Náhle změny a body zvratu.....	26
Lekce z minulosti.....	29
Budoucnost.....	32
Literatura.....	35
Biografie.....	40

# Předmluva

Sestavování textu Čtvrté hodnotící zprávy Mezivládního panelu pro změnu klimatu (IPCC AR4) bylo dokončeno na podzim 2006. Od té doby byly publikovány stovky vědeckých prací o mnoha tématech, které se vztahují ke změně klimatu vyvolané lidmi. Účelem zprávy Kodaňská diagnóza, vydané na podzim 2009, bylo vytvořit syntézu z těch nových vědeckých poznatků, které se objevily až po uzávěrce minulé zprávy IPCC a byly zvláště důležité pro politické rozhodování.

Důvod je dvojitý. Za prvé tato zpráva slouží jako vyhodnocení vyvíjející se vědy v mezidobí, v polovině cyklu fungování IPCC – Pátá hodnotící zpráva, AR5, nebude sestavena před rokem 2013. Za druhé, což je důležitější, slouží Kodaňská diagnóza jako příručka o vědeckých poznatcích, která doplnila minulou zprávu IPCC v takovém okamžiku, aby ji bylo možné využít při jednání v Kodani v prosinci 2009 a všech následných národních nebo mezinárodních jednáních o politikách vztahujících se ke změně klimatu.

Kodaňská diagnóza pokrývá rozsah témat vyhodnocovaných Pracovní skupinou 1 Mezivládního panelu, čili oblast zvanou Fyzikální základy. Do toho patří:

- analýza emisí skleníkových plynů a jejich koncentrací v ovzduší, stejně jako globálního uhlíkového cyklu,
- pojednání o atmosféře, povrchu pevnin, oceánech a o všech hlavních složkách kryosféry (ledových příkrovech, ledovcích, ledových šelfech, mořském ledu a permafrostu),
- paleoklima, extrémní povětrnostní události, výška mořské hladiny, projekce budoucího vývoje, náhlé změny a body zvratu,
- zvláštní rámečky věnované vysvětlení některých obvyklých mylných představ souvisejících s vědou o klimatu.

Zpráva byla záměrně psána pro cílovou skupinu čtenářů zahrnující politické představitele a další relevantní veřejné činitele a aktéry, představitele tisku a jiných médií, a také širší veřejnost. Každá kapitola začíná sadou klíčových konstatování, shrnujících hlavní poznatky. Věda popsaná ve zprávě je založena na nejvěrohodnější a nejvýznamnější recenzované literatuře dostupné v době publikování zprávy. Autory zprávy jsou zejména minulí vedoucí autoři IPCC, kteří dobře znají důkladnost a úplnost vyžadovanou pro vědecké posouzení takové povahy.

## Český doplněk předmluvy

(od editora J. Hollana)

Anglický originál Diagnózy, dostupný na adrese [www.copenhagendiagnosis.org](http://www.copenhagendiagnosis.org), byl zveřejněn na konci listopadu 2009. Český překlad jednostránkového Exekutivního shrnutí již 4. prosince, vysvětlující rámečky pak 19. prosince. Překlad celého textu zprávy si na elektronické zveřejnění musel počkat až do 8. října 2010. Spolu s českými verzemi obrázků je k dispozici na adrese <http://amper.ped.muni.cz/gw/diagnosis>.

Během roku, jenž uplynul mezi přípravou Kodaňské diagnózy a zveřejněním jejího českého překladu, byly publikovány další podstatné vědecké práce. Aktualizovat Kodaňskou diagnózu by ale museli sami autoři; pokud k tomu dojde, zaktualizujeme i tento překlad. V české verzi jsou zatím jen triviální aktualizace, jako doplnění číselných údajů za uplynulé období (např. emise CO<sub>2</sub> za rok 2009 byly zřejmě „jen“ stejně velké jako za rok 2008, jejich růst se na chvíli zastavil).

Od podzimu 2009 do podzimu 2010 se událo leccos, co [globální klimatický rozvrat](#) (první výstižný a vědecky přesný termín, [užitý poprvé Johnem Holdrenem](#), vědeckým poradcem Baracka Obamy) důrazně ilustruje: záplavy velkých území Pákistánu, Indie a Číny a současně bezprecedentní vedra, sucha a požáry v Rusku (nemluvě o českých povodních aj.). Na recenzované vědecké práce, které to rozeberou, si musíme počkat, ale experti [se záhy vyjádřili](#): bez zásadního lidského vlivu by takový výkyv téměř jistě nenastal.



## Exekutivní shrnutí

### Nejvýznamnější poslední závěry ohledně změny klimatu jsou:

**Narůstající emise skleníkových plynů:** Celosvětové emise oxidu uhličitého z fosilních paliv byly v roce 2008 o 40 % vyšší než v roce 1990. I kdyby se velikost globálních emisí stabilizovala na současných hodnotách, pouhých 20 dalších let vypouštění by znamenalo 25% pravděpodobnost toho, že oteplování překročí 2 °C, a to i při nulových emisích po roce 2030. Každý rok odkládání akce zvyšuje riziko, že se nakonec oteplí více než o 2 °C.

**Současné globální teploty jsou projevem lidmi vyvolaného oteplování:** Během posledních 25 let rostly teploty rychlostí 0,19 °C za desetiletí, což je ve velmi dobré shodě s předpověďmi založenými na nárůstech množství skleníkových plynů. Dokonce i za posledních deset let, navzdory poklesu radiačního působení Slunce, pokračuje trend oteplování. Jako obvykle se vyskytuje přirozené, krátkodobé kolísání, ale nedošlo k žádným významným změnám základního trendu oteplování.

**Urychlení tání ledových příkrovů, ledovců a ledových čepic:** Široký soubor měření z družic i v terénu nyní nade vši pochybnost prokazuje, že ledové štíty Grónska i Antarktidy ztrácejí hmotu zvyšujícím se tempem. Tání ledovců a ledových čepic v jiných částech světa se od roku 1990 rovněž zrychlilo.

**Rychlý úbytek mořského ledu v Arktidě:** Tání mořského ledu v Arktidě v letním období se zrychlilo mnohem více, než očekávaly klimatické modely. Plocha letního mořského ledu v období 2007–2010 byla asi o 40 % menší než průměr předpovědí klimatických modelů ze Čtvrté hodnotící zprávy IPCC (AR4).

**Podhodnocení současného růstu výšky hladiny moře:** Družice ukazují, že průměrné globální stoupání hladiny moře (3,4 mm ročně za uplynulých 15 let) je nyní asi o 80 % nad posledními předpověďmi IPCC. Toto zrychlení růstu výšky hladiny moře je v souladu se zdvojnásobením příspěvku z tajících ledovců, ledových čepic a ledových štítů Grónska a Západní Antarktidy.

**Upravená předpověď výšky hladiny moře:** Do roku 2100 pravděpodobně globální hladina moře stoupne nejméně dvakrát tolik, než v „AR4“ uváděly projekce Pracovní skupiny 1; při nezmírněných emisích to může lehce přesáhnout 1 m. Horní hranice růstu výšky hladiny moře do roku 2100 se odhaduje na dva metry. Hladina moře bude stoupat další staletí i poté, co dojde ke stabilizaci globálních teplot, během příštích několika staletí musíme očekávat růst výšky hladiny moře o několik metrů.

**Odklad akce přináší riziko nevratného poškození:** Pokud bude oteplování během tohoto století pokračovat nezměněným způsobem, několik zranitelných složek klimatického systému (např. pevninské ledové štíty, deštný les v Amazonii, západoafrický monzun a další) by mohlo být dohnáno k náhlým nebo nevratným změnám. Nebezpečí překročení kritických hodnot („bodů zvratu“) se silně zvyšuje s pokračující změnou klimatu. Čekání na vyšší míru vědecké jistoty tedy může znamenat, že některé body zvratu budou překročeny dříve, než je rozpoznáme.

**Zásadní změna musí přijít brzy:** Máme-li omezit globální oteplování na maximálně 2 °C nad úroveň před průmyslovou revolucí, musejí celosvětové emise vyvrcholit mezi roky 2015 a 2020 a pak rychle klesat. Aby se podnebí stabilizovalo, musíme dekarbonizované globální společnosti – s emisemi CO<sub>2</sub> a ostatních skleníkových plynů s dlouhou životností blízkými nule – dosáhnout brzy v tomto století. Konkrétněji, průměrné roční emise na osobu budou muset do roku 2050 klesnout hodně pod jednu tunu CO<sub>2</sub>. To je o 80 % až 95 % méně než emise na osobu v rozvinutých zemích v roce 2000.

# Skleníkové plyny a uhlíkový cyklus

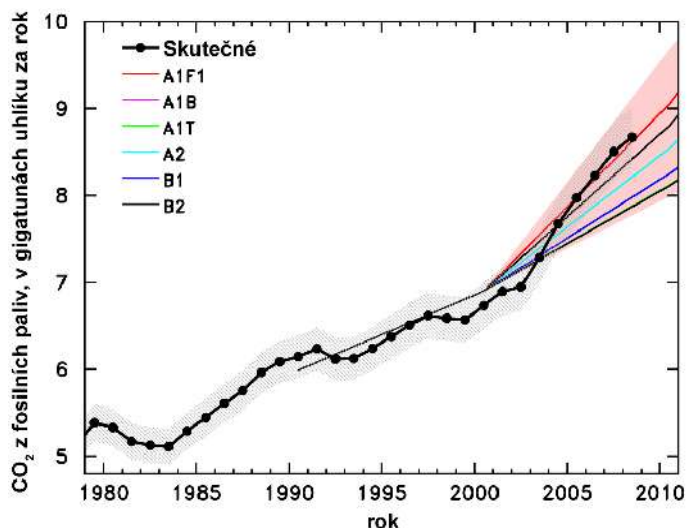
- Celosvětové emise oxidu uhličitého (CO<sub>2</sub>) ze spalování fosilních paliv byly v roce 2008 o 40 % vyšší než v roce 1990, tempo jejich růstu se za posledních 18 let ztrojnásobilo.
- Celosvětové emise CO<sub>2</sub> ze spalování fosilních paliv se drží téměř nejvyšších scénářů dosud uvažovaných IPCC.
- Za posledních 50 let pravděpodobně poklesl podíl emisí CO<sub>2</sub> absorbovaný do zásobáren CO<sub>2</sub> v půdě a v oceánu asi o 5 % (z 60 % na 55 %), ačkoli meziroční kolísání je velké.

## Globální emise oxidu uhličitého

V roce 2008 byly celosvětové emise oxidu uhličitého (CO<sub>2</sub>) ze spalování fosilních paliv, výroby cementu a změn využití půdy (hlavně odlesňování) celkem o 27 % vyšší než v roce 1990 (Le Quéré et al. 2009). V této celkové hodnotě byly emise CO<sub>2</sub> ze spalování fosilních paliv a výroby cementu v roce 2008 ve srovnání s rokem 1990 vyšší o 40 %. Globální tempo růstu emisí CO<sub>2</sub> z fosilních paliv se za posledních 18 let zvýšilo trojnásobně, a to z 1,0 % ročně v 90. letech na 3,4 % za rok v období 2000–2008 (Obrázek 1). Zrychlený růst emisí CO<sub>2</sub> z fosilních paliv od roku 2000 byl způsoben především vysokým tempem růstu v rozvojových zemích (zejména v Číně) částečně díky většímu mezinárodnímu obchodu se zbožím (Peters a Hertwich 2008) a zpomalením předcházejícího zlepšování uhlíkové intenzity světové ekonomiky (Raupach et al. 2007). Pozorované zvyšování emisí CO<sub>2</sub> z fosilních paliv se drží emisních scénářů z horního okraje rozsahu použitého v IPCC AR4 (Nakicenovic et al. 2000). Naproti tomu emise CO<sub>2</sub> ze změn využití půdy byly v minulých několika desetiletích poměrně konstantní. Předběžné údaje naznačují, že v roce 2009 celkové emise CO<sub>2</sub> nevzrostly (Olivier a Peters 2010), ale to je dočasný jev plynoucí z celosvětové recese, a nikoli známka transformace nezbytné ke stabilizaci skleníkových plynů v atmosféře.

## Oxid uhličitý

Koncentrace CO<sub>2</sub> v atmosféře dosáhla v roce 2008 385 částic z milionu (ppm) (Obrázek 2). Koncentrace CO<sub>2</sub> v atmosféře je o více než 105 ppm nad svojí přirozenou úroveň před průmyslovou revolucí. Současná koncentrace je vyšší než kdykoli za posledních 800 000 let a možná za posledních 3 až 20 milionů let (Luthi et al. 2008; Tripathi et al. 2009; Raymo et al. 1996). V letech 2000 až 2008 se úroveň CO<sub>2</sub> zvyšovala tempem 1,9 ppm za rok, což je více než přírůstky 1,5 ppm za rok v 90. letech. Toto tempo růstu CO<sub>2</sub> v atmosféře je více než desetkrát vyšší než nejvyšší tempo zjištěné z údajů z ledových vývrtnů; takto vysoké tempo by bylo v ledových vývrtních rozpoznatelné, pokud by k němu došlo kdykoliv během posledních 22 000 let (Joos a Spahni 2008).



**Obrázek 1.** Pozorované celosvětové emise CO<sub>2</sub> ze spalování fosilních paliv a výroby cementu ve srovnání s emisními scénáři IPCC (Le Quéré et al. 2009). Pozorování až do roku 2006 pocházejí z Centra pro rozbor informací o oxidu uhličitém (CDIAC) při Ministerstvu energetiky USA. V letech 2007 a 2008 vycházejí z ekonomických údajů BP. Emisní scénáře jsou zprůměrovány přes rodiny scénářů představené v Nakicenovic et al. (2000). Stínovaná plocha pokrývá všechny scénáře používané IPCC k projekcím změny klimatu. Emise v roce 2009 nepřekročily hodnotu platnou pro rok 2008.

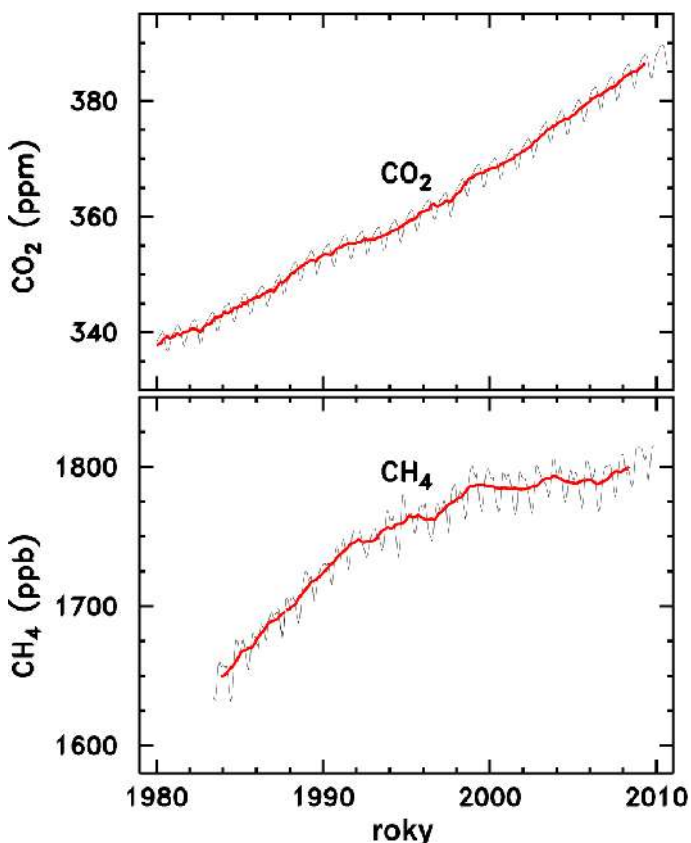
## Metan

Koncentrace metanu (CH<sub>4</sub>) v atmosféře se od roku 2007 zvýšila na 1800 částic z miliardy (ppb) po téměř deseti letech malých změn (Obrázek 2). Příčiny současného nárůstu CH<sub>4</sub> nebyly zatím určeny. Prostorové rozložení nárůstu CH<sub>4</sub> ukazuje, že zvýšené emise CH<sub>4</sub> na severní polokouli hrají svou roli a mohou v signálu převažovat (Rigby et al. 2008), ale zdroj nárůstu není znám.

CH<sub>4</sub> se uvolňuje při mnoha průmyslových procesech (pasení dobytka, pěstování rýže, spalování biomasy, těžba uhlí a v odvětví ropy a zemního plynu) a z přirozených zásobáren (mokřadů, permafrostu a rašelinišť). Roční emise CH<sub>4</sub> z průmyslu nejsou k dispozici, jelikož se těžko vyčíslují. Emise CH<sub>4</sub> z přirozených zdrojů se mohou s oteplováním zvyšovat. To bylo pozorováno při tání permafrostu ve Švédsku (viz kapitolu **Permafrost**), ale nejsou k dispozici doklady z rozsáhlých území pro jasné spojení tohoto procesu se současným nárůstem CH<sub>4</sub>. Pokud je tento růst CH<sub>4</sub> způsoben reakcí přirozených zá-



sobáren na oteplování, mohl by pokračovat desetiletí až staletí a zvýšit zátěž atmosféry skleníkovými plyny.



**Obrázek 2.** Koncentrace CO<sub>2</sub> (nahore) a CH<sub>4</sub> (dole) v atmosféře. Trendy po odstranění sezónního cyklu jsou vyznačeny červeně. CO<sub>2</sub> a CH<sub>4</sub> jsou dva nejdůležitější antropogenní skleníkové plyny. Data pocházejí z [Earth System Laboratory](#) amerického Národního úřadu pro oceán a atmosféru (NOAA). CO<sub>2</sub> je globální průměr. CH<sub>4</sub> je dle měření na stanici Mauna Loa.

## Propady uhlíku a jejich zranitelnost do budoucna

Zásobárny CO<sub>2</sub> v oceánu a na pevnině – „propady uhlíku“ – nadále pohlcují více než polovinu celkových emisí CO<sub>2</sub>. Za posledních 50 let nicméně podíl emisí pohlcený těmito zásobárnami pravděpodobně poklesl asi o 5 % (ze 60 % na 55 %) (Canadell et al. 2007). Neurčitost tohoto odhadu je vysoká kvůli značné meziroční proměnlivosti tohoto procesu a z důvodu nejistoty emisí CO<sub>2</sub> ze změn využití krajiny.

Pokles účinnosti jímání těmito propady, o kterém svědčí pozorování, lze vysvětlit reakcí propadů CO<sub>2</sub> na pevnině a v oceánu na proměnlivost klimatu a současnou změnu klimatu (Le Quéré et al. 2009). Dlouhodobý pokles účinnosti pozemských a oceánských propadů CO<sub>2</sub> by vedl k zesílení změny klimatu vlivem většího množství CO<sub>2</sub> zůstávajícího v atmosféře. Mnoho nových studií prokazuje nedávný pokles účinnosti oceánského propadu uhlíku v odstraňování antropogenního CO<sub>2</sub> z atmosféry. V Jižním oceánu se propad CO<sub>2</sub> nezměnil od roku 1981 navzdory velikému nárůstu CO<sub>2</sub> v atmosféře (Le Quéré et al. 2007; Metzl 2009; Takahashi et al. 2009). Trendy v Jižním oceánu byly přisouzeny nárůstu rychlosti větrů, který je pravděpodobně důsledkem úbytku ozónu (Loveland et al. 2008). Podobně v severním Atlantiku poklesl propad CO<sub>2</sub> od roku 1990 asi o 50 % (Schuster et al. 2009), i když část tohoto poklesu je připisována přirozené proměnlivosti (Thomas et al. 2008).

Budoucí zranitelnost globálních propadů CO<sub>2</sub> (oceánských a pevninských) nebyla od IPCC AR4 přehodnocena. Naše současné chápání ukazuje na to, že účinnost přirozených propadů CO<sub>2</sub> bude během tohoto století klesat a zásobárny na pevnině mohou dokonce začít CO<sub>2</sub> uvolňovat (Friedlingstein et al. 2006). Modely ukazují, že reakce propadů na zvýšenou úroveň CO<sub>2</sub> a změnu klimatu zesílí globální oteplování o 5 % až 30 %. Pozorování, která jsou zatím k dispozici, nestačí na to, aby poskytla větší míru jistoty, ale nevylučují nejvyšší zesílení globálního oteplování, které se objevuje v modelových projekcích (Le Quéré et al. 2009).

### Není už skleníkový efekt saturovaný, takže se přidáváním dalšího CO<sub>2</sub> nezmění?

Ne, ani vzdáleně není. Není saturovaný dokonce ani na planetě Venuši s maximalizovaným skleníkovým jevem, jejíž stokrát hmotnější atmosféra je tvořena z 96 % CO<sub>2</sub> a teplota na povrchu dosahuje 467 °C, což je více než na Merkuru (Weart a Pierrehumbert 2007). Důvod je jednoduchý: jak stoupáme atmosférou vzhůru, vzduch je stále řidší. Teplota uniká ze Země zářením do vesmíru většinou z vyšších hladin atmosféry, nikoli od povrchu – v průměru z výšky okolo 5,5 km. A právě tam na přidání dalšího CO<sub>2</sub> záleží. Když takový další oxid uhličitý přidáme, vrstva přiléhající k povrchu Země, v níž je efekt CO<sub>2</sub> do značné míry saturován, ztloustne – lze si to představit jako vrstvu mlhy viditelnou pouze v infračervené oblasti. Když tato „mlžná vrstva“ ztloustne, záření může do vesmíru unikat pouze z vyšších hladin atmosféry, kde atmosféra nakonec dosáhne teploty radiční rovnováhy –18 °C. Takový posun „plochy sálající do vesmíru“ směrem vzhůru znamená ve výsledku teplejší povrch, protože směrem dolů se teplota ovzduší zvyšuje průměrně o 6,5 °C na každý kilometr, jak se klesající vzduch stlačováním ohřívá. Zvětšení „mlžné vrstvy CO<sub>2</sub>“, která obklopuje naši Zemi, o 1 km tedy vede k ohřátí podnebí na povrchu o zhruba 6,5 °C.

# Atmosféra

- Trendy globální teploty vzduchu, vlhkosti a srážek vykazují zřetelnou stopu, kterou nelze vysvětlit jinými jevy než nárůstem koncentrací skleníkových plynů v atmosféře.
- Přestože byla sluneční aktivita v posledních několika letech relativně nízká, každý rok tohoto století (2001–2009) patří mezi 10 nejteplejších let od počátku přístrojového měření.
- Globální teploty atmosféry jeví od 70. let 20. století silný trend oteplování (celkem o 0,6 °C), v souladu s očekáváním tempa oteplování způsobeného skleníkovým jevem.

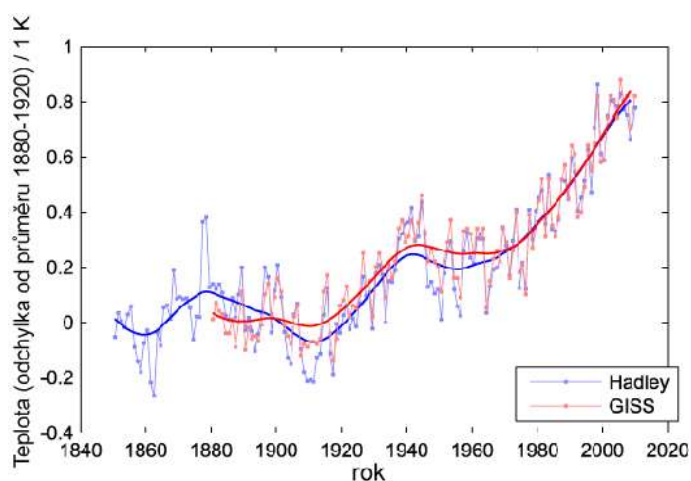
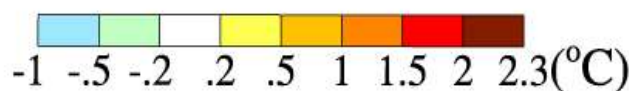
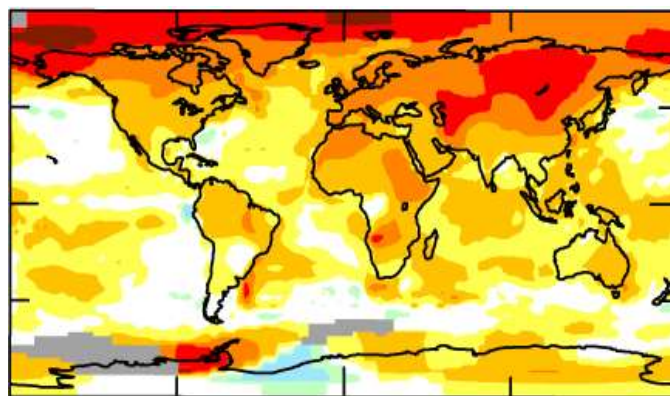
## Trendy globální teploty

IPCC AR4 představila „jednoznačný obrázek o probíhajícím oteplování klimatického systému“. Atmosféra se nadále otepluje, přestože rok 2008 byl chladnější než rok 2007 (Obrázek 3). IPCC udával například pětadvacetiletý trend pro období končící rokem 2006 (vycházející z dat HadCRUT)  $0,177\text{ °C} \pm 0,052\text{ °C}$  za desetiletí. Aktualizujeme-li jej zahrnutím dalších dvou let (2007 a 2008), získáme pro období končící rokem 2008 trend  $0,187\text{ °C} \pm 0,052\text{ °C}$  za desetiletí. V současnosti tedy pozorujeme trend probíhajícího oteplování klimatu v souladu s předpovědí IPCC.

Rozdíly v průměrné globální teplotě z roku na rok nejsou pro vyhodnocení dlouhodobých klimatických trendů důležité. Během oteplování pozorovaného ve 20. století leží kvůli vnitřní proměnlivosti klimatu jednotlivé roky nad nebo pod čarou dlouhodobého trendu (jako rok 1998); to je normální a přirozený jev. Například v roce 2008 se vyskytla La Niña, klimatický jev, který přirozeně způsobuje dočasný pokles průměrné globální teploty. Současně s tím byla také sluneční aktivita na své nejnižší úrovni za období družicových měření, což je další dočasný ochlazující vliv. Nebýt antropogenního oteplování, tyto dva faktory by měly mít za následek, že rok 2008 bude patřit mezi nejchladnější za dobu přístrojového měření, zatímco ve skutečnosti byl podle záznamů 9. nejteplejším. To podtrhuje silné oteplování atmosféry způsobené skleníkovým jevem, ke kterému dochází během posledního století. Uplynulé desetileté období je teplejší než předchozí desetileté období a dlouhodobý trend oteplování je zřejmý a jednoznačný (Obrázek 3).

## Je oteplování přirozené, nebo vyvolané lidmi?

Naše porozumění příčinám současného staletého trendu se od IPCC AR4 dále zlepšilo. Zdaleka největší část oteplování pozorovaného za poslední století je způsobena lidskými faktory. Například Lean a Rind (2008) analyzovali roli přirozených faktorů (např. kolísání sluneční aktivity, sopek) versus lidských vlivů na teploty od roku 1889. Zjistili, že podíl Slunce na oteplování povrchu za poslední století činil jen asi 10 % a za poslední čtvrtstoletí byl zanedbatelný, což je méně než v předchozích odhadech. Od hodnocení AR4 nebyla vydána žádná věrohodná vědecká literatura, která by podporovala alternativní hypotézy vysvětlení trendu oteplování.



**Obrázek 3.** (nahore) Změna průměrné teploty povrchu (ve °C) v letech 2001–2007 vzhledem ke srovnávacímu období 1951–1980 a (dole) globální průměrná teplota za období 1850–2009 vzhledem ke srovnávacímu období 1880–1920 odhadnutá (nahore) ze souboru dat NASA / GISS a (dole) z dat NASA / GISS a Hadleyho centra. Data z rekonstrukce teploty povrchu oceánů z NOAA ukazují podobné výsledky.

## Dochází k oteplování vysoko v atmosféře?

IPCC AR4 poukázala na přetrvávající nejistotu ohledně teplotních trendů v atmosféře nad nejnižšími vrstvami v blízkosti povrchu Země. Většina tehdy dostupných souborů dat vykazovala menší než očekávané oteplování v oblasti atmosféry nazývané tropická svrchní troposféra, ve výšce deset až patnáct kilometrů nad povrchem. Tato

pozorování však trpěla významnými problémy se stabilitou, obzvláště v oblasti těchto výšek. Od té doby vědci provedli dodatečné analýzy stejných dat s využitím důkladnějších technik a vyvinuli novou metodu stanovení teplotních trendů z měření větru (Allen a Sherwood 2008). Nové odhady založené na pozorování vykazují větší oteplování než ty předchozí a tento nový, větší soubor odhadů nyní jako celek odpovídá trendům předpovídaným modely (Thorne 2008). To odstraňuje značnou nejasnost vyjádřenou v AR4 (Santer et al. 2008).

## Vodní pára, srážky a hydrologický cyklus

Nový výzkum a pozorování rozřešily otázku, jestli oteplování klimatu povede k vyššímu obsahu vodní páry v atmosféře, která přispěje ke skleníkovému efektu a zesílí oteplování. Odpověď zní ano, tato posilující zpětná vazba byla zjištěna: teplejší atmosféra obsahuje větší množství vodní páry (Dessler et al. 2008). Družicová data ukazují, že obsah vláhy v ovzduší nad oceány se od roku 1998

zvýšil a že příčinou toho jsou skleníkové emise (Santer et al. 2007).

Žádná studie citovaná v IPCC AR4 nespojovala pozorované trendy srážek v padesátiletém časovém období s antropogenní změnou klimatu. Nyní s ní lze tyto trendy spojit. Například Zhang et al. (2007) zjistili, že na severní polokouli v subtropích došlo k poklesu srážek, ale ve středních zeměpisných šířkách k jejich nárůstu, a že to lze přisoudit lidmi způsobenému globálnímu oteplování. Podle projekcí modelů se budou tyto trendy posilovat s tím, jak teploty porostou.

Nedávný výzkum také ukázal, že s rostoucím obsahem vodní páry v atmosféře se dešť stává intenzivnějším v již deštivých oblastech (Wentz et al. 2007; Allan a Soden 2008). Jejich závěry posilují ty z dřívějších studií. K současným změnám však došlo ještě rychleji, než se předpovídalo, což naznačuje, že změny v budoucnu by mohly být vážnější, než se předpovídá. Toto je společný bod posledních vědeckých poznatků: když se vyřeší neurčitosti existující v AR4, tak to ukazuje, že klima je rychleji se měnící a citlivější, než jsme si mysleli dříve.

## Nezpomalilo nebo nezastavilo se globální oteplování v poslední době?

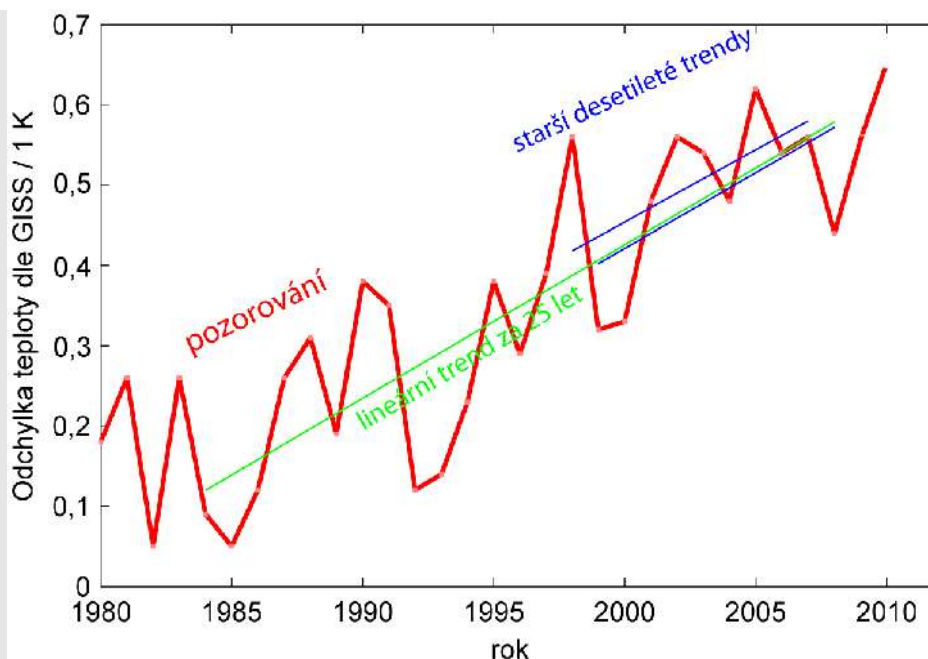
Ne. V datech není žádná známka zpomalení ani pozastavení trendu oteplování podnebí způsobeného lidmi. Pozorované změny globální teploty jsou zcela v souladu s trendem oteplování asi o 0,2 °C za desetiletí, jak předpovídal IPCC, který je modifikován krátkodobým kolísáním (viz Obrázek 4). Ke kolísání v klimatickém systému vždy docházelo a vždy docházet bude. Většina této krátkodobé proměnlivosti je dána oscilacemi samotného klimatického systému (jako je El Niño – Jižní oscilace), proměnností Slunce (převážně jedenáctiletým Schwabeho cyklem) a sopečnými erupcemi (které, jako Pinatubo v roce 1991, mohou způsobit ochlazení trvající několik let).

Pokud se podíváme na období deseti let nebo kratší, může toto krátkodobé kolísání převážet nad trendem antropogenního globálního oteplování. Například jev El Niño obvykle doprovázejí změny průměrné globální teploty až o 0,2 °C po několik let a cyklus sluneční aktivity přináší oteplení nebo ochlazení o 0,1 °C po dobu pěti let (Lean a Rind 2008). Nicméně ani El Niño, ani sluneční aktivita nebo sopečné erupce významně nepřispívají k dlouhodobějším klimatickým trendům. IPCC zvolil z dobrého důvodu 25 let jako nejkratší dobu, pro niž se uvádí trend v záznamech globální teploty. Za tento časový úsek souhlasí pozorovaný trend s očekávaným antropogenním oteplováním velmi dobře.

Ke globálnímu snížení teploty ale nedošlo ani za období posledních deseti let, v protikladu k tvrzením, která šíří lobbující skupiny a vypichují některá média. Všechny poslední desetileté trendy (tj. 1990–1999, 1991–2000 a tak dále) globální teploty dle dat NASA byly v rozmezí 0,17 °C až 0,34 °C oteplení za desetiletí, což je blízko k očekávanému antropogennímu trendu nebo nad ním, např. trend 1999–2008 činil 0,19 °C za deset let. Data Hadleyho centra vykazují v poslední době slabší trendy oteplování (0,11 °C za desetiletí 1999–2008) především kvůli tomu, že jejich soubor dat není plně globální, protože vynechává Arktidu, která se v posledních letech oteplovala obzvláště silně.

Je docela pozoruhodné, že navzdory neobyčejně nízké zářivosti Slunce během uplynulých tří let (viz další odpověď) byly v tomto období překonány teplotní rekordy (viz NOAA, State of the Climate, 2009). Například březen 2008 byl co do globální teploty pevniny nejteplejší ze všech březnů zaznamenaných za dobu přístrojového měření. V červnu a srpnu 2009 byly teploty na pevnině i na oceánu jižní polokoule nejvyšší, jaké kdy byly v těchto měsících zaznamenány. Globální teploty povrchu oceánu překonaly v roce 2009 všechny předchozí rekordy ve třech po sobě jdoucích měsících: červnu, červenci a srpnu. V letech 2007, 2008 a 2009 dosáhla plocha mořského ledu v letní Arktidě historicky nejnižší hodnoty a v roce 2008 byly, až kam paměť lidí sahá, poprvé současně bez ledu severozápadní i severovýchodní mořská cesta. To se opakovalo i v roce 2009 a 2010, kdy jimi poprvé za jedno léto [obepluly dvě plachetnice](#) severní pól. Každý rok tohoto století (2001–2010) je mezi jedenácti nejteplejšími roky za dobu přístrojového měření.



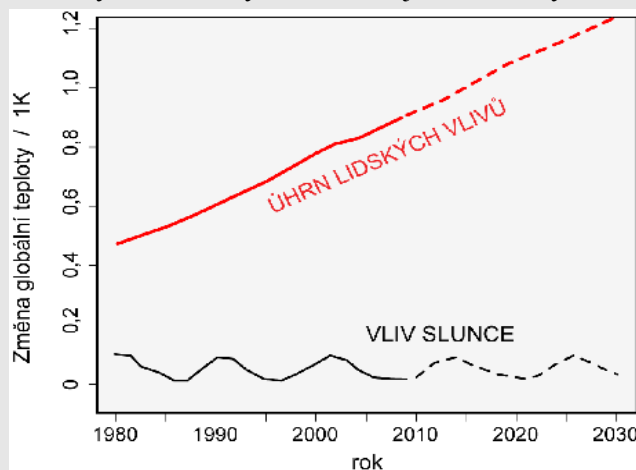


**Obrázek 4.** Globální teplota podle údajů NASA GISS od roku 1980. Červená čára vyjadřuje roční údaje. Zelená čára vyznačuje pětadvacetiletý lineární trend (0,19 °C za desetiletí). Modré linky vyjadřují dva starší desetileté trendy (0,18 °C za desetiletí 1998–2007, 0,19 za desetiletí 1999–2008) a ukazují, že i tyto desetileté trendy jsou zcela v souladu s dlouhodobým trendem a s předpověďmi IPCC. Nedorozumění ohledně trendů oteplování může nastat, pokud ukážeme jen vybranou část těchto dat, např. roky 1998 až 2008, a soustředíme se na extrémy nebo koncové body (např. 2008, jenž byl chladnější než 1998) spíše než na objektivní výpočet trendu. Dokonce i zvláště účelově vybrané jedenáctileté období začínající teplým rokem 1998 a končící chladným rokem 2008 stále vykazuje trend oteplování o 0,11 °C za desetiletí.

### Lze globální oteplování vysvětlit pomocí sluneční aktivity nebo jiných přirozených procesů?

Ne. Dopadající sluneční záření bylo během posledních 50 let téměř konstantní, kromě dobře známého jedenáctiletého slunečního cyklu (Obrázek 5). Ve skutečnosti za tuto dobu lehce pokleslo. Kromě toho v uplynulých třech letech dosáhla zářivost Slunce minima za celou dobu od začátku družicových měření v 70. letech 20. století (Lockwood a Fröhlich 2007, 2008). Ale tento přirozený ochlazující efekt byl více než desetkrát slabší než účinek rostoucí koncentrace skleníkových plynů, takže globální oteplování ztlačil. Dále, zimy se oteplují rychleji než léta a noční minimální teploty rostou rychleji než denní maxima – přesný opak toho, jak by to bylo, kdyby oteplování způsobovalo Slunce.

Další přirozené faktory jako sopečné erupce nebo jev El Niño způsobily pouze krátkodobé výkyvy teploty v délce trvání několika let, ale nemohou vysvětlit žádný dlouhodobější klimatický trend (např. Lean a Rind 2008).



**Obrázek 5.** Časové řady oslunění Země spolu s celkovým účinkem emisí skleníkových plynů (ten je vztažen k roku 1880; podle Meehl et al. 2004) znázorněné ve formě celkového odhadovaného vlivu na globální teplotu vzduchu: pozorovanou v letech 1970–2008 a projektovanou na roky 2009–2030 (upraveno z Lean a Rind 2009).



# Extrémní jevy

- **Přibývání horkých extrémů a úbytek chladných extrémů pokračují a očekává se, že se budou dále zesilovat.**
- **Očekává se, že antropogenní změna klimatu povede k dalšímu nárůstu extrémů souvisejících se srážkami, jak k přibývání silných srážek, tak ke zvýšenému suchu.**
- **Ačkoli budoucí změny aktivity tropických cyklón zatím nelze modelovat, nové analýzy naměřených dat potvrzují, že intenzita tropických cyklón za poslední tři desetiletí vzrostla v souladu s nárůstem teploty tropických oceánů.**

Mnohé z dopadů kolísání klimatu a jeho změny na společnost, životní prostředí a ekosystémy jsou způsobeny změnami četnosti nebo intenzity extrémních povětrnostních jevů a klimatických událostí. Čtvrtá hodnotící zpráva IPCC (IPCC 2007) došla k závěru, že od 70. let 20. století bylo pozorováno mnoho změn extrémů v souvislosti s oteplováním klimatického systému. Patří mezi ně více horkých dnů a nocí, horkých vln; méně studených dnů a nocí a mrazů; častější výskyt silných srážek; intenzivnější a delší sucha na větších oblastech; a nárůst aktivity, pokud jde o intenzivní tropické cyklóny v severním Atlantiku, ale žádný trend v celkovém počtu tropických cyklón.

## Teplotní extrémy

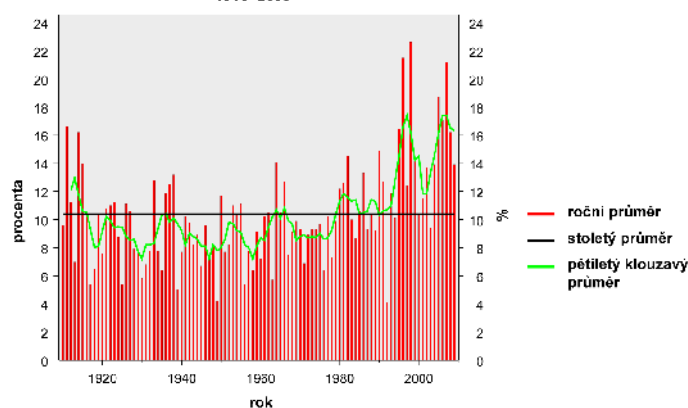
Poslední studie potvrzují pozorované trendy více horkých extrémů a méně chladných extrémů a ukazují, že tyto trendy jsou, bráno přes velké oblasti, v souladu s očekávanou reakcí na nárůst skleníkových plynů a antropogenních aerosolů (CCSP 2008a; Meehl et al. 2007a; Jones et al. 2008; Alexander a Arblaster 2009). Nicméně v menších měřítkách mohou být pro změny teplotních extrémů v některých místech důležitější vlivy změny využití půdy a kolísání srážek (Portmann et al. 2009). Ve většině regionů po celém světě se očekává, že budou pokračovat výrazné nárůsty horkých extrémů a poklesy chladných extrémů vlivem další antropogenní změny klimatu (CCSP 2008a; Kharin et al. 2007; Meehl et al. 2007a; Jones et al. 2008; Alexander a Arblaster 2009).

## Srážkové extrémy a sucho

Výzkum po IPCC AR4 také zjistil, že s rostoucím obsahem vodní páry v atmosféře se dešť v již deštivých oblastech stává intenzivnějším (Pall et al. 2007; Wentz et al. 2007; Allan a Soden 2008). Tyto závěry posilují ty z dřívějších studií a očekávaly se na základě úvah o termodynamice atmosféry. K současným změnám však došlo ještě rychleji, než předpovídaly některé klimatické modely, což upozorňuje na možnost, že změny v budoucnu budou vážnější, než se předpovídá. Příklad nedávného nárůstu silných srážek lze najít ve Spojených státech, kde výrazně vzrostla plocha s mnohem vyšším než normálním podílem dní s extrémním množstvím srážek (viz Obrázek 6). I když jsou tyto změny srážkových extrémů v souladu s oteplováním klimatického systému, není možné je s vysokou mírou spolehlivosti připsat antropogenní změně klimatu, a to kvůli velmi vysoké

proměnlivosti srážkových extrémů (CCSP 2008a; Meehl et al. 2007b; Alexander a Arblaster 2009).

**Index klimatických extrémů: USA, srážky**  
celoroční  
1910–2009



**Obrázek 6.** Na rostoucí části území USA dochází k výskytu dnů s velmi silnými srážkami. Roční hodnoty v procentech území Spojených států s mnohem vyšším než normálním podílem velmi silných denních srážek (odpovídajících desátému nejvyššímu percentilu) na srážkovém úhrnu. Z práce Gleason et al. (2008) aktualizované NOAA na [www.ncdc.noaa.gov/oa/climate/research/cei/cei.html](http://www.ncdc.noaa.gov/oa/climate/research/cei/cei.html).

Kromě nárůstu silných srážek je od 70. let 20. století pozorován rovněž zvýšený výskyt sucha (Sheffield a Wood 2008) v souladu s poklesem průměrných srážek nad pevninou v některých zeměpisných pásmech, který je přisuzován antropogenní změně klimatu (Zhang et al. 2007). Očekává se, že zintenzivnění globálního hydrologického cyklu s antropogenní změnou klimatu povede k dalším nárůstům srážkových extrémů, a to jak k nárůstu silných srážek ve vlhkých oblastech, tak ke zvýšenému výskytu sucha v suchých oblastech. I když ještě nelze udat přesné hodnoty, současné studie naznačují, že výskyt silných srážek může vzrůst o 5 % až 10 % na 1 °C oteplení, podobně jako poroste obsah vodní páry v atmosféře.

## Tropické cyklóny

Čtvrté hodnocení IPCC zjistilo podstatný vzestupný trend závažnosti tropických cyklón (hurikánů a tajfunů) od poloviny 70. let 20. století s tendencí k delšímu trvání a vyšší intenzitě bouří, silně korelovaný s růstem povrchových teplot tropických moří. Došlo k závěru, že další nárůst intenzity bouří je pravděpodobný.

Několik studií od zprávy IPCC našlo další důkazy nárůstu hurikánové aktivity během posledních desítek let. Hoyos et al. (2006) zjistili globální nárůst počtu hurikánů nejsilnějších kategorií 4 a 5 a jako jeho hlavní příčinu určili stoupající povrchovou teplotu moře (SST). Zvyšující se tropická SST byla dána do souvislosti se stále intenzivnější tropickou cyklonální aktivitou – a s rostoucím počtem tropických cyklón – v případě určitých rozlehlých oblastí, např. severního Atlantiku (Mann a Emanuel 2006; Emanuel et al. 2008; Mann et al. 2009). Pokračuje vědecká diskuse o kvalitě dat, zejména o otázce, kolik tropických cyklón se mohlo nepozorovaně udát předtím, než družice zajistily pozorování s globálním pokrytím. Mann et al. (2007) došli k závěru, že takové podhodnocení by nebylo dostatečně velké na to, aby zpochybnilo současný nárůst hurikánové aktivity a jeho těsnou souvislost s oteplováním povrchu moře. Úplná reanalýza družicových dat od roku 1980 (Elsner et al. 2008) potvrzuje celosvětový nárůst počtu tropických cyklón kategorie 4 a 5 (tj. těch nejsilnějších): zjistili, že globální oteplení o 1 °C odpovídá nárůstu těchto bouří o 30 %. I když se tedy značně upevňovaly důkazy o tom, že současné oteplování je doprovázeno silnějšími tropickými cyklóny,

modelové studie (např. Emanuel et al. 2008; Knutson et al. 2008; Vecchi et al. 2008) ukazují, že zatím nemáme spolehlivé nástroje pro projekce budoucích změn tropické cyklonální aktivity.

### **Další vážné povětrnostní jevy**

Čtvrté hodnocení IPCC došlo k závěru, že není k dispozici dostatek studií pro posouzení pozorovaných změn výskytu vážných povětrnostních jevů malého měřítka nebo očekávaných budoucích změn ohledně těchto jevů. Poslední výzkum nicméně ukazuje, že s budoucí antropogenní změnou klimatu v některých regionech, konkrétně v tropech a na jihovýchodě USA, lze očekávat vyšší četnost silných bouřek (Trapp et al. 2007; Aumann et al. 2008; Marsh et al. 2009; Trapp et al. 2009). Kromě toho v mnoha regionech s podnebím středozemního typu (např. ve Španělsku, Řecku, jižní Kalifornii, jihovýchodní Austrálii) došlo v poslední době k nárůstu četnosti i intenzity ničivých požárů a vlivem antropogenní změny klimatu se očekává jejich další výrazný nárůst (Westerling et al. 2006; Pitman et al. 2008).

# Povrch pevnin

- Změna pokrytí země, zejména odlesňování, může mít značný dopad na regionální klima, ale její největší vliv v globálním měřítku pochází z CO<sub>2</sub> uvolněného v tomto procesu.
- Pozorování z období sucha v Amazonii v roce 2005 naznačují, že pokud v budoucnosti poklesnou srážky, mohou se tropické lesy stát silnými zdroji uhlíku.
- Změny oxidu uhličitého během malé doby ledové naznačují, že oteplování může naopak vést k uvolňování uhlíku z povrchu pevnin, tedy ke zpětné vazbě, která by mohla zesílit změnu klimatu ve 21. století.
- Zabráněním odlesňování v tropech by šlo předejít až 20 % lidmi způsobených emisí CO<sub>2</sub> a pomoci udržet biodiverzitu.

## Jaký vliv má změna využití půdy na klima?

Podnebí Země je silně ovlivněno povahou jejího pevného povrchu, což zahrnuje typ vegetace a půdy a množství vody uložené na pevninách jako půdní vlhkost, sníh a podzemní voda. Vegetace a půdy ovlivňují albedo povrchu, které určuje množství slunečního záření pohlceného zemí. Povrch země ovlivňuje také rozdělení objemu srážek pro evapotranspiraci (která ochlazuje povrch a zvlhčuje atmosféru) a odtok (který zajišťuje velkou část naší pitné vody). Toto rozdělení může ovlivnit místní konvekci, a tudíž množství srážek. Změny využití půdy související s rozšiřováním zemědělství, s urbanizací a s odlesňováním mohou tyto mechanismy pozměnit. Změna využití půdy může změnit také drsnost povrchu, ovlivnit emise stopových plynů a některých těkavých organických látek, např. isoprenu. Navzdory tomu, že v regionálním měřítku hraje změna pokrytí půdy klíčovou roli, projekce klimatických modelů IPCC AR4 antropogenní změnu pokryvu země nezahrnovaly.

Od IPCC AR4 došlo k významnému pokroku v modelování úlohy změny pokrytí půdy (Pielke et al. 2007), včetně první systematické studie prokazující, že změna povrchu země velkého rozsahu má přímý a značný vliv na regionální klima (Pitman et al. 2009). To má důležité důsledky pro pochopení budoucí klimatické změny; klimatické modely musejí simulovat změnu povrchu země, aby zachytily regionální změny v oblastech s intenzivními změnami pokrytí půdy. Nezahrnutí změny pokrytí půdy však pravděpodobně nemá vliv na projekce globálního měřítku (Pitman et al. 2009) s poukazem na to, že emise ze změn pokrytí půdy jsou v projekcích zahrnuty.

Změna pokrytí půdy ovlivňuje totiž změnu klimatu rovněž uvolňováním CO<sub>2</sub> do atmosféry a změnou ukládání uhlíku v krajině (Bondeau et al. 2007; Fargione et al. 2008). Nejnápadnějším příkladem toho je ničení tropických lesů, které má asi pětina podíl na globálních emisích CO<sub>2</sub> a ovlivňuje také toky vody a energie z půdy do atmosféry (Bala et al. 2007). Zabráněním odlesňování by se tedy odstranila významná část antropogenních emisí CO<sub>2</sub> a udržely se oblasti jako amazonský deštný les, které podporují velkou biodiverzitu a hrají klíčovou roli v klimatickém systému (Malhi et al. 2008).

## Změna klimatu a amazonský deštný les

Rozložení a funkce vegetace kriticky závisejí na rozložení teploty a srážek po zeměkouli. Změna klimatu tedy má potenciál významně proměnit pokryv krajiny, i pokud by nedocházelo ke změnám využití půdy. Předmětem vážného znepokojení je zbývající nedotčená část amazonského deštného lesa, která může podle některých klimatických modelů uschnout vlivem společného účinku přibývání skleníkových plynů a snižování znečištění částicemi čili aerosolem na severní polokouli (Cox et al. 2008). Tyto projekce jsou nicméně velmi závislé na nejistých aspektech regionální klimatické změny, nejnápadněji na znaménku a velikosti změny množství srážek v 21. století v Amazonii (Malhi et al. 2008, 2009).

Vyvstávaly také určité pochybnosti o tom, zda je amazonský deštný les tak citlivý na pokles množství srážek, jak naznačovaly modely velkého rozsahu. Test této hypotézy s využitím dlouhodobého sledování růstu stromů obstaralo v roce 2005 sucho v západní Amazonii (Phillips et al. 2009), když tam byl zjištěn masivní zdroj uhlíku v kontrastu s významným ukládáním uhlíku v předchozích desetiletích. Lesy v Amazonii jsou tedy citlivé na sucho „typu roku 2005“ a očekává se, že taková budou ve 21. století běžnější (Cox et al. 2008) ([další nastalo již r. 2010](#)).

Podobný příběh se objevuje v analýze měření toků CO<sub>2</sub> pomocí družic i pozemních stanic během sucha v roce 2003 v Evropě (Reichstein et al. 2007). IPCC AR4 předběžně naznačuje spojení mezi globálním oteplováním a suchem roku 2003 a tato analýza ukazuje, že sucho mělo v tomto regionu obrovský dopad na zdraví i fungování přirozené i obhospodařované krajiny.

## Jak velké jsou zpětné vazby mezi povrchem země a podnebí?

Reakce povrchu země na klimatické anomálie má zpětný vliv na podnebí tím, že mění toky energie, vody a CO<sub>2</sub> mezi zemí a atmosférou. Zdá se například pravděpodobné, že změny stavu povrchu země, které následně pozměnily toky energie a vody do atmosféry, hrály důležitou roli pro délku a vážnost sucha v roce 2003 v Evropě (Fischer et al. 2007). V některých oblastech, například Sahelu, může být provázání zem–atmosféra dost silné na to, aby umožňovalo dva odlišné klimaticko-vege-

tační stavy: jeden vlhký s rostoucí vegetací a druhý suchý, pouštního typu. Možná že existují další „citlivá místa“, kde spojení zem–atmosféra významně řídí regionální klima; skutečně to vypadá, že krajina je silným klimatickým činitelem v mnoha regionech s polovypřahým nebo středomořským klimatem.

Nicméně nejsilnější zpětnou vazbou na globální klima v 21. století pravděpodobně budou změny propadu uhlíku na pevninách. Spojené modely klimatu a uhlíkového cyklu, o nichž pojednává IPCC AR4 (Friedlingstein et al. 2006), dokázaly reprodukovat historicky zaznamenané ukládání uhlíku v krajině především skrze „hnojení oxidem uhličitým“. Existují důkazy omezenosti takového hnojení v ekosystémech s nedostatkem dusíku (Hyvonen et al. 2007), ale první generace modelů klimatu a uhlíku nezahrnuje koloběh živin.

Modely klimatu a uhlíkového cyklu Čtvrté hodnotící zprávy představily také protichůdnou tendenci, že CO<sub>2</sub> se s oteplováním se podnebím uvolňuje z půdy rychleji, a jako výsledek tyto modely předpověděly snížení účinnosti jímání uhlíku v krajině při globálním oteplení. V posledních pozorováních existují určité známky oslabení přirozených propadů uhlíku (Canadell et al. 2007) a zdá se také, že silná zesilující zpětná vazba uhlík na pevninách – klima je ve shodě se záznamy z období malé doby ledové (Cox a Jones 2008).

### **Záleží povrchu země na příčinách změny klimatu?**

Ano. Na vegetaci působí odlišně různé znečišťující látky v atmosféře a to znamená, že vliv změn složení atmosféry nelze pochopit čistě na základě jejich dopadu na globální oteplení.

Nárůst CO<sub>2</sub> ovlivňuje krajinu změnou klimatu, ale rovněž přímo skrze hnojení oxidem uhličitým při fotosyntéze a „uzavírání průduchů vyvolané CO<sub>2</sub>“, které vede ke zvýšení účinnosti využívání vody rostlinou. Studie založené na pozorování ukázaly přímý vliv CO<sub>2</sub> na průduchy rostlin, které regulují toky vodní páry a CO<sub>2</sub> na povrchu listu. V prostředí s vyšším obsahem CO<sub>2</sub> se průduchy otevírají méně, neboť to pro přísun CO<sub>2</sub> stačí. Zmenší se tak i odpařování a vzroste účinnost, s níž rostliny využívají vodu, což má následně vliv na bilanci energie a vody v krajině.

Pokud je vyšší koncentrací CO<sub>2</sub> potlačeno vydechování vody, menší evaporativní ochlazování může vést i k vyšším teplotám (Cruz et al. 2009). Je také možné, že to bude mít pozitivní dopad na zdroje vody, ale to je stále předmětem aktivní diskuse (Gedney et al. 2006; Piao et al. 2007; Betts et al. 2007).

Oproti tomu nárůst přízemního ozónu má silný negativní dopad na vegetaci tím, že poškozují listy a jejich schopnost fotosyntetizovat. V důsledku toho historické nárůsty přízemního ozónu pravděpodobně omezily jímání uhlíku na pevnině, a tudíž zvýšily tempo růstu CO<sub>2</sub> během 20. století. Sitch et al. (2007) odhadují, že toto nepřímé působení na klimatickou změnu téměř zdvojnásobuje příspěvek přízemního ozónu ke změně klimatu ve 20. století.

Znečištění atmosféry aerosoly má rovněž přímý vliv na fyziologii rostlin tím, že mění množství a povahu slunečního světla dopadajícího na povrch pevnin. Rostoucí koncentrace aerosolů v letech 1950 až 1980, spojené především se spalováním uhlí s obsahem síry, zmenšily množství slunečního světla na povrchu, což bylo pojmenováno „globální stmívání“ (Wild et al. 2007). Jelikož rostliny potřebují sluneční světlo k fotosyntéze, mohli jsme v období globálního stmívání očekávat oslabení propadu uhlíku na pevnině, ale k tomu nedošlo. Mercado et al. (2009) pro to nabízejí vysvětlení založené na skutečnosti, že rostliny využívají sluneční světlo účinněji, je-li rozptýlené. Znečištění aerosoly samozřejmě rozptyluje sluneční světlo, čímž se obloha stává světlejší, ale současně se snižuje celkové množství slunečního světla dopadajícího na povrch. „Zúrodnování difúzním zářením“ patrně tuto bitvu vyhrálo, čímž se od roku 1960 do roku 2000 posílil globální propad uhlíku na pevnině zhruba o jednu čtvrtinu (Mercado et al. 2009). To znamená, že se pevninský propad uhlíku oslabí, pokud omezíme množství potenciálně škodlivých částic v ovzduší.

Tyto nové studie vydané od IPCC AR4 svědčí silně pro zavedení takových metrik k porovnávání různých znečišťujících látek v atmosféře, které by nezůstaly jen u radiačního působení a globálního oteplení, ale šly by k dopadům na životně důležité ekosystémové služby související s dostupností potravin a vody.



# Permafrost a hydráty

- **Nový náhled na permafrost (trvale zamrzlou půdu) na severní polokouli nasvědčuje tomu, že jde o velký potenciální zdroj CO<sub>2</sub> a CH<sub>4</sub>, který by zvýšil atmosférické koncentrace, pokud by došlo k jeho uvolnění.**
- **Nedávný nárůst globální úrovně metanu nelze zatím přisoudit degradaci permafrostu.**
- **Samostatný a významný zdroj metanu existuje v podobě hydrátů pod hlubokoocéánským dnem a v permafrostu. Nedávno se došlo k závěru, že uvolnění takového typu metanu v tomto století je velmi nepravděpodobné.**

Jak upozorňuje IPCC AR4 i novější studie, v Severní Americe se jižní hranice nesouvislé zóny trvale zamrzlé půdy v posledních desetiletích posunuje na sever. Na Tibetské náhorní plošině pokračuje rychlá degradace permafrostu a posun jeho spodní hranice rozšíření do vyšších nadmořských výšek (Jin et al. 2008; Cui a Graf 2009). Kromě toho v Evropě pozorování (Åkerman a Johansson 2008; Harris et al. 2009) zaregistrovala tání permafrostu a podstatný nárůst mocnosti aktivní vrstvy, která jej pokrývá a je vystavena ročnímu cyklu zamrzání/tání, zejména ve Švédsku.

S tím, jak permafrost roztává a hloubka aktivní vrstvy se zvyšuje, může se potenciálně začít rozpadat více organické hmoty. Je-li povrch pokrytý vodou, organické látky rozkládají bakterie produkující metan. Tyto bakterie ale nemohou přežít v přítomnosti kyslíku. Místo toho, jsou-li tající půdy vystaveny vzduchu, se procesu rozkladu účastní bakterie produkující oxid uhličitý. Oba případy jsou zesilující zpětnou vazbou pro globální oteplování. Ve skutečnosti představuje velikost této zpětné vazby důležitou neznámou ve výzkumu globálního oteplování; s touto zpětnou vazbou nepočítala žádná z projekcí IPCC. Celkové množství uhlíku uloženého v permafrostu se odhaduje na zhruba 1672 Gt (1 Gt = 10<sup>9</sup> tun), z nichž asi 277 Gt je obsaženo v rašelinných půdách (Schuur et al. 2008; Tarnocai et al. 2009). To představuje přibližně dvojnásobek množství uhlíku obsaženého v atmosféře. Nedávná analýza Dorrepaal et al. (2009) objevila při pozorování silný přímý důkaz zvýšení emisí uhlíku z rašelinště ležícího na permafrostu v lokalitě na severu Švédska v souvislosti s oteplováním klimatu. To, zda je nebo není v současné době pozorované zvyšování koncentrace metanu v atmosféře (Rigby et al. 2008), po téměř deseti letech její stabilní úrovně, způsobeno zvýšenou produkcí metanu na severní polokouli spojenou s oteplováním povrchu, není zatím jisté.

Jiná zesilující zpětná vazba oteplování, která byla nedávno pozorována ve vysokých severních zeměpisných šířkách, se týká mikrobiální přeměny dusíku zachyceného v půdě na oxid dusný. Repo et al. (2009) při měření emisí

oxidu dusného z nezakrytého rašelinného povrchu došli ke stejné velké emisím z metru čtverečního, jako činí na zemědělské půdě a v tropických zemích. Upozornili na to, že s tím, jak se Arktida otepluje, se budou zvětšovat oblasti holé exponované rašeliny, a tím porostou celkové emise oxidu dusného.

Domníváme se, že pod mořským dnem je uloženo mezi 500 a 10 000 Gt uhlíku ve formě hydrátů metanu, krystalických struktur (tzv. klatrátů) molekul metanu a vody (Brook et al. 2008). Dalších 7,5 až 400 Gt uhlíku je uloženo v podobě hydrátů metanu zachycených v permafrostu (Brook et al. 2008). Někteří tvrdí, že antropogenní oteplování může zvýšit možnost katastrofálního úniku metanu z hydrátů do atmosféry. Podle nedávné zprávy amerického Vědeckého programu pro změnu klimatu (CCSP 2008b) je velmi nepravděpodobné, že by k takovému úniku došlo v tomto století, ačkoli podle téže zprávy je velmi pravděpodobné, že s tím, jak se klima otepluje, porostou zdroje emisí metanu z hydrátů i z mokřadů. To potvrzuje nová analýza, která zjistila, že nárůst metanu v atmosféře pozorovaný před 11 600 lety měl původ v mokřadech, a nikoli v hydrátech (Petrenko et al. 2009); totéž zjistily studie používající modely Země střední složitosti (Fyke a Weaver 2006; Archer et al. 2009).

Bylo provedeno jen několik studií s klimatickými modely toho typu, jaké se vyskytují v AR4. Jedna systematická studie použila 3. verzi Community Climate System Model (CCSM3) s výslovným zahrnutím procesů v zamrzlé půdě. Simulovaný úbytek permafrostu dosáhl asi 40 % v roce 2030 nezávisle na emisním scénáři (pokles rozlohy z 10 milionů km<sup>2</sup> na 6 milionů km<sup>2</sup>). Do roku 2050 se jeho plocha zmenšila na 4 miliony km<sup>2</sup> (se scénářem B1) a 3,5 milionu km<sup>2</sup> (se scénářem A2). Do roku 2100 poklesla plocha permafrostu podle A2 asi na 1 milion km<sup>2</sup>. V každém případě simulace nezahrnovaly dodatečné zpětné vazby spuštěné zhroutením permafrostu, mezi něž patří uvolňování metanu, rozšiřování křovin a lesů na sever a aktivace ložiska uhlíku v půdě. Každá z nich by oteplování dále zesílila.

# Ledovce a ledové čepice

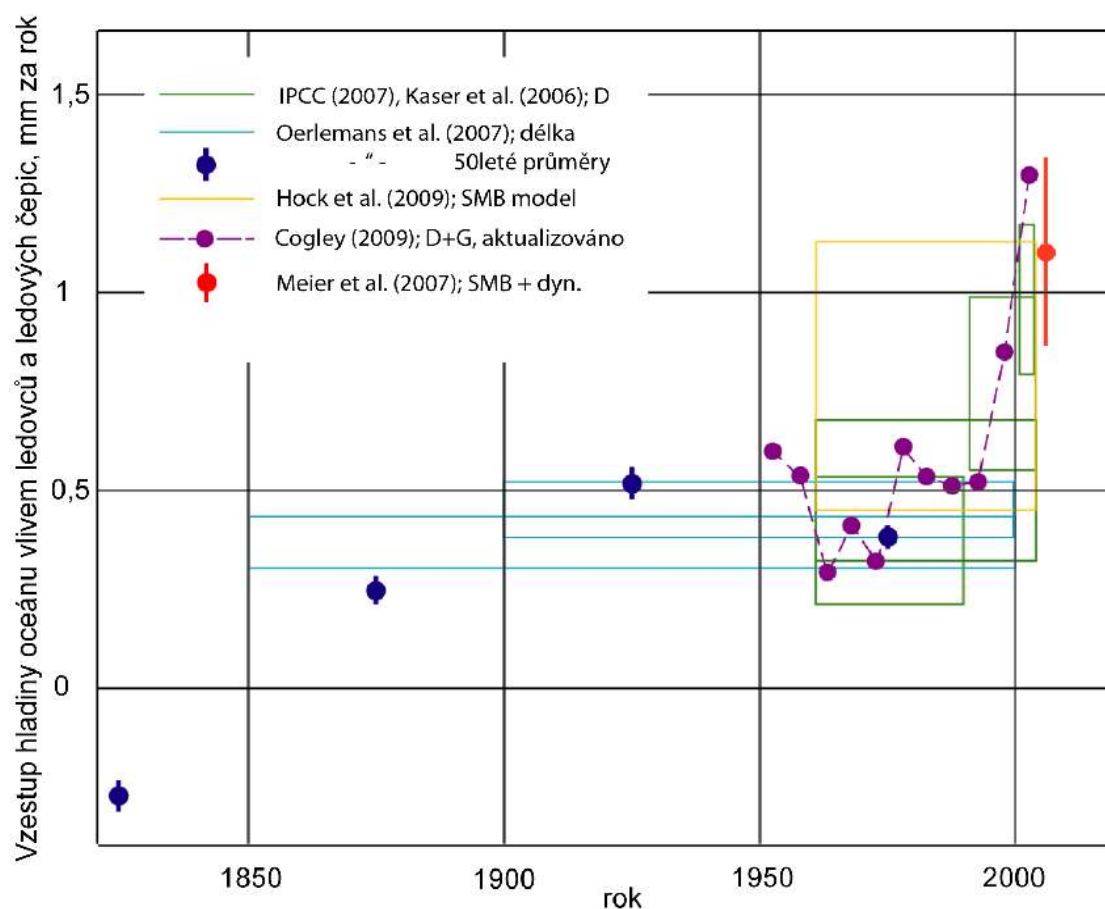
- Důkazy zrychleného tání ledovců a ledových čepic od poloviny 90. let 20. století jsou rozsáhlé.
- Příspěvek ledovců a ledových čepic k vzestupu globální hladiny moře se zvýšil z 0,8 milimetru ročně v 90. letech na 1,2 milimetru za rok v současnosti.
- Očekává se, že samotné přizpůsobení se ledovců a ledových čepic současnému podnebí zvedne hladinu moře asi o 18 centimetrů. Za podmínek oteplování to může do roku 2100 činit až zhruba 55 centimetrů.

Ledovce a horské ledové čepice mohou ke globální hladině moře potenciálně přispět celkem 0,7 metru. Ledovce a ledové čepice také zajišťují zdroj pitné vody v mnoha horských oblastech celého světa. IPCC AR4 odhadla příspěvek celosvětově se zmenšujících ledovců a ledových čepic k vzestupu hladiny moře na začátku 21. století asi na 0,8 milimetru za rok (Lemke et al. 2007; Kaser et al. 2006). Od té doby byly provedeny nové odhady příspěvků ledovců a ledových čepic s využitím nových dat a nových hodnotících metod.

Tyto nové odhady jsou zobrazeny na Obrázku 7. Ukazují, že příspěvky ledovců a ledových čepic k vzestupu hladiny moře jsou obecně o trochu vyšší než ty, které udávala

IPCC AR4. Také mají rozsah od roku 1850 až do roku 2006. Tyto nové odhady ukazují, že úbytek hmoty ledovců a ledových čepic se značně zvýšil od začátku 90. let 20. století a nyní přispívá k nárůstu výšky hladiny moře asi 1,2 milimetru ročně.

Ledovce a ledové čepice nejsou v rovnováze se současným podnebím. Poslední odhady říkají, že jen přizpůsobení se mu způsobí během tohoto století ztrátu hmoty odpovídající vzestupu hladiny moře asi o 18 centimetrů (Bahr et al. 2009). S probíhajícími změnami konzistentními se současnými trendy oteplování se do roku 2100 očekává úbytek hmoty až do výše 55 centimetrů nárůstu výšky hladiny moře (Pfeffer et al. 2008).



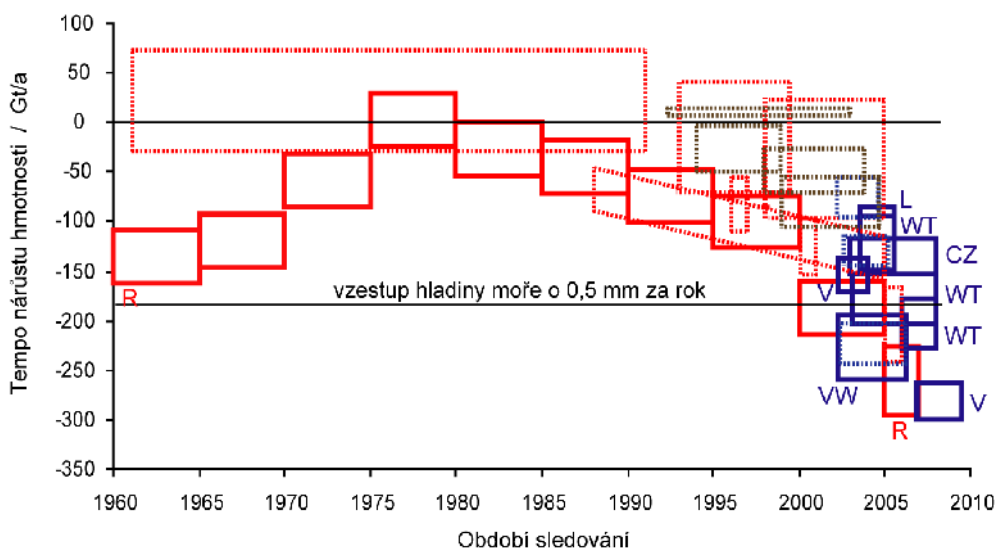
**Obrázek 7.** Odhady toho, kolik přispívají ledovce a ledové čepice ke globální změně výšky mořské hladiny, v milimetrech za rok. (Metody: D znamená přímá měření sněhové pokrývky ledu, G geodetické dálkové zjišťování objemu ledu, SMB je modelování bilance hmotnosti povrchové vrstvy, dyn. zahrnuje i změny v dynamice odtoku ledu.)

# Ledové štíty Grónska a Antarktidy

- Plocha povrchu grónského ledového štítu, na které dochází k letnímu tání, se od roku 1979 zvětšila o 30 % v souladu s rostoucími teplotami vzduchu. Během rekordní sezóny roku 2007 došlo k tání na 50 % ledového štítu.
- Čistý úbytek ledu z grónského ledového štítu se od poloviny 90. let 20. století zvýšil a nyní jeho příspěvek k vzestupu hladiny moře činí 0,7 milimetru za rok, jak vlivem zvýšeného tání, tak vlivem zrychleného toku ledu.
- Také Antarktida rostoucí rychlostí ztrácí ledovou hmotu, převážně z ledového štítu Západní Antarktidy vlivem zrychleného toku ledu. Příspěvek Antarktidy k vzestupu hladiny moře je v současnosti téměř stejný jako příspěvek Grónska.

Antarktida a Grónsko zadržují největší zásoby ledu na pevnině. Kdyby zcela roztály, zvedl by ledový štít Antarktidy globální hladinu moře o 52,8 metru a Grónsko by přidalo dalších 6,6 metru. I ztráta jen těch nejzranitelnějších částí Západní Antarktidy by zvýšila hladinu moře o 3,3 metru (Bamber et al. 2009). IPCC AR4 došla k závěru, že čistý úbytek ledu z ledových štítů Grónska a Antarktidy se v období let 1993 až 2003 dohromady podílel na vzestupu hladiny moře průměrným tempem odhadovaným na 0,4 milimetru za rok. Od IPCC AR4 se

pozorováním a modelováním bilance hmoty ledových štítů zabývalo mnoho nových studií, které značně zlepšily naše porozumění zranitelnosti ledových štítů (Allison et al. 2009). Tato hodnocení posilují závěr, že ledové štíty přispívají k současnému stoupání hladiny moře a ukazují, že se v současné době rychlost jejich ubývání v Grónsku i na Antarktidě zvyšuje. Nedávná pozorování kromě toho ukazují, že ke změnám rychlosti vytékání ledu do moře může docházet daleko rychleji, než jsme se dříve domnívali (např. Rignot 2006).



**Obrázek 8.** Odhady celkové bilance hmoty grónského ledového štítu od roku 1960. Záporná bilance hmoty vyjadřuje ztrátu ledu a vzestup hladiny moře. Tečkované obdélníky představují odhady použité v IPCC AR4 (IPCC 2007). Obdélníky s plným obrysem jsou hodnocení po AR4 (R = Rignot et al. 2008a; VW = Velicogna & Wahr 2006; L = Luthcke et al. 2006; WT = Wouters et al. 2008; CZ = Cazenave et al. 2009; V = Velicogna 2009).

## Grónsko

Obrázek 8 ukazuje odhady bilance hmoty grónského ledového štítu od roku 1960. V tomto zobrazení vyjadřuje horizontální rozměr obdélníků časové období, pro které byl odhad prováděn, a vertikální rozměr ukazuje horní a dolní hranici daného odhadu. Barvy znázorňují různé metody, které byly použity: hnědě jsou odhady odvozené z měření změny výšky povrchu ledového štítu výškoměry na družicích nebo letadlech; modře jsou odhady úbytku hmoty ze satelitních gravitačních měření; červeně jsou odhady odvozené z bilance mezi přírůstkem a odtokem

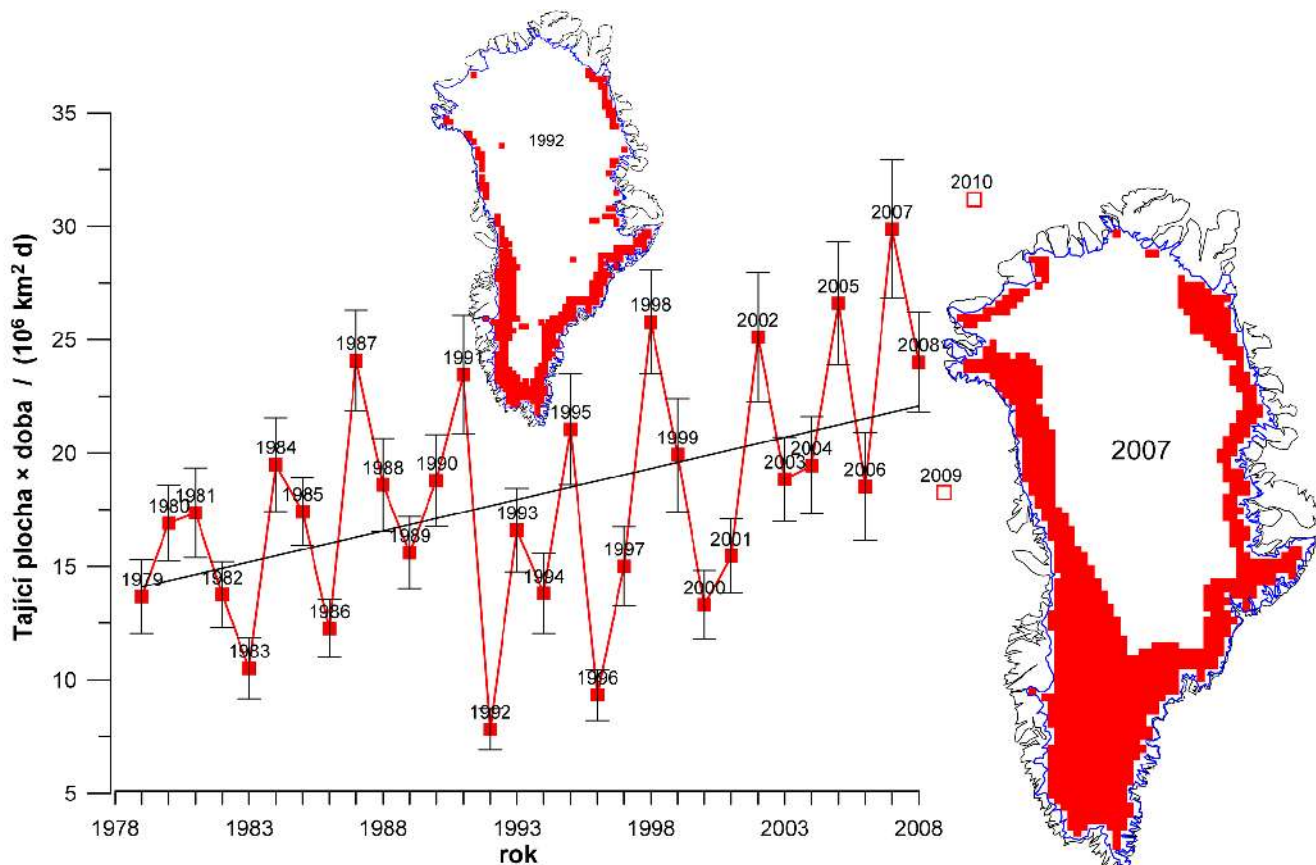
hmoty. Údaje na Obrázku 8 ukazují, že čistý úbytek hmoty ledu z Grónska roste nejméně od počátku 90. let 20. století a že v 21. století rychlost ubývání roste výrazně. Mnoho limitů vyplývajících z pozorování a použití několika různých technik poskytuje důvěru v to, že se rychlost ztráty hmoty z ledového štítu Grónska zvyšuje. Velicogna (2009) použil gravitační data ze satelitu GRACE, aby ukázal, že se rychlost ztráty hmoty z Grónska za období od dubna 2002 do února 2009 zdvojnásobila.

Povrchové tání poblíž pobřeží a odtok se od roku 1960 v reakci na stoupající teploty značně zvýšily, avšak cel-

kové množství sněhových srážek se rovněž zvýšilo (Hanna et al. 2008). Průměrná povrchová teplota v Grónsku vzrostla v období let 2000 až 2006 o 1,5 °C a k úbytku hmoty odhadnutému z gravitačních dat GRACE došlo během 15 dní od začátku povrchového tání, což naznačuje, že voda z ledového štítu rychle odtéká (Hall et al. 2008). Pasivní mikrovlnné družicové měření plochy grónského ledového štítu, na níž dochází k povrchovému tání, ukazuje, že se tato plocha od roku 1979 zvětšuje (Steffen et al. 2008; Obrázek 9). Existuje dobrá korelace celkového rozsahu plochy tání a počtu dnů tání s celkovým objemem odtoku, který rovněž vzrostl.

Povaha změny ledového štítu Grónska spočívá ve ztenčování v blízkosti pobřeží, především na jihu podél rych-

le se pohybujících výtokových ledovců. Zrychlení pohybu a telení z některých větších výtokových ledovců (nazývané také dynamické ztenčování) je zodpovědné za většinu ztrát (Rignot & Kanagaratnam 2006; Howat et al. 2007). V jihovýchodním Grónsku ke ztrátě ledu přispívá také mnoho menších povodí, zejména tam, kde výtokové ledovce končí v moři (Howat et al. 2008). Pritchard et al. (2009) použili laserové družicové měření výšky s vysokou přesností, aby ukázali, že dynamické ztenčování rychle tekoucích pobřežních ledovců je nyní v Grónsku jevem rozšířeným ve všech zeměpisných šířkách. Grónské ledovce tekoucí rychlostí větší než 100 metrů za rok se mezi roky 2003 a 2007 ztenčily průměrně o 0,84 metru ročně.



**Obrázek 9.** Podle pasivních mikrovlnných dat ze satelitů se celková plocha tání grónského ledového štítu v období let 1979 až 2008 zvětšila o 30 %, nejextrémnější tání bylo v roce 2007. Obecně je 33–55 % celkové ztráty hmoty z ledového štítu Grónska způsobeno táním na povrchu a odtokem. V roce 2007 docházelo k tání na zhruba 50 % celkové plochy ledového štítu. Malé tání v roce 1992 bylo způsobeno sopečnými aerosoly z Mt. Pinatubo, které byly příčinou krátkodobého globálního ochlazení (aktualizováno ze Steffen et al. 2008; pro 2009 a 2010 jsou uvedeny hrubé odhady dle Mote 2010, soukr. sdělení).

## Antarktida

Na Obrázku 10 jsou zobrazeny nové odhady bilance hmoty ledového štítu Antarktidy. Odhady pro celou Antarktidu jsou k dispozici pouze od počátku 90. let 20. století. Několik nových studií využívajících gravitační data ze satelitu GRACE (modré obdélníky na Obrázku 10) shodně ukazuje od roku 2003 celkovou ztrátu z Antarktidy s rozlišením Východní Antarktidy, kde je téměř rovnováha, a Západní Antarktidy a Antarktického poloostrova s větším úbytkem hmoty (např. Chen et al.

2006; Cazenave et al. 2009). Velicogno (2009) hodnocení GRACE ukazuje, že se, podobně jako v Grónsku, zvětšuje rychlost ubývání hmoty ledového štítu Antarktidy, když se zvýšila ze 104 Gt ročně v letech 2002–2006 na 246 Gt ročně v letech 2006–2009 (to odpovídá vzestupu hladiny moře o téměř 0,7 milimetru za rok). Gravitační a altimetrická měření vyžadují korekci pro vzestup zemské kůry pod ledovým štítem (izostatické přizpůsobování se na změnu hmotnosti vrstvy ledu): ta pro Antarktidu není dostatečně známa.

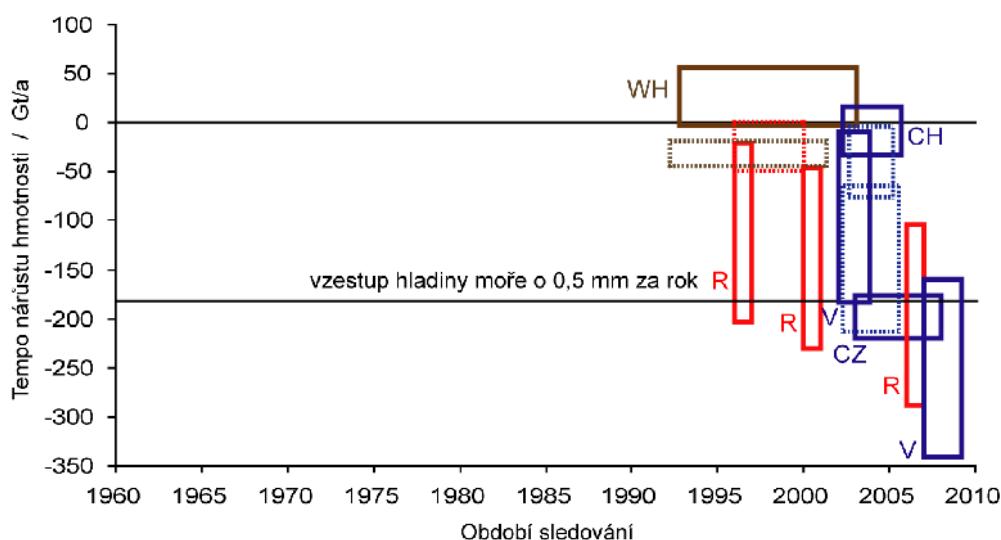


K největším ztrátám došlo v pánvích Západní Antarktidy ústících do Bellingshausenova a Amundsenova moře. Družicové odhady rychlosti ledovců ze snímků z roku 1974 naznačují, že výtokové ledovce v oblasti [zátoky Pine Island](#) se od té doby zrychlily, oblast ledového štítu téměř v rovnováze se tak stala oblastí se značnou ztrátou (Rignot 2008). Rignot et al. (2008b) ukazují, že se odtok ledu v tomto regionu mezi lety 1996 a 2006 dále zrychlil, čímž se v tomto období čistá ztráta ledu zvýšila o 59 %, a Pritchard et al. (2009) z laserové altimetrie ukazují, že v některých zátokách Amundsenova moře dynamické ztenčování překročilo 9 metrů za rok. Současné zrychlování ledových proudů v Západní Antarktidě vysvětluje většinu antarktické ztráty hmoty, ale úzké rychle se pohybující ledové proudy ve Východní Antarktidě k úbytku rovněž přispívají (Pritchard et al. 2009).

V oblasti Antarktického poloostrova se oteplilo mnohem více než na kontinentu jako celku. To v této oblasti vede k všeobecnému ústupu (Cook et al. 2005) a zrychlování (Pritchard & Vaughan 2007) ledovců končících v moři.

## Nebezpečí kolapsu ledových štítů

Největší neznámou v projekcích vzestupu hladiny moře v následujícím století je možnost, že dojde k rychlému dynamickému kolapsu ledových štítů. Nejvýznamnějším faktorem pro zrychlení odtoku ledu v Grónsku i v Antarktidě během posledního desetiletí bylo odpoutání se čel ledovců od jejich skalního podkladu způsobené většinou podmořským táním ledu. Změny v promazávání základny ledu tavnou vodou, včetně té z povrchového tání pronikající tzv. mlýny (svíslými kanály) ke spodku ledového štítu, mohou také ovlivnit jeho dynamiku způsobem, kterému plně nerozumíme. Hlavní nejistoty ohledně dynamiky ledových štítů jsou do značné míry jednostranné: mohou vést k vyšší rychlosti vzestupu hladiny moře, ale pravděpodobně tuto rychlost významně nezpomalí. Ačkoli by celkový nárůst výšky hladiny moře do roku 2100 neměl být celé 2 metry (Pfeffer et al. 2008), pravděpodobná horní hranice příspěvku ledových štítů zůstává nejistá.



**Obrázek 10.** Odhady celkové bilance hmoty ledového štítu Antarktidy od roku 1992. Tečkované obdélníky představují odhady použité v IPCC AR4 (IPCC 2007). Obdélníky s plným obrysem jsou novější odhady (CH = Chen et al. 2006; WH = Wingham et al. 2006; R = Rignot et al. 2008b; CZ = Cazenave et al. 2009; V = Velicogna 2009).

# Ledové šelfy

- **Ledové šelfy propojují pevninské ledové štíty s oceánem. Dochází k rozsáhlé destabilizaci ledových šelfů podél Antarktického poloostrova, za uplynulých 20 let se jich sedm zhroutilo.**
- **Známky oslabování ledových šelfů byly zaznamenány i jinde než na Antarktickém poloostrově, např. v Bellingshausenově a Amundsenově moři, což nepřímou ukazuje na to, že oteplování atmosféry a oceánu má rozsáhlejší dopad, než se myslelo dříve.**
- **Oteplování oceánu má skrze tání ledových šelfů silný vliv na stabilitu ledových štítů a bilanci jejich hmoty.**

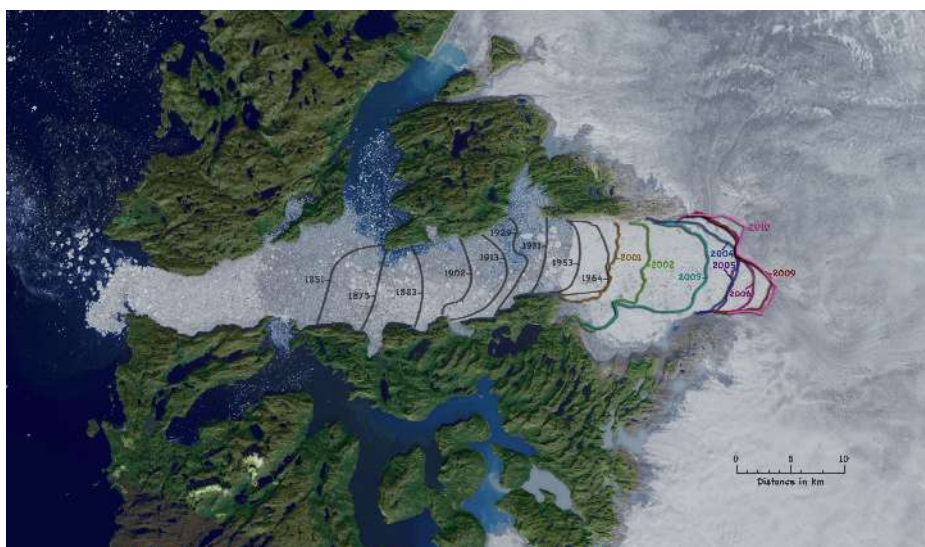
Ledové šelfy jsou plovoucí desky ledu značné tloušťky, které jsou spojeny s pobřežím. Tvoří je většinou led, který vytekl z ledového štítu na pevnině nebo se usadil v podobě místních sněhových srážek. Lze je nalézt okolo 45 % pobřeží Antarktidy, v několika málo zálivech u severního pobřeží Ellesmerova ostrova nedaleko Grónska a v několika fjordech podél severního pobřeží Grónska (kde se jim říká ledové jazyky). V minulých několika letech se zbývajících šest ledových šelfů (Serson, Petersen, Milne, Ayles, Ward Hunt a Markham) u Ellesmerova ostrova buď zcela zhroutilo (Ayles 13. srpna 2005 a Markham v prvním týdnu srpna 2008), nebo docházelo k jejich značnému rozpadání.

Na pobřeží Grónska dává pozoruhodný příklad ústupu plovoucího ledového jazyka ledovec Jakobshavn Isbrae (Obrázek 11). Holland et al. (2008) předpokládají, že za zrychlení Jakobshavn Isbrae pozorované v současné době (Rignot a Kanagaratnam 2006) může ztenčování vlivem přítoku teplých vod do této oblasti.

Dochází k všeobecné destabilizaci plovoucích ledových šelfů kolem Antarktického poloostrova, sedm se jich zhroutilo za posledních 20 let. Oteplování podél poloostrova je dramatické a na jeho západní straně je podstatně větší než globální průměr. Naposledy v březnu 2009 se z Wilkinsova ledového šelfu na západní straně Antarktického poloostrova odlámalo více než 400 čtverečních kilometrů ledu. Domníváme se, že důležitou roli v destabilizaci plovoucích ledových šelfů Antarktidy

hraje více mechanismů. Patří mezi ně: oteplování na povrchu, které vede k tvorbě tavných tůní a následnému rozlámání stávajících trhlin (van den Broeke 2005); podpovrchové tání ledových šelfů od teplejších vod oceánu (Rignot et al. 2008b); a vnitřní napětí v ledových šelfech (Bruan a Humbert 2009). I když samotný kolaps plovoucích ledových šelfů nezvyšuje hladinu moře, je následován velkým zrychlením odtoku ledovce – který hladinu moře zvyšuje – neboť pomine opěrný efekt ledového šelfu (např. Rignot et al. 2004; Scambos et al. 2004).

Existují důkazy tání ledových šelfů v Amundsenově moři, což má dopad na rychlost toku ledovců tekoucích touto částí Západní Antarktidy. Nedávná modelová studie naznačuje, že ledový štít Západní Antarktidy by se začal hroutit, kdyby se teplota oceánu v okolí kteréhokoli jejího ledového šelfu zvýšila asi o 5 °C (Pollard a DeConto 2009). Jsou důkazy také pro to, že tyto změny nejsou omezeny na Západní Antarktidu, ale mohou mít vliv rovněž na pobřeží Východní Antarktidy, například ve Wilkesově zemi (Pritchard et al. 2009; Shepherd a Wingham 2007). Všeobecné ztenčování a zrychlování ledovců podél pobřeží Antarktidy může naznačovat významný vliv změn v oceánu na dynamiku ledovců, což je faktor, kterému se v minulých zprávách IPCC věnovalo málo pozornosti v důsledku nedostatku pozorovacích dat o vzájemném působení ledu a oceánu a o tom, jaký může mít změna klimatu vliv na pobřežní vody oceánu.



**Obrázek 11.** Plovoucí ledový jazyk představující výběžek Jakobshavn Isbrae směrem do moře se již rozpadl. Jsou vyznačeny změny polohy čáry tání od roku 1851 do roku 2010, podkladový snímek v nepravých barvách je z 29. června 2009. Zdroj: NASA / Studio vědeckých vizualizací Goddardova střediska kosmických letů, <http://svs.gsfc.nasa.gov/goto?3806>.

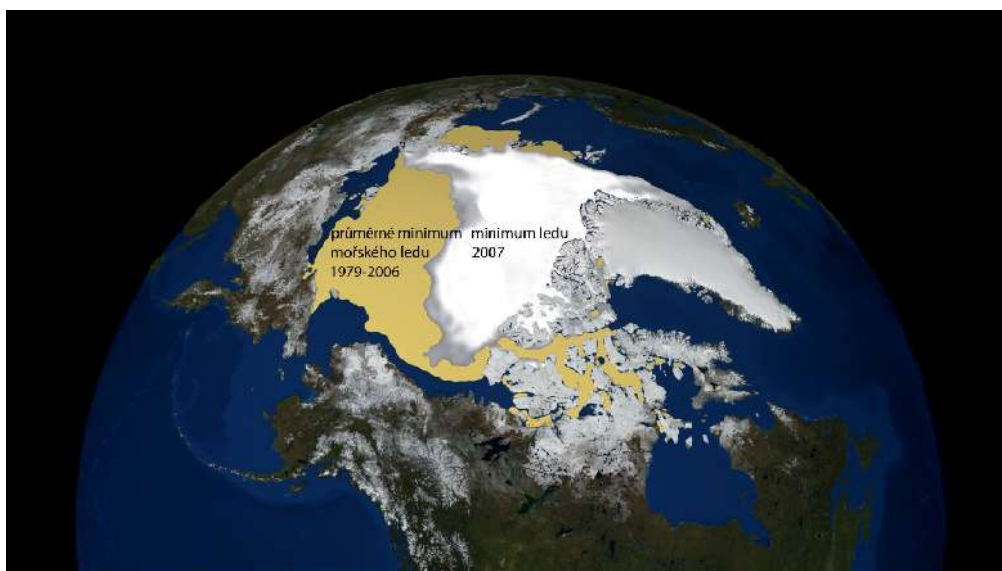
# Mořský led

- Pozorované letní tání mořského ledu v Arktidě dalece přesáhlo nejhorší projekce klimatických modelů IPCC AR4.
- Oteplování, k němuž dojde v důsledku stávajících úrovní skleníkových plynů v atmosféře, znamená, že je velmi pravděpodobné, že v nadcházejících desetiletích bude Severní ledový oceán v létě bez ledu, ačkoli přesné načasování, kdy k tomu dojde, zůstává nejisté.
- Družicová pozorování ukazují mírný nárůst rozlohy mořského ledu kolem Antarktidy a změny v sezonalitě, i když se značnou regionální proměnlivostí. Nejpravděpodobněji za to mohou změny proudění nad Jižním oceánem spojené s úbytkem stratosférického ozónu.

## Mořský led v Arktidě

Patrně nejvíce ohromující změnou pozorovanou od IPCC AR4 je razantní překonání předchozího rekordu, pokud jde o letní minimum rozlohy mořského ledu v Arktidě – věc, kterou nepředpovídaly klimatické modely. Rozloha mořského ledu v Arktidě zprůměrovaná za období pěti dnů do 16. září 2007 klesla na pouhých 4,1 milionu kilometrů čtverečních (viz Obrázek 12), čímž se dostala pod předchozí minimum z roku 2005 o 1,2 milionu kilometrů čtverečních (což je zhruba velikost Francie, Španělska, Portugalska, Belgie a Nizozemí dohromady). [Medián](#) zářijového minima rozlohy mořského ledu za dobu od zahájení měření se současnou generací vícefrekvenčních pasivních mikrovlnných senzorů v roce 1979 do roku 2000 činil 6,7 milionu kilometrů čtverečních. Ve srovnání s tímto mediánem roztálo při rekordu v roce 2007 o 2,6 milionu kilometrů čtverečních více ledu (asi 40 % mediánu).

Zářijová rozloha mořského ledu v Arktidě klesala během posledních několika desítek let rychlostí  $11,1 \% \pm 3,3 \%$  za desetiletí (NSIDC 2009). Tento dramatický ústup je mnohem rychlejší, než jaký simuloval kterýkoli z klimatických modelů posuzovaných v IPCC AR4 (Obrázek 13). Je to pravděpodobně kombinací několika nedostatků těchto modelů včetně: 1) neúplného včlenění fyziky albeda ledu, sem patří zacházení s tavnými tůňmi (např. Pedersen et al. 2009) a nánosy [černého uhlíku](#) obsaženého v sazích (např. Flanner et al. 2007; Ramanathan a Carmichael 2008); 2) neúplného začlenění fyziky vertikálního a horizontálního směšování v oceánu (např. Arzel et al. 2006). Od roku 1979 se zmenšuje rovněž rozsah arktického mořského ledu v zimě, avšak pomalejším tempem než v létě. Rozloha v únoru se zmenšuje rychlostí  $2,9 \% \pm 0,8 \%$  za desetiletí (NSIDC 2009).



**Obrázek 12.** Rozloha mořského ledu v Arktidě během pěti dnů končících 16. září 2007 ve srovnání s průměrným minimálním rozsahem mořského ledu v období 1979–2006. Zdrojem je NASA / Studio vědeckých vizualizací Goddardova střediska kosmických letů.

Tloušťka mořského ledu v Arktidě v posledních několika desítkách let také vytrvale klesá. Například Lindsay et al. (2009) odhadují, že od roku 1987 se tloušťka mořského ledu v září snižuje rychlostí 57 centimetrů za deset let. Podobné ztráty tloušťky mořského ledu byly zjištěny

v zimě. Například pro oblast, kterou pokrývá sonarové měření z ponorek, ukázali Kwok a Rothrock (2009), že celková střední tloušťka 3,64 metru v zimě roku 1980 poklesla do roku 2008 na pouhých 1,89 metru – čistý pokles o 1,75 metru, neboli 48 %. Na konci února 2009



mělo méně než 10 % arktického mořského ledu stárí přes dva roky, pokles z historických hodnot kolem 30 %.

### Kdy bude oceán v Arktidě bez ledu?

Kvůli existenci přirozené proměnlivosti klimatického systému není možné předpovědět přesný rok, kdy bude oceán v Arktidě sezónně bez ledu. Nicméně oteplování, ke kterému dojde v důsledku stávajících úrovní skleníkových plynů v atmosféře, pravděpodobně znamená, že Arktida v létě bez ledu je nevyhnutelná. Objevují se také důkazy naznačující, že přechod k arktickému létu bez ledu lze očekávat spíše náhle než pozvolně (Holland et al. 2006), z důvodu zesilujících zpětných vazeb, které jsou vlastní klimatickému systému Arktidy. V jedné ze simulací s 3. verzí modelu klimatického systému NCAR (CCSM3) diskutované v Holland et al. (2006) bylo léto v Arktidě v roce 2040 skutečně téměř bez ledu. Jak upozornili Lawrence et al. (2008), náhlý pokles letního rozsahu mořského ledu v Arktidě vyvolá také rychlé oteplení na pevnině a následnou degradaci permafrostu.

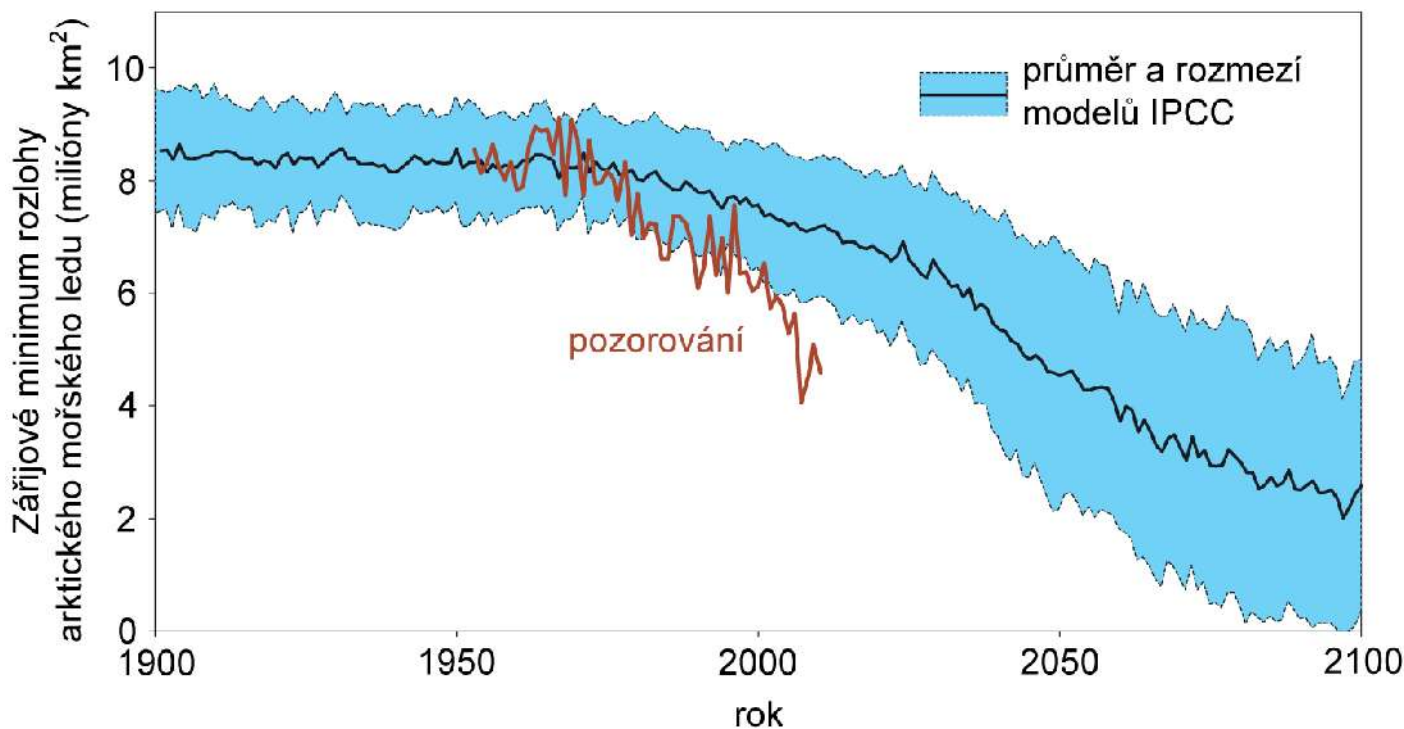
### Mořský led u Antarktidy

Na rozdíl od Arktidy jsou změny rozlohy mořského ledu u Antarktidy méně patrné, střední roční rozloha se v období let 1979–2006 zvětšovala asi o 1 % za desetiletí (Cavaliere a Parkinson 2008; Comiso a Nishio 2008). V rozložení mořského ledu u Antarktidy však dochází k velkým regionálním změnám: například oblasti Weddellova a Rossova moře vykazují nárůst rozlohy ledu související se změnami v proudění atmosféry velkého

měřítka, zatímco oblast západně od Antarktického poloostrova a pobřeží Západní Antarktidy (Amundsenovo a Bellingshausenovo moře) vykazují výrazný úbytek v souladu se silnějšími severními větry a oteplováním povrchu, které se tam pozoruje (Lefebvre et al. 2004; Turner et al. 2009; Steig et al. 2009). Tyto regionální změny souvisejí s velkou změnou sezonality ledu; to jest jeho trvání a načasování příchodu a ústupu během roku (Stammerjohn et al. 2008).

Jelikož je Antarktida plocha pevniny obklopená rozsáhlým Jižním oceánem, zatímco Arktida je malý oceán obklopený ohromnou rozlohou pevniny, a protože oceány reagují na oteplování pomaleji než pevnina kvůli své tepelné stabilitě, očekávali bychom, a klimatické modely to skutečně ukazují, okolo Antarktidy pozdější reakci na oteplování. Turner et al. (2009) kromě toho poukázali na to, že úbytek ozónu ve stratosféře vyvolaný antropogenním uvolňováním freonů (CFCs) vedl k posílení přízemního větru kolem Antarktidy během prosince až února (léto). Tvrdí, že tyto silnější větry jsou ve skutečnosti hlavním důvodem slabě pozitivního trendu rozlohy mořského ledu u Antarktidy pozorovaného za poslední tři desetiletí. Nicméně protože CFCs jsou regulovány Montrealským protokolem a jejich koncentrace v atmosféře klesají, očekává se, že se ozónová díra nad Antarktidou zacelí, a tedy lze předvídat, že tání mořského ledu na jižní polokouli se bude v následujících desetiletích zrychlovat.

O tloušťce navršeného (víceletého) mořského ledu v oblasti Antarktidy je k dispozici málo dat a o změnách tloušťky tamního mořského ledu nejsou informace žádné.



**Obrázek 13.** Pozorovaný (červená čára) a modelovaný rozsah mořského ledu v září v Arktidě v milionech čtverečních kilometrů. Plná černá čára udává střed souboru 13 modelů IPCC AR4, zatímco přerušované černé čáry představují jejich rozpětí. Podle Stroeve et al. (2007) aktualizováno zahrnutím dat do roku 2010.

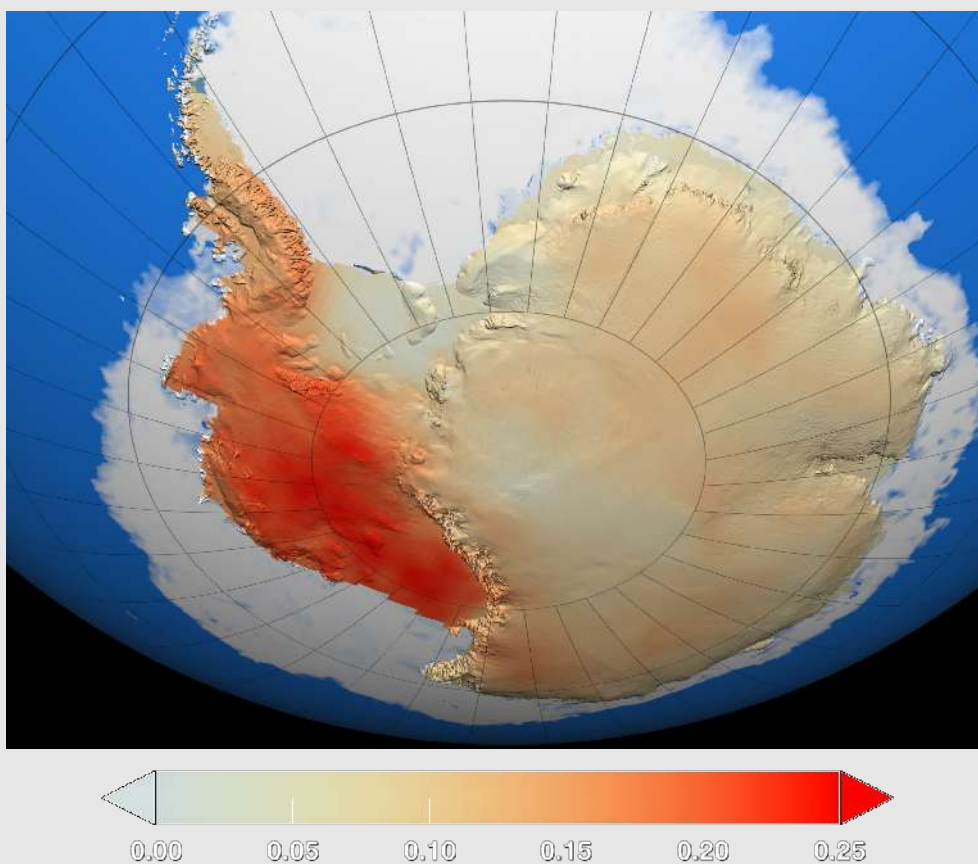


## Neochlazuje se Antarktida a nepřibývá v ní mořského ledu?

Antarktida se neochlazuje: celkově se za posledních přinejmenším 50 let oteplila. Třebaže meteorologická stanice na jižním pólu vykazuje za tuto dobu ochlazování, tato samotná stanice není reprezentativní. Například Vostok, jediná další dlouhodobě pracující stanice ve vnitrozemí kontinentu, udává trend oteplování. Několik nezávislých analýz (Chapman a Walsh 2008; Monaghan et al. 2008; Goosse et al. 2009; Steig et al. 2009) ukazuje, že se Antarktida od roku 1957, kdy byla v Mezinárodním geofyzikálním roce zahájena rozsáhlá měření, oteplila v průměru o zhruba 0,5 °C a že k obzvláště rychlému oteplování dochází po celé oblasti Antarktického poloostrova a na Západoantarktickém ledovém příkrovu (Obrázek 14 ukazuje střední trend v letech 1957–2006). Kromě toho existují přímé důkazy z měření ve vrtech o tom, že oteplování v Západní Antarktidě začalo nejpozději ve 30. letech 20. století (Barrett et al. 2009).

Od doby, kdy se v 70. letech 20. století nad Antarktidou vytvořila ozónová díra, došlo k zesílení cirkumpolárních větrů okolo Antarktidy, jež mají tendenci snižovat množství teplejšího vzduchu, který pronikne do nitra kontinentu. Silnější větry jsou důsledkem ochlazení horních vrstev atmosféry, což je způsobeno úbytkem ozónu vyvolaným freony. Následkem toho se většina Východní Antarktidy v období léta a podzimu od konce 70. let ochlazovala. Je ironií, že emise freonů pomáhají částečně kompenzovat oteplování antarktického vnitrozemí. Obdobná je role síranových aerosolů při snižování oslunění zemského povrchu. S tím, jak se během století bude ozónová díra zacelovat, její ochlazující vliv pravděpodobně poklesne.

Faktory, které určují rozlohu mořského ledu kolem Antarktidy, jsou velmi odlišné od těch v Arktidě. Antarktida je kontinent ležící okolo pólu a obklopený vodou, což je pravý opak geografie Arktidy. Rozloha mořského ledu okolo Antarktidy silně závisí na cirkumpolárních větrech, které rozšiřují led dále od pevniny, a na poloze polární fronty, na níž se led setkává s teplejšími vodami oceánu. Plocha mořského ledu v Antarktidě vykazuje slabý rostoucí trend, což je v souladu s již zmíněným zesílením cirkumpolárních větrů. V Západní Antarktidě, kde je růst teploty největší, ubývá mořského ledu statisticky významným tempem nejméně od 70. let 20. století.



**Obrázek 14.** Trend průměrné roční teploty vzduchu ve °C/desetiletí v období let 1957–2006 ze Steig et al. 2009.

# Oceány

- **Odhady množství tepla pohlcovaného oceánem se sblížily a zjistilo se, že jsou o 50 % vyšší, než udávaly předchozí výpočty.**
- **Globální teplota povrchu oceánu dosáhla nejvyšších zaznamenaných hodnot v červnu, červenci i srpnu 2009.**
- **Okyselování oceánů a úbytek kyslíku v nich byly označeny za potenciálně zničující pro velké části mořského ekosystému.**

Od IPCC AR4 výrazně postoupilo odhalování toho, jaký dopad má změna klimatu na oceány. Byly naměřeny významné změny teploty, salinity i biogeochemických vlastností. Tyto změny jsou v souladu s pozorovanými padesátiletými trendy teploty, srážek i CO<sub>2</sub> v atmosféře. Od IPCC AR4 máme také významné nové analýzy trendů větší řady vlastností včetně okyselování a obsahu kyslíku. To zlepšilo naše porozumění měnícímu se stavu oceánů a také odhalilo nové problémy. Tam, kde jsou nové odhady změn v oceánech od IPCC AR4, jsou obvykle větší a také konzistentnější s projekcemi změny klimatu (např. pokud jde o globální tepelnou bilanci).

## Oteplování oceánu

Za posledních 50 let je dlouhodobý trend teploty povrchu oceánu setrvale rostoucí (Obrázek 15). Družicová měření povrchu oceánu ukazují, že navazující poloviny let 2009 a 2010 byly podobně teplým obdobím jako 1997/1998 navzdory tehdejšímu rekordně silnému El Niño. Rok 2008 byl chladnější kvůli intenzivnímu dočasnému jevu La Niña, zato např. v červnu, v červenci a v srpnu 2009 byla globální teplota povrchu oceánu nejvyšší zaznamenaná (viz NOAA, State of the Climate, 2009).

Zjistilo se, že nárůst entalpie („obsahu tepla“) svrchní vrstvy oceánu (0–700 m) mezi lety 1963 a 2003 byl o 50 % vyšší než podle předchozích odhadů (Domingues et al. 2008; Bindoff et al. 2007). Vyšší odhady změny entalpie jsou teď ve shodě s měřením vzestupu hladiny moře za posledních 50 let, což rozřešilo dlouho přetrvávající vědecký problém s pochopením příspěvku tepelné roztažnosti k výšce hladiny moře (Domingues et al. 2008). Měření ukazují rovněž oteplování hlubokých partií oceánu, které je v Atlantiku a v Jižním oceánu mnohem rozšířenějším jevem (Johnson et al. 2008a; Johnson et al. 2008b), než jsme si uvědomovali dříve.

## Salinita a hydrologický cyklus

Komplexnější analýzy salinity oceánu ukazují na pokles slanosti ve vyšších zeměpisných šířkách, zatímco v oblastech, kde převažuje odpařování nad srážkami, se salinita zvyšuje. Změny salinity jsou v souladu se zesilováním hydrologického cyklu. Rozložení změn slanosti je ve shodě rovněž s regionální cirkulací a s výměnou mezi oceány a jejich částmi. Máme nyní více důkazů toho, že dlouhodobé trendy rozložení srážek nad světovým oceánem tak, jak se odrážejí v salinitě, lze přisoudit lidskému vlivu (Stott et al. 2008).

## Změna klimatu a oceánské proudění

Překvapivě změny salinity antarktických spodních vod jsou dalším důkazem zvýšeného odtávání ledových štítů a ledových šelfů (Rintoul 2007). Arktida poskytuje silný důkaz vyššího množství srážek i odtoku z řek. Střední vrstvy oceánu v Arktidě se výrazně oteplily (Polyakov et al. 2004). Ve shodě se současnými výsledky modelů nebyly zatím pozorovány žádné známky trvalých změn proudění v severním Atlantském oceánu (např. Hansen a Østerhus 2007).

Regionální změna klimatu se často kategorizuje a popisuje pomocí [hlavních módů proměnlivosti](#), jako jsou Severoatlantická oscilace, El Niño nebo cirkumpolární mód jižní polokoule / Antarktická oscilace. Tyto módy samy mohou být ovlivněny skleníkovými plyny, což by v následujících desetiletích mohlo vést buď k větším výkyvům, nebo preferovanému stavu (např. trend k jinému typu jevu El Niño, Yeh et al. 2009; Latif a Keenlyside 2009). V současné době je vliv regionálních klimatických módů na oceánské proudění větší než základní trend, který by šlo připsat antropogenní změně klimatu.

Stabilita oceánské proudění v severním Atlantiku je životně důležitá pro podnebí Severní Ameriky a Evropy. Zpomalení těchto oceánských proudů by mohlo vést například k rychlejšímu vzestupu regionální hladiny moře podél severovýchodního pobřeží USA (Yin et al. 2009). IPCC AR4 došla k závěru, že je více než 90% pravděpodobnost, že do roku 2100 dojde k oslabení tohoto systému oceánských proudů, a méně než 10% riziko „velké náhlé proměny“. Jak upozorňuje Souhrnný a hodnotící projekt 3.4 Vědeckého programu pro změnu klimatu USA (Delworth et al. 2008), takovou změnu v tomto století nepředpovídá žádný komplexní klimatický model. Nicméně vzhledem k nejistotě ohledně naší schopnosti modelovat nelineární chování s výskytem prahu a k nedávným známkám toho, že modely jsou možná příliš stabilní (Hofmann a Rahmstorf 2009), nemůžeme zcela vyloučit možnost takovéto náhlé proměny.

## Okyselování oceánu, jímání uhlíku a úbytek kyslíku v oceánu

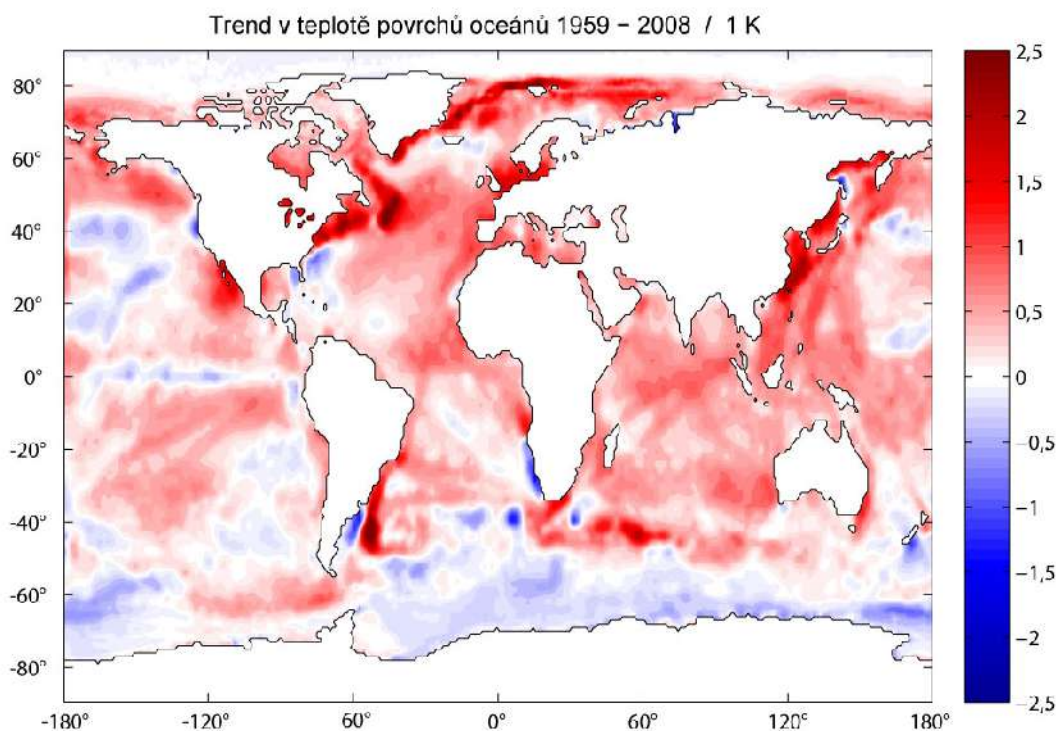
Obsah CO<sub>2</sub> v oceánech se od konce předprůmyslové doby (okolo roku 1750) do roku 1994 zvýšil o 118 Gt ± 19 Gt (1 Gt = 10<sup>9</sup> t) a nadále roste o zhruba 2 Gt každý rok (Sabine et al. 2004). Nárůst CO<sub>2</sub> v oceánech přímo způsobil pokles pH povrchu oceánu od roku 1750 v průměru o 0,1 jednotky, přesněji nárůst kyselosti o více než 30 % (Orr

et al. 2005; McNeil a Matear 2007; Riebesell et al. 2009). Ukazuje se, že kalcifikující organismy a útesy jsou ve vodě s vysokým obsahem  $\text{CO}_2$  a nízkým pH zvláště zranitelné (Fabry et al. 2008).

Nové údaje z různých lokalit dokazují těsnou souvislost mezi kalcifikací a  $\text{CO}_2$  v atmosféře, během posledních 50 000 let jsou v podmínkách s vyšším obsahem  $\text{CO}_2$  patrně menší ulity (Moy et al. 2009). Kromě toho se vzhledem k tamním podmínkám očekává, že až úroveň  $\text{CO}_2$  v atmosféře dosáhne 450 ppm (za podmínek „business-as-usual“ kolem roku 2030), začnou se určité ulity v polárních oblastech oceánu v Arktidě i Antarktidě rozpouštět (McNeil a Matear 2008; Orr et al. 2009).

Jsou také nové důkazy pokračujícího poklesu koncentrace rozpuštěného kyslíku ve světovém oceánu (Oschlies et

al. 2008) a poprvé jsme získali důležitý důkaz toho, že se rozsáhlé rovníkové zóny minima kyslíku v teplejším oceánu zvětšují (Stramma et al. 2008). Ubývající kyslík způsobuje dýchací potíže velkým predátorům, násobí stres (Rosa a Seibel 2008) a značně snižuje schopnost mořských organismů vyrovnat se s okyselováním (Brewer 2009). Zvětšování oblastí s nedostatkem kyslíku v mořích má významný vliv na mořský koloběh dusíku s dosud neznámými globálními důsledky (Lam et al. 2009). Nedávná modelová studie (Hofmann a Schellhuber 2009) upozorňuje na riziko všeobecného rozšiřování oblastí s nedostatkem kyslíku ve svrchních vrstvách oceánu, pokud  $\text{CO}_2$  v atmosféře nadále poroste.



**Obrázek 15.** Dlouhodobá změna teploty povrchu moře (SST) za padesátileté období let 1959–2008 vypočtená fitováním lineárního trendu do 50 let měsíčních dat o SST v každém bodu sítě. Pole SST pocházejí ze souboru dat Hadleyho centra popsaného v Rayner et al. (2006).



# Globální hladina moře

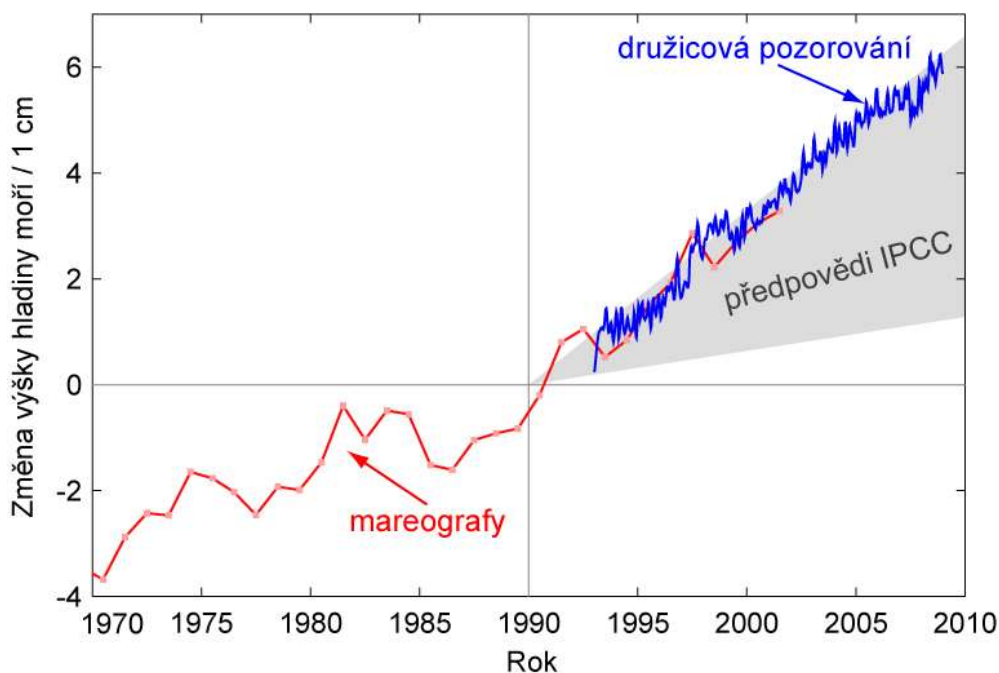
- Družicová pozorování ukazují, že hladina moře od počátku jejího měření v roce 1993 stoupá o 3,4 milimetru ročně. To je o 80 % rychleji, než činil nejlepší odhad Třetí hodnotící zprávy IPCC pro toto časové období.
- Vezmeme-li v úvahu ztrátu hmoty ledových štítů, bude vzestup hladiny moře do roku 2100 pravděpodobně nejméně dvakrát větší než ten, který představila IPCC AR4, s horní hranicí asi 2 m. Vychází to z nového porozumění ledovým štítům.

Hustota zalidnění v pobřežních oblastech a na ostrovech je zhruba třikrát vyšší než celosvětový průměr. V současné době žije 160 milionů lidí méně než 1 metr nad hladinou moře. To umožňuje, aby i malý vzestup hladiny moře měl značný společenský a ekonomický dopad skrze erozi pobřeží, zvýšenou náchylnost k vzestupu hladiny za bouře a výsledné záplavy, kontaminaci podzemních vod pronikající solí, ztrátu pobřežních mokřadů a další problémy.

Od roku 1870 stoupla globální hladina moře zhruba o 20 centimetrů (IPCC AR4). Od roku 1993 se hladina moře celosvětově přesně měří z družic. Dříve pocházely údaje z [mareografů](#) ve stanicích na pobřeží po celém světě.

Družicová i mareografická měření ukazují, že tempo růstu výšky hladiny moře se zvětšuje. Statistická analýza odhaluje, že tempo růstu je těsně korelováno s teplotou: čím více se oteplí, tím rychleji hladina moře stoupá (Rahmstorf 2007).

Stoupání hladiny moře je nevyhnutelným důsledkem globálního oteplování ze dvou hlavních důvodů: voda v oceánech se s oteplováním roztahuje a další voda teče do oceánů z ledu tajícího na pevninách. V období let 1961–2003 přispěla k pozorovanému vzestupu hladiny moře tepelná roztažnost asi 40%, zatímco podíl zmenšujících se horských ledovců a ledových štítů byl asi 60% (Domingues et al. 2008).



**Obrázek 16.** Změna výšky hladiny v období 1970–2010. Údaje z mareografů jsou vyznačeny červeně (Church a White 2006) a satelitní data moře (Cazenave et al. 2008). Pro srovnání jsou šedým stínováním zobrazeny projekce Třetí hodnotící zprávy IPCC.

Hladina moře stoupá rychleji, než se očekávalo (Rahmstorf et al. 2007), viz Obrázek 16. Průměrné tempo růstu bylo v letech 1993–2008 podle družicových měření 3,4 milimetru za rok (Cazenave et al. 2008), zatímco nejlepší odhad projekcí Třetí hodnotící zprávy (TAR) IPCC pro totéž období byl 1,9 milimetru za rok. Skutečný nárůst byl tedy o 80 % rychlejší, než předpovídaly modely. (Povšimněte si, že pozdější modely zprávy IPCC z roku 2007 stále předpovídají v podstatě stejný vzestup hladiny moře jako ty z TAR, liší se do 10 %.)

Velikost vzestupu hladiny moře v budoucnu je značně nejistá, jak již naznačuje neshoda mezi pozorováním a modely. Hlavní příčina nepředvídatelnosti je v reakci velkých ledových štítů Grónska a Antarktidy.

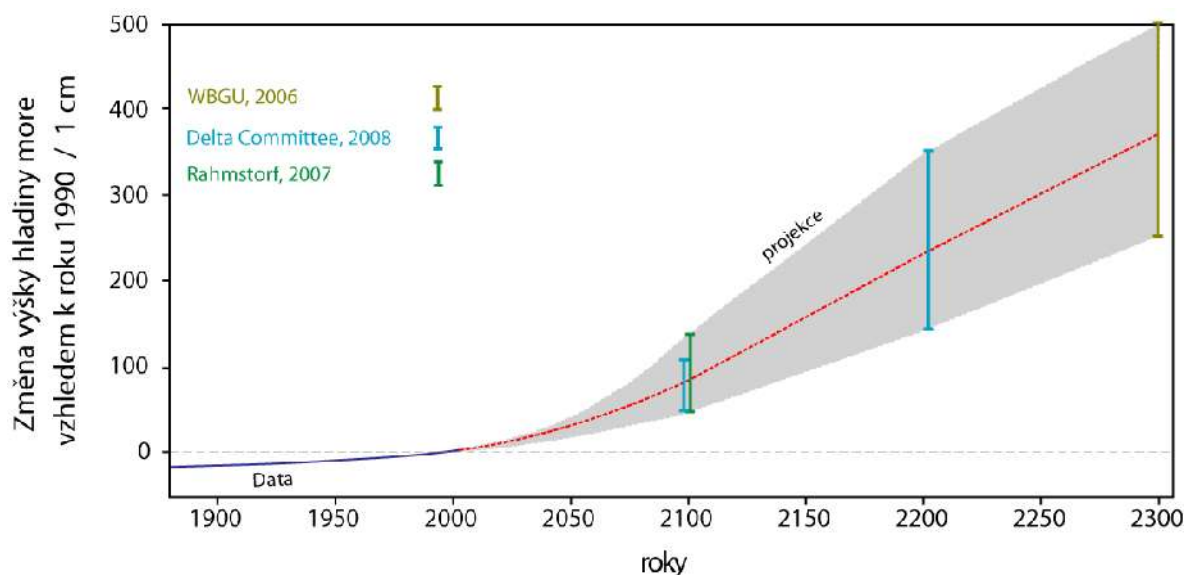
Hladina moře do roku 2100 pravděpodobně stoupne mnohem více, než činí často uváděný rozsah 18–59 centimetrů z IPCC AR4. Jak upozorňuje IPCC AR4, modely použité k vytvoření projekcí výšky hladiny moře v 21. století nezahrnovaly dynamiku ledových štítů. Často uváděná projekce vzestupu hladiny moře o 18–59 centimetrů jako taková obsahovala pouze jednoduché odhady při-



spěvku ledových štítů Grónska a Antarktidy k hladině moře, založené na tehdejších odhadech jejich hmotnostní bilance a předpokladu, že se nezmění. AR4 předpokládala, že bilance hmoty ledového štítu Antarktidy je pozitivní, a že tedy Antarktida během 21. století bude zvyšování globální hladiny moře brzdit. Ledový štít Antarktidy však v současnosti ztrácí hmotu v důsledku dynamických procesů (viz Obrázek 10 této zprávy). Vycházejí z několika nových studií došel shrnující dokument z Kodaňského klimatického kongresu v roce 2009 (Richardson et al. 2009) k závěru, že „aktualizované odhady

budoucího vzestupu průměrné globální hladiny moře jsou zhruba dvojnásobkem projekcí IPCC z roku 2007“.

Hladina moře bude stoupat dále mnoho staletí potom, co se stabilizuje globální teplota, neboť oceánům a ledovým štítům trvá úplná reakce na teplejší podnebí takovou dobu. Obrázek 17 je sestaven z několika odhadů budoucího vzestupu z poslední doby. Tyto odhady upozorňují na to, že ničím neomezené globální oteplování pravděpodobně zvýší v následujících staletích hladinu moře o několik metrů, což povede ke ztrátě mnoha velkých měst na pobřeží a celých ostrovních států.



**Obrázek 17.** Několik nedávných projekcí budoucího růstu výšky hladiny moře. Historická data z Church a White (2006). Budoucí projekce pocházejí z Rahmstorf (2007) a WBGU (2006), přičemž projekce popisované zde jako Delta Committee jsou z Vellinga et al. (2008).

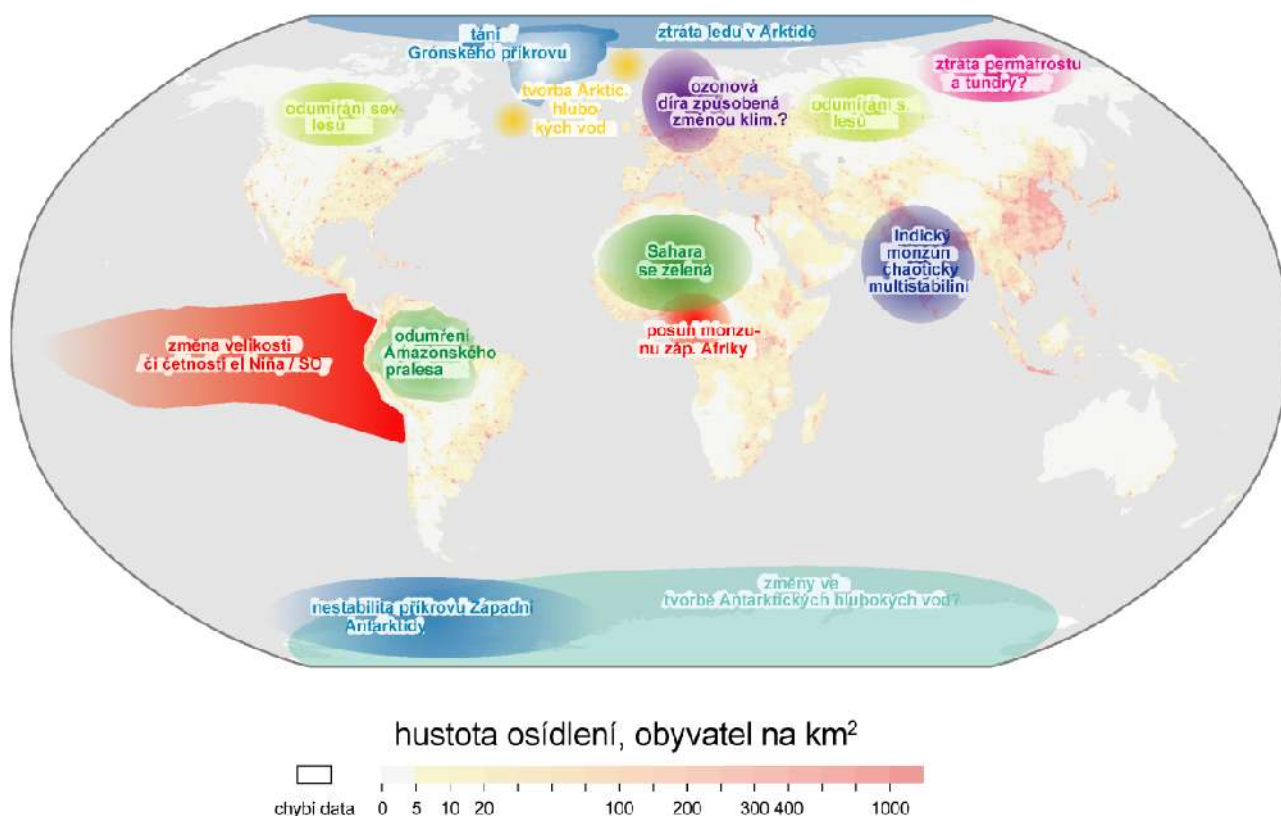
# Náhlé změny a body zvratu

- Existuje několik součástí klimatického systému, které by mohly v tomto století překročit bod zvratu v důsledku lidské činnosti, což by vedlo k náhlým a/nebo nevratným změnám.
- Globální oteplení o 1 °C (nad úroveň období 1980–1999) s sebou nese středně významná rizika překročení bodů zvratu velkého rozsahu a globální oteplení o 3 °C by vedlo k podstatným až velmi vážným rizikům.
- Existuje šance na včasné varování, že se bodům zvratu blížíme, ale pokud počkáme, až proměnu začneme pozorovat, bude v některých případech nezastavitelná.

## Co je to bod zvratu?

Bod zvratu je kritická mez, na které se budoucí stav systému může kvalitativně změnit malou změnou vnějšího působení (Lenton et al. 2008; Schellnhuber 2009). Prvek s bodem zvratu je součástí zemského systému (přinejmenším velikosti subkontinentu), která má bod zvratu (Lenton et al. 2008). Politicky významné prvky s bodem zvratu jsou ty, které mohou překročit bod zvratu v tomto století v důsledku lidské činnosti. Náhlá změna klimatu je částí změny v bodě zvratu, která se děje rychleji než její příčiny. Změna v bodě zvratu zahrnuje rovněž přechody

pomalejší než jejich příčiny (v obou případech je rychlost určena systémem samotným). V každém případě může být změna stavu vratná nebo nevratná. Vratná znamená, že když se působení vrátí zpět pod bod zvratu, obnoví se původní stav systému, ať už náhle nebo pozvolna. Nevratná znamená, že k tomu nedojde (k návratu zpět je třeba větší změny působení). Vratnost v principu neznamená, že změny budou vratné v praxi. Prvek s bodem zvratu může zaostávat za antropogenním působením, takže až se začne přechod pozorovat, může už být nevyhnutelná mnohem větší změna stavu.



**Obrázek 18.** Mapa některých potenciálně politicky významných prvků s bodem zvratu klimatického systému Země na podkladu hustoty zalidnění. Otazníky označují systémy, jejichž status jako prvků s bodem zvratu je obzvláště nejistý. Existují další potenciální prvky s bodem zvratu, které na této mapě chybí, například korálové útesy v mělké vodě (Veron et al. 2009) ohrožené zčásti okyselováním oceánu (viz kapitulu Oceány).

## Jsou v klimatickém systému Země body zvratu?

V klimatickém systému existuje množství bodů zvratu, jak vychází z pochopení jeho nelineární dynamiky a jak ukazují minulé náhlé klimatické změny a chování modelů (Pitman a Stouffer 2007; Schellnhuber 2009). V některých modelech dochází k překročení bodů zvratu v projekcích budoucnosti a nová pozorování odhalují, že rychlé změny jsou již v plném proudu v Arktidě. Nedávná práce určila v klimatickém systému užší seznam devíti potenciálně politicky významných prvků s bodem zvratu, které by podle projekce změny klimatu mohly překročit bod zvratu v tomto století a podstoupit přechod v tomto tisíciletí (Lenton et al. 2008). Ty jsou spolu s několika dalšími kandidáty zobrazeny na Obrázku 18.

## Které jsou předmětem největšího znepokojení? Jak to bylo stanoveno?

Nejvíce znepokojujícími body zvratu jsou ty nejbližší (ty, kterým se lze nejhůře vyhnout) a ty, které mají největší negativní účinky. Obecně čím je přechod rychlejší a méně vratný, tím větší jsou jeho dopady. Obavy může dále zvýšit jakákoli zesilující zpětná vazba, stejně jako vzájemné působení, při kterém překročení jednoho bodu zvratu podpoří překročení jiného. Blízkost některých bodů zvratu byla stanovena pomocí expertních odhadů (Lenton et al. 2008; Kriegler et al. 2009). Blízkost, rychlost i vratnost byly posouzeny také přezkoumáním literatury (Lenton et al. 2008), ale je potřeba podrobněji zvážit jejich dopady. Nyní si povíme o některých nejvíce znepokojujících regionech a jejich prvcích s bodem zvratu:

**Arktida:** Ledový štít Grónska (GIS) se možná blíží bodu zvratu, při němž bude odsouzen ke zmenšení (Lenton et al. 2008; Kriegler et al. 2009). V roce 2007 jsme pozorovali šokující zesílení sezónního tání v souvislosti s rekordním letním úbytkem mořského ledu v Arktidě (Mote 2007). Jak se jednou přechod k menšímu ledovému pokryvu Grónska rozběhne, nebude snadno vratný, ačkoli pravděpodobně potrvá několik staletí (a není tedy náhlý). Účinky skrze stoupání hladiny moře budou nakonec velké a celosvětové, budou ale záležet na rychlosti zmenšování ledového štítu.

**Antarktida:** Ledový štít Západní Antarktidy (WAIS) je podle odhadů v současnosti dále od bodu zvratu než GIS, ale je to dosti nejisté (Lenton et al. 2008; Kriegler et al. 2009). WAIS má potenciál rychlejších změn, a tudíž větších dopadů. Ztráta ledových šelfů kolem Antarktického poloostrova, např. Larsenu B, následovaná urychlením ledovců, které podpíraly, poukazuje na mechanismus, jenž může být hrozbou pro některé části WAIS. Domníváme se, že hlavní ledový štít Východní Antarktidy (EAIS) je stabilnější než WAIS. Existují však důkazy, že dochází ke změnám podél jeho přímořského okraje, který představuje odtok z většího objemu ledu, než je v celé Západní Antarktidě.

**Amazonie:** Amazonský deštný les zaznamenal v roce 2005 rozsáhlé sucho, které změnilo tuto oblast z propadu

uhlíku na jeho zdroj (0,6–0,8 Gt za rok) (Phillips et al. 2009). Bude-li pokračovat prodlužování období sucha působené lidskou činností (Vecchi et al. 2006) a budou-li sucha častější nebo vážnější (Cox et al. 2008), může systém dosáhnout bodu zvratu, který by měl za následek uschnutí až asi 80 % deštného lesa (Cox et al. 2004; Scholze et al. 2006; Salazar et al. 2007; Cook a Vízny 2008) a jeho nahrazení savanou. To by mohlo trvat několik málo desítek let, bylo by to těžko vratné, mělo by to veliký dopad na region a dominové účinky daleko odtamtud. Všeobecné usychání se očekává ve světě teplejším o více než 4 °C (Kriegler 2009) a neodvratné může být už při nižší globální teplotě, dlouho předtím, než začne být pozorováno (Jones et al. 2009).

**Západní Afrika:** Sahel a západoafrický monzun (WAM) zaznamenaly v minulosti rychlé, ale vratné změny, včetně zničujícího sucha od konce 60. let do 80. let 20. století. Předpovídané budoucí slábnutí termohalinní cirkulace v Atlantiku přispívající k podmínkám „atlantického Niña“ včetně silného oteplování Guinejského zálivu (Cook a Vízny 2006) by mohlo narušit sezónní nástup WAM (Chang et al. 2008) a způsobit jeho pozdější „skok“ na sever (Hagos 2007) do Sahelu. Pokud se WAM zhroutí, mohlo by to s čerpáním vlhkého vzduchu z Atlantiku na západ (Cook a Vízny 2006; Patricola a Cook 2008) paradoxně vést k dešti v částech Sahelu a zezelenání tohoto regionu, což by byl vzácný příklad pozitivního bodu zvratu.

**Indie:** Indický letní monzun je pravděpodobně již narušován (Ramanathan et al. 2005; Meehl et al. 2008) hnědým zákalem atmosféry, který leží nad subkontinentem a z menší části nad Indickým oceánem. Tento zákal je tvořen směsí sazí, které pohlcují sluneční záření, a síranů, které světlo odrážejí. Způsobuje spíše zahřívání atmosféry než povrchu země, a tím oslabuje vznik teplotního gradientu mezi zemí a oceánem, který je pro vyvolání nástupu monzunu kritický (Ramanathan 2005). V některých projekcích budoucnosti by působení hnědého zákalu mohlo vést během deseti let ke zdvojnásobení četnosti sucha (Ramanathan 2005) s velkými dopady, ačkoli přechod by měl být velmi dobře vratný.

Vážnou starostí by se mohlo stát několik dalších kandidátů na prvky a mechanismy s bodem zvratu, například ztráta uhlíku z permafrostu. Zimov et al. (2006) nedávno naznačili, že oblast s typem permafrostu označovaným jako jedoma, která obsahuje až 500 Gt C, by se mohla překloupat do nezvratného rozpadu vedeného vnitřní biochemickou tvorbou tepla (Khvorostyanov et al. 2008a, 2008b). Bod zvratu je však podle odhadů poměrně daleko.

## Jaký je vztah bodů zvratu k zesilujícím zpětným vazbám změny klimatu?

Body zvratu se často pletou s jevem zesilujících zpětných vazeb změny klimatu. Všechny prvky s bodem zvratu musejí mít nějakou silnou zesilující zpětnou vazbu – podrobněji jinde (Lenton et al. 2008) – ve své vnitřní nebo regionální klimatické dynamice, aby u nich mohl existovat nějaký práh, ale nemusejí mít zesilující zpětnou

vazbu na globální změnu klimatu. Mezi prvky s bodem zvratu, které by zesilující zpětnou vazbu na globální změnu klimatu mohly mít, patří amazonský deštný les (odumření by z něj učinilo zdroj CO<sub>2</sub>, který by nakonec mohl uvolnit až 100 Gt C), termohalinní cirkulace (oslabení nebo zhroucení by vedlo k unikání CO<sub>2</sub>) a permafrost typu jedomy (uvolnění až 500 Gt C). Prvky s bodem zvratu, které by mohly mít oslabující zpětnou vazbu na globální změnu klimatu, zahrnují boreální lesy (odumření by vedlo k uvolnění CO<sub>2</sub>, ale to by bylo převáženo ochlazením díky zvýšenému albedu povrchu země s odhalenou sněhovou pokrývkou; Betts 2000) a Sahel/Saharu (zezelenání by vedlo k jímání CO<sub>2</sub> a pravděpodobně ke zvýšenému pokrytí regionu oblačností).

### **Měli bychom být znepokojeni globálními zesilujícími zpětnými vazbami?**

Zesilující zpětné vazby jednotlivých prvků s bodem zvratu jsou v globálním měřítku většinou velmi slabé. Jiné zesilující zpětné vazby (nesouvisející s body zvratu), včetně možné budoucí změny průměrné reakce pevninské biosféry z propadu CO<sub>2</sub> na zdroj CO<sub>2</sub>, by však mohly značně urychlit růst CO<sub>2</sub> i globální teploty v horizontu staletí (Friedlingstein et al. 2006). Klimatický systém Země již je ve stavu výrazné zesilující zpětné vazby poměrně rychlých fyzikálních reakcí klimatu (Bony et al. 2006) (např. zpětné vazby vodní páry). V jakémkoli systému s výraznou zesilující zpětnou vazbou můžou mít další relativně malé zpětné vazby nepřiměřený dopad na jeho celkový stav (v tomto případě teplotu) vinou nelinearity toho, jak různá zesílení fungují dohromady.

### **Existuje globální bod zvratu?**

Globální bod zvratu se může vyskytnout pouze tehdy, když se zesilující zpětná vazba stane natolik silnou, aby vytvořila hranici, za kterou je systém jako celek odsouzen ke změně stavu v důsledku své vlastní vnitřní dynamiky. Navzdory mnoha řečem o takové „nezadržitelné“ změně klimatu v populárních médiích nemáme zatím žádný silný důkaz o tom, že by Země jako celek byla blízko takové hranice. Mnohem lepším popisem toho, co pozorujeme v současnosti a předpovídáme do budoucna, je spíše „zesilovaná“ změna klimatu.

### **Které antropogenní působící síly jsou nebezpečné?**

Celkové úhrnné množství emisí CO<sub>2</sub> (a dalších skleníkových plynů s dlouhou životností) určuje, k jakým dlou-

hodobým klimatickým změnám dojde, a tudíž ty prvky s bodem zvratu, které jsou citlivé na změnu průměrné globální teploty, mají pomalou odezvu a/nebo mají vzdálenější hranici. Nejdůležitějšími příklady jsou velké ledové štíty (GIS a WAIS). Pro monzuny je nejnebezpečnější nerovnoměrné aerosolové působení síranů (Rotstajn a Lohmann 2002) a sazí (Ramanathan 2005; Ramanathan a Carmichael 2008). Pro prvky s bodem zvratu v Arktidě jsou hlavním nebezpečím nánosy sazí na sněhu a ledu (Ramanathan a Carmichael 2008; Flanner et al. 2007) vinou jejich mimořádného účinku působícího tání (Flanner et al. 2007). Zvýšené množství sazí, pokles sulfátových aerosolů (Shindell a Faluvegi 2009) a přibývající skleníkové plyny s krátkou životností (metan a troposférický ozón) (Hansen et al. 2007) také přispívají k rychlému oteplování Arktidy a dohromady daleko přesahují vliv CO<sub>2</sub>. Současné zmírňování emisí SO<sub>2</sub> a tím obsahu sulfátových aerosolů má dvojaký účinek na klimatické prvky s bodem zvratu, například pro oblast Sahelu může být přínosné (Rotstajn a Lohmann 2002), ale pro Amazonii (Cox et al. 2008) a mořský led v Arktidě (Shindell a Faluvegi 2009) ohrožující. Změna pokryvu země může vést také k tomu, že velké plochy kontinentů poměrně odolné vůči klimatické změně již budou velmi zranitelné.

### **Je naděje na včasné varování, že se přiblížíme bodu zvratu?**

Nedávno došlo k pokroku v rozpoznání a testování potenciálních obecně použitelných ukazatelů včasného varování před přiblížením se bodům zvratu (Lenton et al. 2008; Livina a Lenton 2007; Dakos et al. 2008; Lenton et al. 2009; Scheffer et al. 2009). Téměř všeobecnou vlastností systémů blížících se k různým druhům bodů zvratu je zpomalení reakce na poruchu (Dakos et al. 2008; Scheffer et al. 2009). To bylo úspěšně zjištěno v záznamech klimatu minulosti blížícího se rozličným přechodům (Livina a Lenton 2007; Dakos et al. 2008) i v modelových experimentech (Livina a Lenton 2007; Dakos et al. 2008; Lenton et al. 2009). Před trvalejším přechodem může docházet také k překmitávání mezi stavy (Bakke et al. 2009). Další ukazatele včasného varování se zkoumají u ekologických bodů zvratu (Biggs et al. 2009), sem patří zvýšená proměnlivost (Biggs et al. 2009), asymetrické odezvy (Biggs et al. 2009; Guttal a Jayaprakash 2008) a jejich prostorové analogie (Guttal a Jayaprakash 2009). To by mohlo v principu být použito k rozpoznání klimatických bodů zvratu.



# Lekce z minulosti

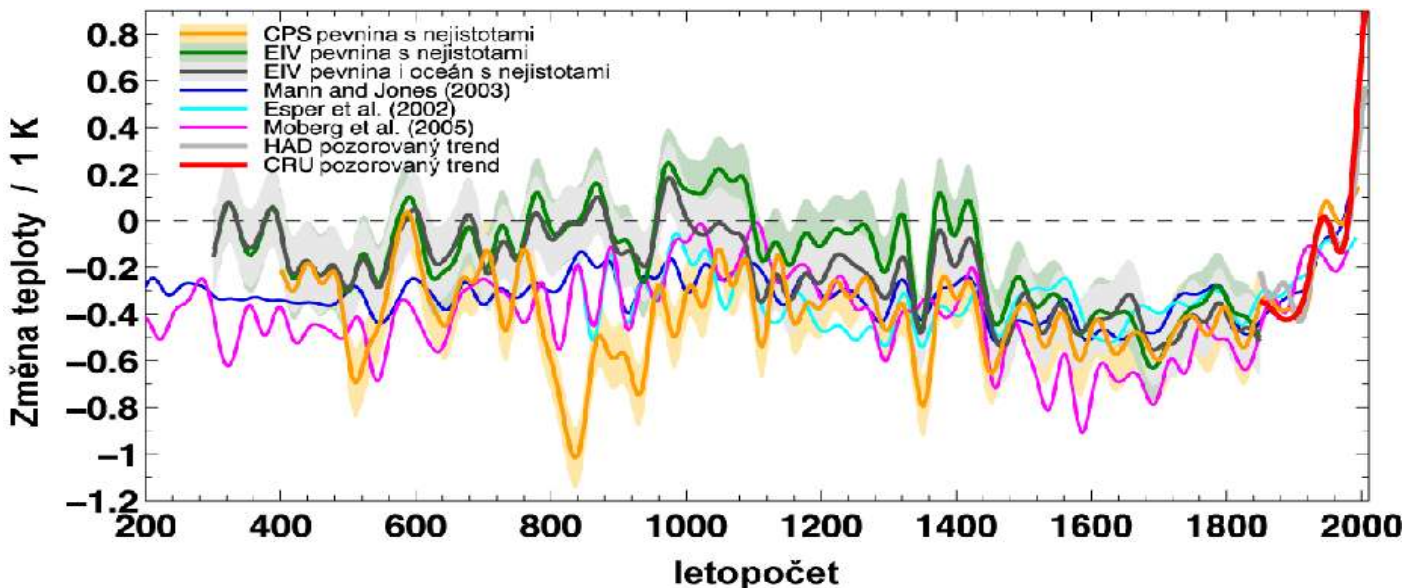
- Rekonstrukce klimatu minulosti ukazuje, že současné oteplování pozorované v Arktidě a na severní polokouli obecně je výjimečné v kontextu přirozené variability klimatu za posledních 2000 let.
- Nové záznamy z ledových vrtných jader potvrzují, jak důležité byly skleníkové plyny pro teploty na Zemi v minulosti, a ukazují, že koncentrace CO<sub>2</sub> jsou nyní vyšší, než byly kdykoli během posledních 800 000 let.

## Rekonstrukce posledních dvou tisíciletí

Znalost klimatu v průběhu minulých staletí nám může pomoci pochopit přirozenou změnu podnebí a dát moderní změnu klimatu do souvislosti. Množství studií rekonstruuje trendy globální i polokoulové teploty povrchu za poslední tisíciletí (např. Mann et al. 1998; Esper et al. 2002; Moberg et al. 2005) a všechny ukazují, že současná teplota na severní polokouli je neobvyklá v kontextu přinejmenším posledního tisíce let a pravděpodobně déle (Jansen et al. 2007). První z těchto rekonstrukcí vešla ve známost jako „hokejový graf“ (Mann et al. 1998, 1999). Některé aspekty rekonstrukce, hokejového grafu byly následně zpochybňovány, např. zda bylo 20. století nejteplejší z hlediska průměru přes polokouli (Soon a Baliunas 2003), zda je tato rekonstrukce reprodukovatelná nebo ověřitelná (McIntyre a McKittrick 2003) nebo může být citlivá na metodu použitou k vytažení informací ze záznamu letokruhů stromů (McIntyre a McKittrick 2005a, 2005b). Zatímco byly tyto

výtky v následujících pracích odmítnuty (např. Rutherford et al. 2005; Wahl a Ammann 2006, 2007; Jansen et al. 2007), americká Národní rada pro výzkum (NRC) svolala komisi, aby prozkoumala stav vědy zabývající se rekonstrukcí klimatu uplynulého tisíciletí. Zpráva NRC vydaná v roce 2006 do značné míry podpořila původní zjištění Manna et al. (1998, 1999) a doporučila cestu dalšího postupu v této oblasti (NRC 2006).

Mann et al. (2008) se chopili doporučení zprávy NRC a zrekonstruovali teplotu povrchu v měřítku polokoule i globálním pro většinu období posledních 2000 let, přičemž využili značně rozšířený soubor dat o změnách podnebí v řádu desítek až stovek let a také nedávno doplněná data z měření a doplňující metody, které byly důkladně testovány a validovány při simulacích s klimatickými modely. Jejich výsledky rozšiřují předchozí studie a lze z nich vyvodit, že současný nárůst teploty povrchu na severní polokouli je pravděpodobně v dlouhodobém kontextu anomální (Obrázek 19).



**Obrázek 19.** Porovnání různých rekonstrukcí teploty na severní polokouli zobrazených s odhadovanými 95% intervaly spolehlivosti (z Mann et al. 2008).

Kaufman et al. (2009) došli nezávisle k závěru, že současné oteplování Arktidy je bezpříkladné za nejméně 2000 let (Obrázek 20) a obrací dlouhodobý trend ochlazení probíhající tisíce let působený astronomickými faktory (tj. orbitálními cykly). Teplota během vrcholu „Středověké klimatické anomálie“ zhruba v letech 900–1100 n. l. může s moderním oteplováním soupeřit v urči-

tých regionech, jako je tropická oblast západního Tichého oceánu (Oppo et al. 2009) a některé oblasti přiléhající k severnímu Atlantiku (Mann et al. v tisku). Nicméně se zdá, že tato regionální oteplení odrážejí přerozdělení tepla při změnách proudění v atmosféře a obecně jsou kompenzována ochlazením jinde (např. ve východní a střední tropické části Pacifiku), takže teplota polokoule i

globální teplota dosahují nižších hodnot než v posledních desetiletích.

## Záznam skleníkových plynů v ledových vrtných jádrech

Změny koncentrací oxidu uhličitého (CO<sub>2</sub>) a metanu (CH<sub>4</sub>) v atmosféře v minulosti lze stanovit měřením složení vzduchu zachyceného [v ledových jádrech](#), analýzou hustoty průdchů na listech a geochemickou analýzou vrtných jader z mořských sedimentů.

Záznamy CO<sub>2</sub> a CH<sub>4</sub> z [ledových vrtných jader](#) ze stanice [Concordia \(Dome C\)](#), vyvrtaných v rámci Evropského projektu ledových vývrtů v Antarktidě (EPICA), které byly publikovány v letech 2004 a 2005, podrobně popisují události 440 000 let, respektive 650 000 let do minulosti (členové projektu [EPICA](#) 2004; Siegenthaler et al. 2005). V roce 2008 byl záznam prodloužen na 800 000 let (Lüthi et al. 2008; Loulergue et al. 2008). Nově rozšířené záznamy prozrazují, že současná úroveň skleníkových plynů (CO<sub>2</sub> je v roce 2010 už 390 ppm, ekvivalent CO<sub>2</sub> spolu s metanem atd. činí na 460 ppm) je nejméně o 40 % vyšší než kdykoli během posledních 800 000 let. Abychom našli stejnou úroveň skleníkových plynů v atmosféře, museli bychom cestovat nejméně dva až tři miliony let a možná až patnáct milionů let nazpět, do geologických období pliocénu a miocénu (Haywood et al. 2007; Raymo et al. 1996; Kürschner et al. 1996; Tripathi et al. 2009).

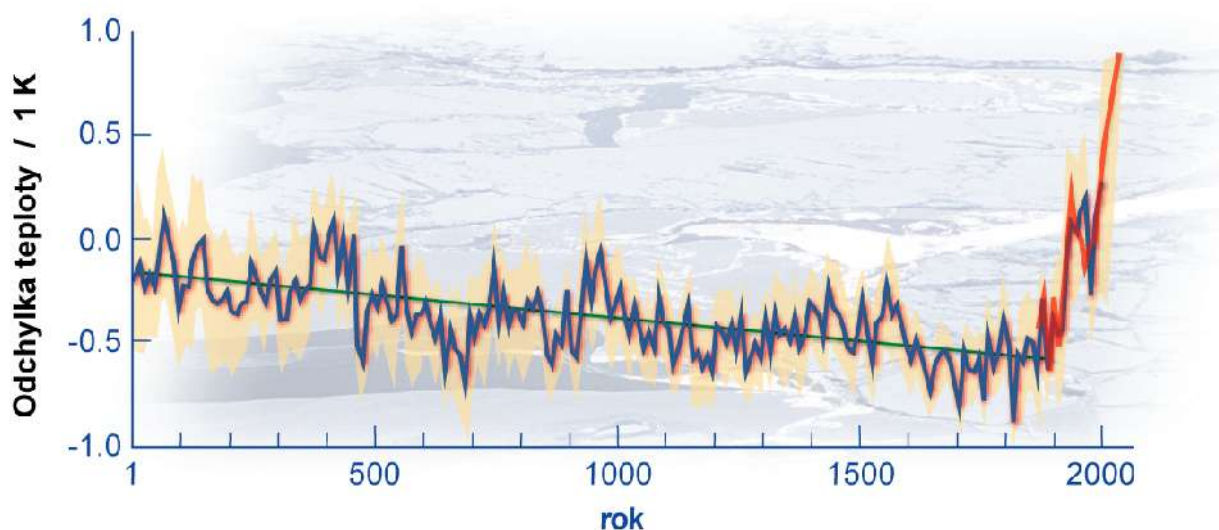
Silná korelace CH<sub>4</sub> a CO<sub>2</sub> s rekonstrukcí teploty se udržuje po celou dobu nového 800 000 let dlouhého záznamu (Lüthi et al. 2008; Loulergue et al. 2008). V záznamu z ledových vývrtů růst teploty obvykle začíná před zvyšováním koncentrace CO<sub>2</sub> v atmosféře. Toto zjištění je v souladu s pohledem, že přirozené kolísání CO<sub>2</sub> představuje spíše zpětnou vazbu v cyklu dob ledových a

meziledových než prvotní příčinu (Shackleton 2000); to bylo nedávno podrobně vysvětleno pomocí experimentů s klimatickými modely (Ganopolski a Roche 2009). Tím, kdo udává tempo cyklu dob ledových a meziledových, jsou změny orbity Země kolem Slunce (Hays et al. 1976; Berger 1978), ale tyto poměrně drobné orbitální změny musejí být zesíleny klimatickými zpětnými vazbami, aby vysvětlily velké rozdíly globální teploty a objemu zalednění a relativní náhlost přechodů mezi dobami ledovými a meziledovými (Berger et al. 1998; Clark et al. 1999).

## Paleoklimatologická omezení pro citlivost klimatického a zemského systému

Jednou z klíčových otázek klimatického výzkumu je určit, jak citlivě reaguje klima Země na danou změnu radiční bilance naší planety. To se často charakterizuje „citlivostí klimatu“, definovanou jako reakce globální teploty po dosažení rovnováhy na zdvojnásobení koncentrace CO<sub>2</sub> v atmosféře.

IPCC AR4 shrnuje výzkum, jehož cílem je stanovit nepřesnost určení citlivosti klimatu (např. Andronova a Schlesinger 2001; Frame et al. 2005; Annan a Hargreaves 2006), tvrzením, že „citlivost klimatu leží pravděpodobně v rozmezí od 2 °C do 4,5 °C, s nejpravděpodobnější hodnotou asi 3 °C“. Novější studie jsou s tímto odhadem zajedno (např. Knutti a Hegerl 2008). Tyto odhady klimatické citlivosti byly využity také pro určení pravděpodobných dopadů, environmentálních i sociálních/ekonomických, různých scénářů stabilizace CO<sub>2</sub> nebo úrovně emisí skleníkových plynů konzistentní se stabilizací průměrné globální teploty pod určitou hodnotou (např. Meinshausen et al. 2009; oddíl tohoto dokumentu „Zmírňování globálního oteplování“).



**Obrázek 20.** Modrá čára: odhadovaná teplota vzduchu v Arktidě za posledních 2000 let vycházející [z proxy záznamů](#) v jezerních sedimentech, ledových vrtných jádrech a letokruzích stromů. Zelená čára vyznačuje nejlepší lineární proložení pro dlouhodobý trend ochlazování v období končícím rokem 1900. Červená čára vycházející ze skutečných měření ukazuje oteplování v poslední době. (Převzato ze Science, pozměněno [Sdružením universit pro výzkum atmosféry, UCAR.](#))

## Nemění se podnebí neustále i bez zásahů člověka?

Samozřejmě. Změny klimatu v minulosti ale nejsou důvodem k uspokojení; vlastně nám říkají, že podnebí na Zemi je velmi citlivé na změny [radiačního působení](#). Z historie klimatu lze získat dva hlavní závěry:

Pokud se někdy radiační rovnováha Země narušila, reakce podnebí byla vždy silná. To svědčí pro to, že k tomu dojde i nyní, když lidé mění radiační bilanci zvyšováním koncentrace skleníkových plynů. Ve skutečnosti se údaje o změnách klimatu v minulosti Země používají ke stanovení toho, jak moc se změní globální teplota v důsledku určité změny radiační bilance (tj. k určení [citlivosti klimatu](#)). Data potvrzují, že náš klimatický systém je tak citlivý, jak naznačují naše klimatické modely, a možná ještě citlivější.

Dopady změn klimatu v minulosti byly vážné. V poslední době ledové, kdy bylo celosvětově o 4 °C až 7 °C chladněji než nyní, se zcela proměnil povrch Země a její ekosystémy a hladina moře byla o 120 metrů níže. Když byla Země naposledy o 2–3 °C teplejší než nyní, během pliocénu před 3 miliony let, sahala hladina moře o 25–35 metrů výše – vlivem menšího objemu ledových příkrovů v teplejším podnebí.

Navzdory velkým přirozeným změnám klimatu současné globální oteplování mezi nimi již vyniká. Rekonstrukce klimatu nasvědčují tomu, že se během posledních dvou tisíc let globální teploty nikdy nezměnily o více než 0,5 °C za století (např. Mann et al. 2008 a odkazy tam uvedené).

## Jsmo pouze v přirozené fázi oteplování, zotavujeme se z „malé doby ledové“?

Ne. „Zotavení“ klimatu není vědecký pojem, jelikož podnebí nereaguje jako kyvadlo, které se zhoupne zpět poté, co bylo vychýleno stranou. Klima se chová spíše jako hrnec s vodou na kamnech: může se ohřát jediné tehdy, pokud se mu dodá teplo, podle nezákladnějšího fyzikálního poznatku, zákona zachování energie. Tepelný rozpočet Země (její *radiační bilance*) je věc, které velmi dobře rozumíme. Ke zdaleka největší změně radiační bilance za posledních 50 let, během kterých se udály tři čtvrtiny globálního oteplování, došlo v důsledku lidmi způsobeného nárůstu koncentrací skleníkových plynů. Přirozené faktory měly v tomto období slabý účinek opačný, ochlazující.

Globální teploty jsou nyní nejen vyšší než v 16.–19. století, době někdy přezdívané jako „malá doba ledová“ (termín poněkud zavádějící, jelikož tento do značné míry regionální fenomén má málo co společného s opravdovými dobami ledovými). Teploty jsou nyní ve skutečnosti vyšší než kdykoli za posledních 2000 let – teplejší i než ve „středověkém optimu“ před tisícem let (viz Obrázek 19). To je věc, na které se shodnou všechny rekonstrukce globálního klimatu od různých skupin výzkumníků vycházejících z odlišných dat a metod.

## Neměnilo se v historii klimatu množství CO<sub>2</sub> v důsledku změn teploty, místo aby tomu bylo naopak?

Funguje to oběma způsoby: změny CO<sub>2</sub> ovlivňují teplotu skrze skleníkový jev, zatímco změny teploty mají vliv na koncentrace CO<sub>2</sub> prostřednictvím odezvy uhlíkového cyklu. Takovou závislost vědci nazývají zpětnovazební smyčkou.

Pokud se změní globální teploty, dojde k reakci uhlíkového cyklu (typicky se zpožděním několika staletí). To lze vidět v cyklech dob ledových za poslední 3 miliony let, které byly způsobeny změnami oběžné dráhy Země (takzvané [Milankovičovy cykly](#)). Zpětná vazba CO<sub>2</sub> zesílila a globalizovala tyto orbitálně vyvolané změny klimatu: bez snížení koncentrací CO<sub>2</sub> a oslabení skleníkového efektu nelze vysvětlit ani plný rozsah ledových dob, ani skutečnost, že k dobám ledovým docházelo současně na obou polokoulích. Detaily prodlevy mezi teplotou a CO<sub>2</sub> v záznamech z Antarktidy se nedávno podařilo reprodukovat v pokusech s klimatickými modely (Ganopolski a Roche 2009) a jsou zcela v souladu s hlavní rolí CO<sub>2</sub> při změně klimatu. Během oteplování na konci dob ledových se CO<sub>2</sub> uvolňoval z oceánů – pravý opak toho, co pozorujeme dnes, kdy množství CO<sub>2</sub> roste jak v oceánu, tak v atmosféře.

Změní-li se koncentrace CO<sub>2</sub> v atmosféře, pak následuje změna teploty z důvodu skleníkového jevu. To je to, co se děje v současnosti, když lidé uvolňují CO<sub>2</sub> z fosilních zdrojů. Ale k tomu také v historii Země došlo mnohokrát. Koncentrace CO<sub>2</sub> se měnily po miliony let v důsledku přirozených změn uhlíkového cyklu spojených s deskovou tektonikou (kontinentálním driftem) a klima tyto změny CO<sub>2</sub> sledovalo (např. pozvolné ochlazování do klimatu dob ledových během posledních 50 milionů let).

K prudkému uvolnění uhlíku, ne nepodobnému tomu, jaké způsobují dnes lidé, také v minulosti klimatu alespoň jednou došlo, jak ukazují data ze sedimentů z doby před 55 miliony let. „[Teplotní maximum paleocén-eocén](#)“ bylo způsobeno velkým globálním oteplením asi o 5 °C, které bylo doprovázeno zhoubným okyselením oceánů a masovým vymíráním. Dnes nám slouží jako veliké varování.

# Budoucnost

- Průměrná globální teplota vzduchu se podle projekcí zvýší do roku 2100 o 2 °C až 7 °C nad úroveň před průmyslovou revolucí. Tak široké rozpětí je hlavně důsledkem nejistoty ohledně budoucích emisí.
- Pokud emise celosvětově nevyvrcholí a nezačnou rychle klesat do roku 2020, oteplení s velmi vysokou pravděpodobností přesáhne 2 °C.
- Tempo oteplování se zvýší, pokud pozitivní zpětné vazby uhlíku významně sníží účinnost, s níž pevnina a oceány pohlcují naše emise CO<sub>2</sub>.
- Mnohé ukazatele se v současnosti vyvíjejí podle nejhorsších projekcí ze souboru modelových simulací IPCC AR4 nebo i nad nimi.

## Klimatické projekce

Od IPCC AR4 se neprovedla žádná nová koordinovaná sada modelových projekcí budoucího klimatu. Místo toho se nový výzkum v posledních několika letech většinou zaměřuje na přípravu dalšího kola simulací IPCC pro AR5 a pokračuje ve vyhodnocování modelových běhů z AR4. To zahrnuje nové analýzy pozorované rychlosti klimatické změny ve srovnání s projekcemi IPCC AR4 (např. Rahmstorf 2007; Stroeve et al. 2007) a nové výpočty, které do stávajících simulací začleňují zpětnou vazbu toků uhlíku a další procesy (např. Zickfeld et al. 2009; Allen et al. 2009). Ačkoli modely projevují dobrou schopnost zachytit dnešní průměrné podnebí, k některým v současnosti pozorovaným změnám, zvláště stoupání hladiny moře a tání mořského ledu v Arktidě, dochází rychleji, než očekávala IPCC AR4. To je důvod k obavám, neboť to naznačuje, že některé zesilující zpětné vazby a procesy, jako tání pevninského ledu, se dějí rychleji, než se prvně předpovídalo.

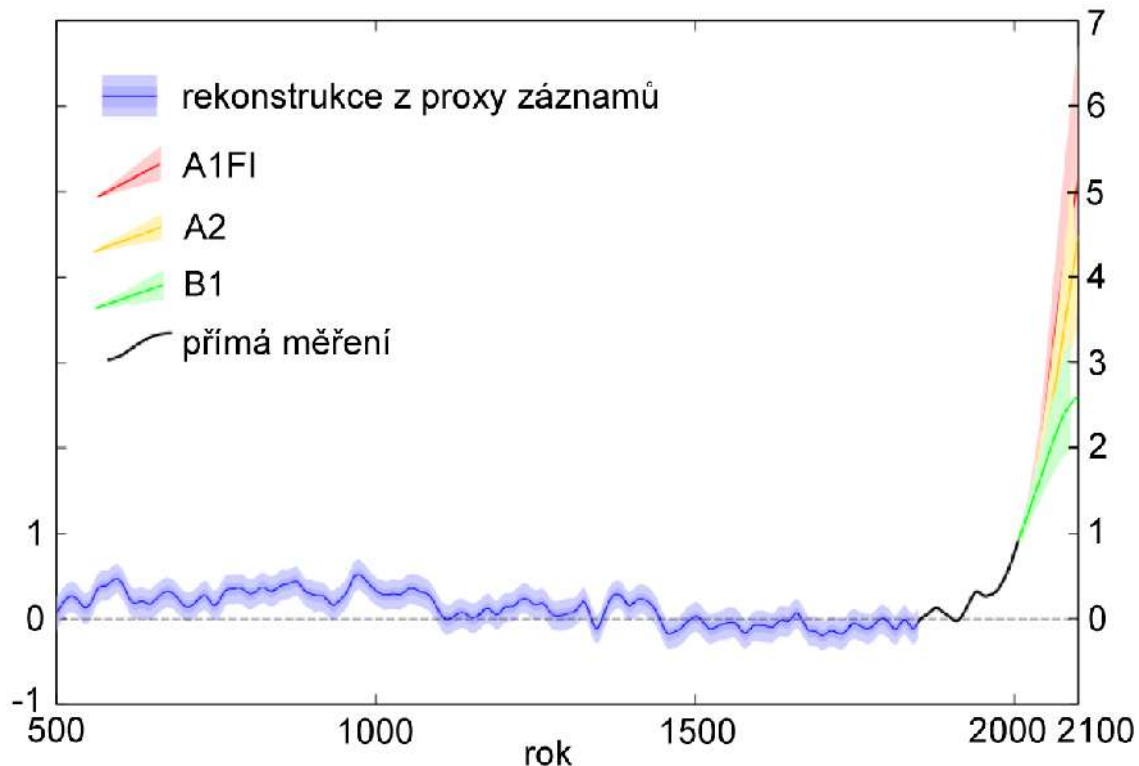
Na Obrázku 21 jsou zobrazeny nejnovější projekce odhadované průměrné globální teploty vzduchu do roku 2100. Široký rozsah obálky projekcí je dán především nejistotou ohledně budoucích emisí. Očekává se, že s emisemi na horním konci rozpětí, čili při „business as usual“ – bez účinných snah o snížení emisí v následujících několika desetiletích – dosáhne globální průměrné oteplení do roku 2100 4 °C až 7 °C a způsobí tím nevyhnutelnou změnu klimatu takového rozsahu, který by měl nesmírně nepříznivý vliv na celou lidskou civilizaci a na veškeré hlavní světové ekosystémy. Podle projekcí s emisemi na dolním konci rozpětí, což je něco, co by vyžadovalo naléhavé, hluboké a dlouhodobé snížení spotřeby fosilních paliv a aktivní ochranu světových lesů, dosáhne globální průměrné oteplení do konce století 2 °C až 3 °C.

Přestože je to samozřejmě lepší výsledek než na cestě s vysokými emisemi, průměrné globální oteplení o pouhých 1,5 °C až 2 °C stále přináší značné riziko nepříznivých dopadů na ekosystémy i lidskou společnost. Například nárůst globální teploty o 2 °C by mohl vést k dostatečnému oteplení v Grónsku, aby nakonec roztála větší část jeho ledového štítu (Oppenheimer a Alley 2005), což by zvedlo hladinu moře o více než šest metrů a připravilo o domov stovky milionů lidí po celém světě.

Navzdory jistotě ohledně dlouhodobého trendu oteplování v reakci na růst skleníkových plynů se neočekává, že toto oteplování bude monotónní, ani že bude sledovat trajektorii emisí z roku na rok. Je tomu tak proto, že přirozená proměnlivost a jedenáctiletý cyklus sluneční aktivity a také ojedinělé výbuchy sopek jsou zdrojem krátkodobých výchylek, které se překládají přes dlouhodobý trend (Lean a Rind 2009). I při mohutném, století trvajícím trendu oteplování o zhruba 4 °C stále očekáváme, že by záznam teploty byl přerušován ojedinělými, ale opakovanými desetiletými obdobími bez trendu, nebo dokonce s trendem mírného ochlazení (Easterling a Wehner 2009). Taková desetiletí proto nejsou předzvěstí konce globálního oteplování – o dost dříve, než k němu dojde, musejí vyvrcholit a klesat emise. Ve skutečnosti nemusí být maxima globální teploty dosaženo ještě několik staletí poté, co vyvrcholí emise (např. Allen et al. 2009). Dokonce ani poté, co emise zcela ustanou, se neočekává, že by po několik staletí až tisíciletí teplota vzduchu příliš klesala (Matthews a Caldeira 2008; Solomon et al. 2009; Eby et al. 2009), a to z důvodu dlouhé životnosti CO<sub>2</sub> v atmosféře. Kromě toho se očekává, že pokles množství srážek v období sucha v některých regionech bude nevratný (Solomon et al. 2009).



## Globální teplota vzhledem k období 1800-1900 (°C)



**Obrázek 21.** Rekonstrukce globální průměrné teploty vzhledem k období 1800–1900 (modře) a projekce globální průměrné teploty do roku 2100 (podle IPCC AR4). Obálky B1, A2, A1FI se vztahují k projekcím IPCC AR4 s využitím daných scénářů. Záznam rekonstrukce je převzat z Mann et al. (2008).

### Zmírňování globálního oteplování

Ačkoli lze globální oteplování zastavit, nelze ho kvůli dlouhé životnosti oxidu uhličitého v atmosféře snadno obrátit (Solomon et al. 2009; Eby et al. 2009). Ještě tisíc let poté, co dosáhneme společnosti s nulovými emisemi, zůstanou teploty zvýšené, pravděpodobně poklesnou jen o pár desetín stupně pod své nejvyšší hodnoty. Nyní přijímaná rozhodnutí proto budou mít hluboké a prakticky nevratné důsledky pro mnoho následujících generací, pokud se v budoucnosti nenajdou dostupné způsoby, jak dostat CO<sub>2</sub> v ohromném množství z atmosféry. Naděje, že se najdou, nevypadá slibně.

Teplota, na které se globální oteplování nakonec zastaví, závisí především na celkovém množství CO<sub>2</sub> vypuštěném do atmosféry od průmyslové revoluce (Meinshausen et al. 2009; Allen et al. 2009; Zickfeld et al. 2009). To je opět z důvodu dlouhé životnosti oxidu uhličitého v atmosféře. Má-li se tedy globální oteplování zastavit, celosvětové emise CO<sub>2</sub> musejí nakonec klesnout na nulu. Čím dříve emise ustanou, tím menší bude výsledné oteplení. Z vědeckého úhlu pohledu by tudíž přirozeným prvkem dohody o klimatické politice byl kumulativní rozpočet CO<sub>2</sub> pro svět. Takový dohodnutý globální rozpočet by se potom mohl rozdělit mezi státy, například na základě principů rovnosti (např. WBGU 2009).

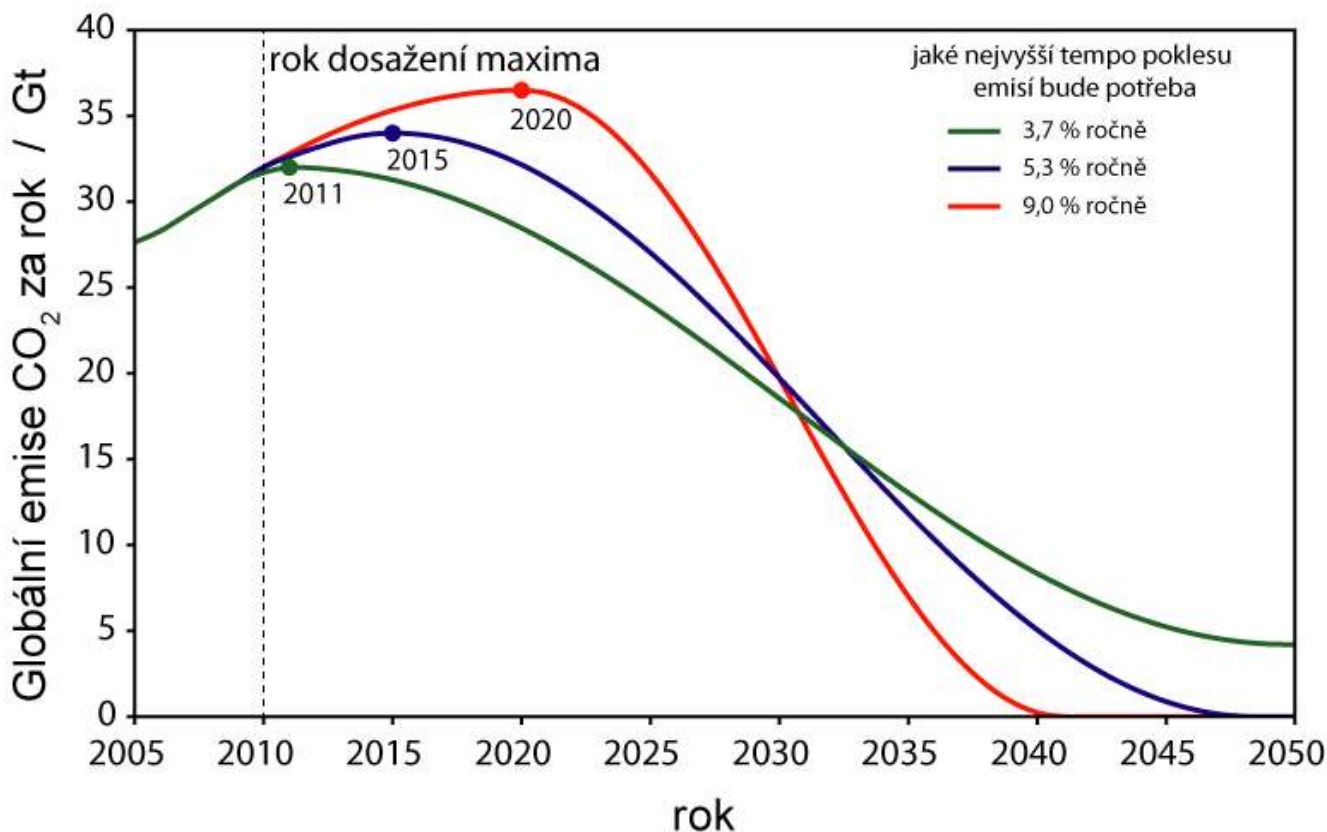
Politickým cílem s nejširší podporou je omezit globální oteplování na nejvýše 2 °C nad úroveň teploty před prů-

myslovou revolucí (často se bere například průměrná teplota v 19. století, ačkoli z důvodu malých výkyvů tehdejší teploty na přesném vymezení příliš nezáleží). Mnoho států veřejně uznává důležitost tohoto omezení na 2 °C. Skupina nejméně rozvinutých zemí (LDC) a také 43 malých ostrovních států (AOSIS) ještě dále vyzývají k omezení globálního oteplování jen na 1,5 °C. Souhrnná zpráva Kodaňského klimatického kongresu (Richardson et al. 2009), největší klimatické vědecké konference roku 2009, došla k závěru, že „Současná společnost by se těžko vypořádávala s růstem teploty o více než 2 °C, takový by pravděpodobně způsobil velké rozvrácení společnosti i životního prostředí během zbytku století i později.“

Množství nedávných vědeckých studií podrobně zkoumá, jaké trajektorie celosvětových emisí by byly v souladu s omezením globálního oteplování na 2 °C. Odpověď lze podat jedině v pravděpodobnostních termínech, aby odrážela zbývající nejistotu ohledně reakce klimatu na zvýšení CO<sub>2</sub> a nejistotu ohledně stability uhlíku uloženého v systémech na pevnině i v oceánu. Meinshausen et al. (2009) zjistili, že pokud se v období let 2000–2050 vypustí celkem 1000 miliard tun CO<sub>2</sub>, bude pravděpodobnost překročení dvoustupňové meze oteplení okolo 25 %. V letech 2000–2009 se vypustilo již zhruba 350 miliard tun, jen 650 miliard tun tak zbývá pro roky 2010–2050. Při současné velikosti emisí by se tento rozpočet vyčerpal za 20 let.

Důležitým důsledkem rychlého růstu velikosti emisí a potřeby toho, aby celkový rozpočet byl omezený, je, že jakýkoli odklad dosažení vrcholu emisí drasticky zvyšuje požadovanou rychlost a hloubku poklesu emisí v budoucnosti (viz Obrázek 22 a také England et al. 2009). Emise podle zelené ukázkové trajektorie na Obrázku 22 činí v roce 2050 4 Gt CO<sub>2</sub>, což při projektovaném počtu obyvatel Země okolo 9 miliard ponechává jen méně než půl tuny na osobu a rok. I když přesné číslo bude silně záviset na trajektorii, po níž se vydáme, nutné snížení emisí spolu s rostoucí populací bude znamenat, že v roce 2050 budou pravděpodobně muset být roční emise CO<sub>2</sub> na osobu pod 1 tunou.

Ačkoli je CO<sub>2</sub> nejdůležitějším antropogenním klimatickým působením, další skleníkové plyny a rovněž aerosoly hrají také nezanedbatelnou roli. Úspěšné omezení těchto ostatních radiačních působení by tudíž vytvořilo větší rezervu v rozpočtu emisí CO<sub>2</sub>, které si můžeme dovolit. Studie ukazují, že lákavou možností obzvláště rychlého a nákladově efektivního zmírňování změny klimatu je snížit znečištění černým uhlíkem (hlavní složka sazí) a troposférickým přízemním ozónem (Wallack a Ramanathan 2009). Na rozdíl od CO<sub>2</sub> to jsou složky s velmi krátkou životností v atmosféře, a tudíž reagují rychle na politická opatření.



**Obrázek 22.** Příklady globálních emisních trajektorií takových, aby se úhrnné emise CO<sub>2</sub> za časové období 2010–2050 rovnaly 750 Gt (1 Gt C = 3,67 Gt CO<sub>2</sub>). S touto hodnotou dosahuje pravděpodobnost omezení globálního oteplování na maximálně 2 °C hodnoty 67 %. Graf ukazuje, že čím později dosáhneme vrcholu emisí, tím strmější musí být jejich následné klesání. Na obrázku jsou varianty scénáře globálních emisí s různými roky vyvrcholení: 2011 (zeleně), 2015 (modře) a 2020 (červeně). K dosažení souladu s těmito křivkami bude zapotřebí maximální roční rychlosti poklesu (vzhledem k roku 2008) 3,7 % (zelená), 5,3 % (modrá) nebo 9,0 % (červená). (Zdroj: Vědecký poradní orgán německé spolkové vlády „Globální změna životního prostředí“; WBGU 2009.)

# Literatura

- Akerman, H. J. & M. Johansson, (2008) Thawing permafrost and thicker active layers in sub-arctic Sweden. *Permafrost and Periglacial Processes* **19**, 279–292.
- Alexander, L. V. & J. M. Arblaster, (2009) Assessing trends in observed and modelled climate extremes over Australia in relation to future projections. *International Journal of Climatology* **29**, 417–435.
- Allan, R. P. & B. J. Soden, (2008) Atmospheric warming and the amplification of precipitation extremes. *Science* **321**, 1481–1484.
- Allen, R. J. & S. C. Sherwood, (2008) Warming maximum in the tropical upper troposphere deduced from thermal winds. *Nature Geoscience* **1**, 399–403.
- Allen, M. R. et al., (2009) Warming caused by cumulative carbon emissions toward the trillionth tonne. *Nature* **458**, 1163–1166.
- Alley, R. B. et al., (2003) Abrupt Climate Change. *Science* **299**, 2005–2010.
- Allison, I. et al., (2009) Ice sheet mass balance and sea level. *Antarctic Science*, **21**, 413–426.
- Andronova, N. & M. E. Schlesinger, (2001) Objective estimation of the probability distribution for climate sensitivity. *Journal of Geophysical Research* **106**, 22605–22612.
- Annan, J. D. & J. C. Hargreaves, (2006) Using multiple observationally-based constraints to estimate climate sensitivity. *Geophysical Research Letters* **33**, L06704.
- Archer, D. et al., (2009) Ocean methane hydrates as a slow tipping point in the global carbon cycle. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **106**, 20596–20601, doi:10.1073/pnas.0800885105.
- Arzel, O. et al., (2006) Sea ice evolution over the 20th and 21<sup>st</sup> centuries as simulated by the current AOGCMs. *Ocean Modelling* **12**, 401–415.
- Aumann, H. H. et al., (2008) Frequency of severe storms and global warming. *Geophysical Research Letters* **35**, L19805.
- Bahr, D. B. et al., (2009) Sea-level rise from glaciers and ice caps: A lower bound. *Geophysical Research Letters* **36**, L03501.
- Bakke, J. et al., (2009) Rapid oceanic and atmospheric changes during the Younger Dryas cold period. *Nature Geoscience* **2**.
- Bala, G. et al., (2007) Combined climate and carbon-cycle effects of large-scale deforestation. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **104**, 6550–6555.
- Barnett, T. P. et al., (2008) Human induced changes in the hydrology of the western United States. *Science* **319**, 1080–1083.
- Barrett B. E. et al., (2009) Rapid recent warming on Rutford Ice Stream, West Antarctica, from borehole thermometry. *Geophysical Research Letters*, **36**, L02708.
- Benestad, R. E. & G. A. Schmidt, (2009) Solar trends and global warming. *Journal of Geophysical Research* **114**, D14101.
- Berger, A., (1978) Long-term variations of daily insolation and Quaternary climatic changes. *Journal of the Atmospheric Sciences* **35**, 2362–2367.
- Berger, A. & M. F. Loutre, (1991) Insolation values for the climate of the last 19 million years. *Quaternary Science Reviews* **10**, 297–317.
- Berger, A. et al., (1998) Sensitivity of the LLN climate model to the astronomical and CO<sub>2</sub> forcings over the last 200 ky. *Climate Dynamics* **14**, 615–629.
- Betts, R. A., (2000) Offset of the potential carbon sink from boreal afforestation by decreases in surface albedo. *Nature* **408**, 187–190.
- Betts, R. A. et al., (2007) Projected increases in continental river runoff due to plant responses to carbon dioxide. *Nature* **448**, 1037–1041.
- Biggs, R. et al., (2009) Turning back from the brink: Detecting an impending regime shift in time to avert it. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **106**, 826–831, doi:10.1073/pnas.0811729106.
- Bindoff, N. L. et al., (2007) Observations: Oceanic Climate Change and Sea Level. In *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* S. Solomon et al. eds (Cambridge University Press).
- Bondeau, A. et al., (2007) Modelling the role of agriculture for the 20<sup>th</sup> century global terrestrial carbon balance. *Global Change Biology* **13**, 679–706.
- Bony, S. et al., (2006) How well do we understand and evaluate climate change feedback processes? *Journal of Climate* **19**, 3445–3482.
- Booth, B. B. et al., (2009 submitted) Global warming uncertainties due to carbon cycle feedbacks exceed those due to CO<sub>2</sub> emissions. *Nature*.
- Braun, M. & A. Humbert, (2009) Recent retreat of Wilkins Ice Shelf reveals new insights in ice shelf breakup mechanisms. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* **6**, 263–267.
- Brewer, P. G., (2009) A changing ocean seen with clarity. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **106**, 12213–12214.
- Brook, E. et al., (2008) Potential for abrupt changes in atmospheric methane. In *Abrupt Climate Change. A report by the U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research*. 360–452 (U.S. Geological Survey).
- Canadell, J. G. et al., (2007) Contributions to accelerating atmospheric CO<sub>2</sub> growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **104**, 18866–18870.
- Cavaleri, D. J. & C. L. Parkinson, (2008) Antarctic sea ice variability and trends, 1979–2006. *Journal of Geophysical Research* **113**, C07004.
- Cazenave, A. et al., (2009) Sea level budget over 2003–2008: A reevaluation from GRACE space gravimetry, satellite altimetry and ARGO. *Global and Planetary Change* **65**, 83–88.
- CCSP, (2008a) Weather and Climate Extremes in a Changing Climate. Regions of Focus: North America, Hawaii, Caribbean, and U.S. Pacific Islands. A Report by the U.S. Climate Change Science Program. (Department of Commerce, NOAA's National Climatic Data Center, Washington, D.C., USA).
- CCSP, (2008b) Abrupt Climate Change. A report by the U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research. (U.S. Geological Survey, Reston VA).
- Chang, P. et al., (2008) Oceanic link between abrupt change in the North Atlantic Ocean and the African monsoon. *Nature Geoscience* **1**, 444–448.
- Chapman W. L. & J. E. Walsh, (2007) A synthesis of Antarctic temperatures. *Journal of Climate*, **20**, 4096–4117.
- Chen, J. et al., (2006) Antarctic mass rates from GRACE. *Geophysical Research Letters* **33**, L11502.
- Church, J. A. & N. J. White, (2006) A 20th century acceleration in global sea-level rise. *Geophysical Research Letters* **33**, L01602.
- Clark, P. U. et al., (1999) Northern Hemisphere ice-sheet influences on global climate change. *Science* **286**, 1104–1111.
- Cogley, J. G., (2009) Geodetic and direct mass-balance measurements: comparison and joint analysis. *Annals of Glaciology* **50**, 96–100.
- Comiso, J. C. & F. Nishio, (2009) Trends in the sea ice cover using enhanced and compatible AMSR-E, SSM/I and SMMR data. *Journal of Geophysical Research* **113**, C02S07.
- Cook, A. et al., (2005) Retreating glacier-fronts on the Antarctic Peninsula over the last 50 years. *Science* **22**, 541–544.
- Cook, K. H. & E. K. Vizy, (2006) Coupled Model Simulations of the West African Monsoon System: Twentieth- and Twenty-First-Century Simulations. *Journal of Climate* **19**, 3681–3703.
- Cook, K. H. & E. K. Vizy, (2008) Effects of Twenty-First-Century Climate Change on the Amazon Rain Forest. *Journal of Climate* **21**, 542–560.
- Cox, P. M. et al., (2004) Amazonian forest dieback under climate-carboncycle projections for the 21st century. *Theoretical and Applied Climatology* **78**, 137–156.
- Cox, P. M. et al., (2008) Increasing risk of Amazonian drought due to decreasing aerosol pollution. *Nature* **453**, 212–216.
- Cox, P. M. & C. D. Jones, (2008) Data from the past illuminates the modern dance of climate and carbon dioxide. *Science* **321**, 1642–1643.
- Cruz, F. et al., (2010) Probabilistic simulations of the impact of increasing leaf-level atmospheric carbon dioxide on the global land surface. *Climate Dynamics* **34**, 361–379, doi:10.1007/s00382-008-0497-0.
- Cui, X. & H. F. Graf, (2009) Recent land cover changes on the Tibetan Plateau: a review. *Climatic Change* **94**, 47–61.
- Curry, R. et al., (2003) A change in the freshwater balance of the Atlantic Ocean over the past four decades. *Nature* **426**, 826–829.
- Dakos, V. et al., (2008) Slowing down as an early warning signal for abrupt climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **105**, 14308–14312.
- Delworth, T. L. et al., (2008) The potential for abrupt change in the Atlantic Meridional Overturning Circulation. In *Abrupt Climate Change. A report by the U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research*. 258–359
- Dessler, A. E. et al., (2008) Water-vapor climate feedback inferred from climate fluctuations, 2003–2008. *Geophysical Research Letters* **35**, L20704.
- Domingues, C. M. et al., (2008) Improved estimates of upper-ocean warming and multi-decadal sea-level rise. *Nature* **453**, 1090–1093.
- Dorrepaal, E. et al., (2009) Carbon respiration from subsurface peat accelerated by climate warming in the subarctic. *Nature* **460**, 616–619.
- Easterling, D. R. & M. F. Wehner, (2009) Is the climate warming or cooling? *Geophysical Research Letters* **36**, L08706.

- Eby, M. et al., (2009) Lifetime of anthropogenic climate change: millennial time scales of potential CO<sub>2</sub> and surface temperature perturbations. *Journal of Climate* **22**, 2501–2511.
- Eisenman, I. & J. S. Wettlaufer, (2009) Nonlinear threshold behavior during the loss of Arctic sea ice. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **106**, 28–32.
- Elsner, J. B. et al., (2008) The increasing intensity of the strongest tropical cyclones. *Nature* **455**, 92–95.
- Emanuel, K. et al., (2008) Hurricanes and Global Warming: Results from Downscaling IPCC AR4 Simulations. *Bulletin of the American Meteorological Society* **89**, 347–367.
- England, M. H. et al., (2009) Constraining future greenhouse gas emissions by a cumulative target. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **106**, 16539–16540.
- EPICA community members, (2004) Eight glacial cycles from an Antarctic ice core. *Nature* **429**, 623–628.
- Esper, J. et al., (2002) Low-frequency signals in long tree-ring chronologies for reconstructing past temperature variability. *Science* **295**, 2250–2253.
- Fabry, V. J. et al., (2008) Impacts of ocean acidification on marine fauna and ecosystem processes. *ICES Journal of Marine Science* **65**, 414–432.
- Fargione, J. et al., (2008) Land clearing and the biofuel debt. *Science* **319**, 1235–1238.
- Fischer, E. M. et al., (2007) Contribution of land-atmosphere coupling to recent European heat waves. *Geophysical Research Letters* **34**, L06707.
- Flanner, M. G. et al., (2007) Present-day climate forcing and response from black carbon in snow. *Journal of Geophysical Research* **112**, D11202.
- Frame, D. J. et al., (2005) Constraining climate forecasts: The role of prior assumptions. *Geophysical Research Letters* **32**, L09702.
- Frederick, E. et al., (2004) Greenland Ice Sheet: increased coastal thinning. *Geophysical Research Letters* **31**, L24402.
- Friedlingstein, P. et al., (2006) Climate-carbon cycle feedback analysis: Results from the C4MIP model intercomparison. *Journal of Climate* **19**, 3337–3353.
- Fyke, J. G. & A. J. Weaver, (2006) The effect of potential future climate change on the marine methane hydrate stability zone. *Journal of Climate* **19**, 5903–5916.
- Galloway, J. N. et al., (2008) Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions and potential solutions. *Science* **320**, 889–892.
- Ganopolski, A. & D. M. Roche, (2009) On the nature of lead-lag relationships during glacial-interglacial climate transitions. *Quaternary Science Reviews* **28**, 3361–3378, doi:10.1016/j.quascirev.2009.09.019.
- Goosse, H. et al., (2009) Consistent past half-century trends in the atmosphere, the sea ice and the ocean at high southern latitudes. *Climate Dynamics* **33**, 999–1016.
- Gedney, N. et al., (2006) Detection of a direct carbon dioxide effect in continental river runoff records. *Nature* **439**, 835–838.
- Gleason, K. L. et al., (2008) A Revised U.S. Climate Extremes Index. *Journal of Climate* **21**, 2124–2137.
- Guan, D. et al., (2009) Journey to world top emitter: An analysis of the driving forces of China's recent CO<sub>2</sub> emissions surge. *Geophysical Research Letters* **36**, L04709.
- Guttal, V. & C. Jayaprakash, (2008) Changing skewness: an early warning signal of regime shifts in ecosystems. *Ecology Letters* **11**, 450–460.
- Guttal, V. & C. Jayaprakash, (2009) Spatial variance and spatial skewness: leading indicators of regime shifts in spatial ecological systems. *Theoretical Ecology* **2**, 3–12.
- Hagos, S. M. & K. H. Cook, (2007) Dynamics of the West African Monsoon Jump. *Journal of Climate* **20**, 5264–5284.
- Hall, D. K. et al., (2008) Greenland ice sheet surface temperature, melt and mass loss: 2000–06. *Journal of Glaciology* **54**, 81–93.
- Hanna, E. et al., (2008) Increased runoff from melt from the Greenland Ice Sheet: a response to global warming. *Journal of Climate* **21**, 331–341.
- Hanna, E. et al., (2009) Hydrologic response of the Greenland Ice Sheet: the role of oceanographic forcing. *Hydrological Processes* **23**, 7–30.
- Hansen, B. & S. Østerhus, (2007) Faroe Bank Channel overflow 1995 – 2005. *Progress in Oceanography* **75**, 817–856.
- Harris, C. et al., (2009) Permafrost and climate in Europe: monitoring and modelling thermal, geomorphological and geotechnical responses. *Earth-Science Review* **92**, 117–171.
- Hays, J. D. et al., (1976) Variations in the Earth's orbit: Pacemaker of the ice ages. *Science* **194**, 1121–1132.
- Haywood, A. M. et al., (2007) The mid-Pliocene Warm Period: a test-bed for integrating data and models. In *Deep-time perspectives on climate change: marrying the signal from computer models and biological proxies* M. Williams et al. eds 443–458 (The Micropalaeontological Society, Special Publication, The Geological Society, London).
- Hock, R. et al., (2009) Mountain glaciers and ice caps around Antarctica make a large sea-level rise contribution. *Geophysical Research Letters* **36**, L07501.
- Hofmann, M. & H. J. Schellnhuber, (2009) Oceanic acidification affects marine carbon pump and triggers extended marine oxygen holes. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **106**, 3017–3022.
- Hofmann, M. & S. Rahmstorf, (2009) On the stability of the Atlantic Meridional Overturning Circulation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, doi:10.1073/pnas.0909146106.
- Holland, M. M. et al., (2006) Future abrupt reductions in the summer Arctic sea ice. *Geophysical Research Letters* **33**, L23503.
- Holland, D. M. et al., (2008) Acceleration of Jakobshavn Isbrae triggered by warm subsurface ocean waters. *Nature Geoscience* **28**, 659–664.
- House, J. I. et al., (2008) What do recent advances in quantifying climate and carbon cycle uncertainties mean for climate policy? *Environmental Research Letters* **3**, 044002.
- Howat, I. M. et al., (2007) Rapid changes in ice discharge from Greenland outlet glaciers. *Science* **315**, 1559–1561.
- Howat, I. M. et al., (2008) Rates of southeast Greenland ice volume loss from combined ICESat and ASTER observations. *Geophysical Research Letters* **35**, L17505.
- Hoyos, C. D. et al., (2006) Deconvolution of the Factors Contributing to the Increase in Global Hurricane Intensity. *Science* **312**, 94–97.
- Hyvönen, R. et al., (2007) The likely impact of elevated CO<sub>2</sub>, nitrogen deposition, increased temperature and management on carbon sequestration in temperate and boreal forest ecosystems: a literature review. *New Phytologist* **173**, 463–483.
- IPCC, (2001) *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC TAR)*. J. T. Houghton et al. eds (Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA).
- IPCC, (2007) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (AR4)*. S. Solomon et al. eds (Cambridge University Press, Cambridge, UK & New York, NY, USA).
- IPCC, (2007) Summary for Policymakers. In *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC AR4)* S. Solomon et al. eds (Cambridge University Press).
- Jansen, E. et al., (2007) Palaeoclimate. In *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* S. Solomon et al. eds (Cambridge University Press).
- Jin, H.-j. et al., (2008) Changes in permafrost environments along the Qinghai-Tibet engineering corridor induced by anthropogenic activities and climate warming. *Cold Regions Science and Technology* **53**, 317–333.
- Johannessen, O. et al., (2005) Recent ice-sheet growth in the interior of Greenland. *Science* **310**, 1013–1016.
- Johnson, G. C. & N. Gruber, (2007) Decadal water mass variations along 20°W in the Northeastern Atlantic Ocean. *Progress in Oceanography* **73**, 277–295.
- Johnson, G. C. et al., (2008) Reduced Antarctic meridional overturning circulation reaches the North Atlantic Ocean. *Geophysical Research Letters* **35**, L22601.
- Johnson, G. C. et al., (2008) Warming and freshening in the abyssal southeastern Indian Ocean. *Journal of Climate* **21**, 5351–5363.
- Jones, G. S. et al., (2008) Human contribution to rapidly increasing frequency of very warm Northern Hemisphere summers. *Journal of Geophysical Research* **113**, D02109.
- Jones, K. F. & B. Light, (2008) Sunlight, water, and ice: Extreme Arctic sea ice melt during the summer of 2007. *Geophysical Research Letters* **35**, L11501.
- Jones, C. et al., (2009) Committed ecosystem change due to climate change. *Nature Geoscience* **2**, 484–487.
- Joos, F. & R. Spahni, (2008) Rates of change in natural and anthropogenic radiative forcing over the past 20,000 years. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **105**, 1425–1430.
- Kaser, G. et al., (2006) Mass balance of glaciers and ice caps: Consensus estimates for 1961–2004. *Geophysical Research Letters* **33**, L19501.
- Kaufman, D. S. et al., (2009) Recent Warming Reverses Long-Term Arctic Cooling. *Science* **325**, 1236–1239.
- Kharin, V. V. et al., (2007) Changes in temperature and precipitation extremes in the IPCC ensemble of global coupled model simulations. *Journal of Climate* **20**, 1419–1444.



- Khorostyanov, D. V. et al., (2008) Vulnerability of east Siberia's frozen carbon stores to future warming. *Geophysical Research Letters* **35**, L10703.
- Khorostyanov, D. V. et al., (2008) Vulnerability of permafrost carbon to global warming. Part I: model description and the role of heat generated by organic matter decomposition. *Tellus B* **60B**, 250–264.
- Knutti, R. & G. C. Hegerl, (2008) The equilibrium sensitivity of the Earth's temperature to radiation changes. *Nature Geoscience* **1**, 735–743.
- Krabill, W. et al., (2000) Greenland Ice Sheet: High-Elevation Balance and Peripheral Thinning. *Science* **289**, 428–430.
- Krabill, W. et al., (2004) Greenland Ice Sheet: Increased coastal thinning. *Geophysical Research Letters* **31**, L24402.
- Kriegler, E. et al., (2009) Imprecise probability assessment of tipping points in the climate system. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **106**, 5041–5046.
- Kürschner, W. M. et al., (1996) Oak leaves as biosensors of late Neogene and early Pleistocene paleoatmospheric CO<sub>2</sub> concentrations. *Marine Micropaleontology* **27**, 299–312.
- Kwok, R. & D. A. Rothrock, (2009) Decline in Arctic sea ice thickness from submarine and ICESat records: 1958–2008. *Geophysical Research Letters* **36**, L15501.
- Lam, P. et al., (2009) Revising the nitrogen cycle in the Peruvian oxygen minimum zone. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **106**, 4752–4757.
- Latif, M. & N. S. Keenlyside, (2009) El Niño/Southern Oscillation Response to Global Warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, doi:10.1073/pnas.0710860105.
- Lawrence, D. M. & A. G. Slater, (2005) A projection of severe near-surface permafrost degradation during the 21st century. *Geophysical Research Letters* **32**, L24401.
- Lawrence, D. M. et al., (2008) Accelerated Arctic land warming and permafrost degradation during rapid sea ice loss. *Geophysical Research Letters* **35**, L11506.
- Le Quéré, C. et al., (2007) Saturation of the Southern Ocean CO<sub>2</sub> sink due to recent climate change. *Science* **316**, 1735–1738.
- Le Quéré, C. et al., (2009) Trends in the sources and sinks of carbon dioxide. *Nature Geosciences* **2**, 831–836.
- Lean, J. L. & D. H. Rind, (2008) How natural and anthropogenic influences alter global and regional surface temperatures: 1889 to 2006. *Geophysical Research Letters* **35**, L18701.
- Lean, J. L. & D. H. Rind, (2009) How will Earth's surface temperature change in future decades? *Geophysical Research Letters* **36**, L15708.
- Lefebvre, W. et al., (2004) Influence of the southern annular mode on the sea-ice-ocean system. *Journal of Geophysical Research* **109**, C090005.
- Lemke, P. et al., (2007) Observations: Changes in Snow, Ice and Frozen Ground In *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* S. Solomon et al. eds (Cambridge University Press).
- Lenton, T. M. et al., (2008) Tipping Elements in the Earth's Climate System. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **105**, 1786–1793.
- Lenton, T. M. et al., (2009) Using GENIE to study a tipping point in the climate system. *Philosophical Transactions of the Royal Society A* **367**, 871–884.
- Letenmaier, D. P. & P. C. D. Milly, (2009) Land water and sea level. *Nature Geoscience* **2**, 452–454.
- Lindsay, R. W. et al., (2009) Arctic sea ice retreat in 2007 follows thinning trend. *Journal of Climate* **22**, 165–175.
- Livina, V. & T. M. Lenton, (2007) A modified method for detecting incipient bifurcations in a dynamical system. *Geophysical Research Letters* **34**, L03712.
- Lombard, A. et al., (2006) Perspectives on present-day sea level change. *Ocean Dynamics* **56**, 445–451.
- Loulergue, L. et al., (2008) Orbital and millennial-scale features of atmospheric CH<sub>4</sub> over the past 800,000 years. *Nature* **453**, 383–386.
- Lovenduski, N. et al., (2008) Toward a mechanistic understanding of the decadal trends in the Southern Ocean carbon sink. *Global Biogeochemical Cycles* **22**, GB3016.
- Lutheke, S. B. et al., (2006) Recent Greenland ice mass loss by drainage system from satellite gravity observations. *Science* **314**, 1286–1289.
- Lüthi, D. et al., (2008) High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present. *Nature* **453**, 379–382.
- Malhi, Y. et al., (2008) Climate Change, deforestation and the fate of the Amazon. *Science* **319**, 169–172.
- Malhi, Y. et al., (2009) Exploring the likelihood and mechanism of a climate-change induced dieback of the Amazon rainforest. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, doi:10.1073/pnas.0804619106.
- Mann, M. E. et al., (1998) Global-Scale Temperature Patterns and Climate Forcing Over the Past Six Centuries. *Nature* **392**, 779–787.
- Mann, M. E. et al., (1999) Northern Hemisphere Temperatures During the Past Millennium: Inferences, Uncertainties, and Limitations. *Geophysical Research Letters* **26**, 759–762.
- Mann, M. E. et al., (2008) Proxy-Based Reconstructions of Hemispheric and Global Surface Temperature Variations over the Past Two Millennia. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **105**, 13252–13257.
- Mann, M. E. et al., (2009) Atlantic hurricanes and climate over the past 1,500 years. *Nature* **460**, 880–883.
- Mann, M. E. et al., (2009) Global Signatures and Dynamical Origins of the “Little Ice Age” and “Medieval Climate Anomaly”. *Science* **326**, 1256–1260.
- Marsh, P. T. et al., (2009) Preliminary investigation into the severe thunderstorm environment of Europe simulated by the Community Climate Systems Model 3. *Atmospheric Research* **93**, 607–618.
- Matthews, H. D. & K. Caldeira, (2008) Stabilizing climate requires near zero emissions. *Geophysical Research Letters* **35**, L04705.
- McIntyre, S. & R. McKittrick, (2003) Corrections to the Mann et al. (1998) proxy database and northern hemispheric average temperature series. *Energy and Environment* **14**, 751–771.
- McIntyre, S. & R. McKittrick, (2005) Hockey sticks, principal components, and spurious significance. *Geophysical Research Letters* **32**, L03710.
- McIntyre, S. & R. McKittrick, (2005) The M&M critique of the MBH98 Northern Hemisphere climate index: Update and implications. *Energy and Environment* **16**, 69–99.
- McNeil, B. I. & R. J. Matear, (2007) Climate Change Feedbacks on Oceanic pH. *Tellus-B* **59B**, 191–198.
- McNeil, B. I. & R. J. Matear, (2008) Southern Ocean acidification: A tipping point at 450-ppm atmospheric CO<sub>2</sub>. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **105**, 18860–18864.
- Meehl, G. A. et al., (2004) Combinations of Natural and Anthropogenic Forcings in Twentieth-Century Climate. *Journal of Climate* **19**, 3721–3727.
- Meehl, G. A. et al., (2007a) Global Climate Projections. In *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* S. Solomon et al. eds (Cambridge University Press).
- Meehl, G. A. et al., (2007b) Contributions of natural and anthropogenic forcing to changes in temperature extremes over the U.S. *Geophysical Research Letters* **34**, L19709.
- Meehl, G. A. et al., (2008) Effects of Black Carbon Aerosols on the Indian Monsoon. *Journal of Climate* **21**, 2869–2882.
- Meier, M. F. & M. B. Dyurgerov, (2007) Glaciers dominate eustatic sea level rise in the 21st century. *Science* **317**, 1064–1067.
- Meinshausen, M. et al., (2009) Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2°C. *Nature* **458**, 1158–1162.
- Mercado, L. M. et al., (2009) Impact of change in diffuse radiation on the global land carbon sink. *Nature* **458**, 1014–1017.
- Metzl, N., (2009) Decadal increase of oceanic carbon dioxide in Southern Indian surface ocean waters (1991–2007). *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* **56**, 607–619.
- Moberg, A. et al., (2005) Highly variable Northern Hemisphere temperatures reconstructed from low- and high-resolution proxy data. *Nature* **433**, 613–617.
- Monaghan A. J. et al., (2008) Recent variability and trends of Antarctic near-surface temperature. *Journal of Geophysical Research* **113**, D04105.
- Mote, T. L., (2007) Greenland surface melt trends 1973–2007: Evidence of a large increase in 2007. *Geophysical Research Letters* **34**, L22507.
- Moy, A. D. et al., (2009) Reduced calcification in modern Southern Ocean planktonic foraminifera. *Nature Geoscience* **2**, 276–280.
- Nakicenovic, N. et al., (2000) IPCC Special Report on Emissions Scenarios. (Cambridge, UK), 599 pp.
- NASA Goddard Institute for Space Studies, (2009) *GISS Surface Temperature Analysis. Global Temperature Trends: 2008 Annual Summation*, <<http://data.giss.nasa.gov/gistemp/2008/>>.
- Nghiem, S. V. et al., (2007) Rapid reduction of Arctic perennial sea ice. *Geophysical Research Letters* **34**, L19504.
- Nicholls, R. J. et al., (2007) Coastal systems and low-lying areas. In *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* M. L. Parry et al. eds 315–356 (Cambridge University Press).
- NOAA, (2009) *State of the Climate, 2009*, <<http://www.ncdc.noaa.gov/sotc/>>.
- NRC (National Research Council), (2006) *Surface Temperature Reconstructions for the Last 2,000 Years*. (National Academies Press, Washington, DC).

- NSDIC – National Snow and Ice Data Center, (2009) <[http://nsidc.org/news/press/20091005\\_minimumpr.html](http://nsidc.org/news/press/20091005_minimumpr.html)>.
- Oerlemans, J. et al., (2007) Reconstructing the glacier contribution to sea-level rise back to 1850. *The Cryosphere* **1**, 59–65.
- Olivier J. G. J., Peters J. A. H. W., (2010) No growth in total global CO<sub>2</sub> emissions in 2009. *Netherlands Environmental Assessment Agency (PBL)*, <<http://www.pbl.nl/en/publications/2010/No-growth-in-total-global-CO2-emissions-in-2009.html>>.
- Oppo, D. W. et al., (2009) 2,000-year-long temperature and hydrology reconstructions from the Indo-Pacific warm pool. *Nature* **460**, 1113–1116.
- Orr, J. C. et al., (2005) Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature* **437**, 681–686.
- Orr, J. C. et al., (2009) Amplified acidification of the Arctic Ocean. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* **6**, 462009.
- Oschlies, A. et al., (2008) Simulated 21st century's increase in oceanic suboxia by CO<sub>2</sub>-enhanced biotic carbon export. *Global Biogeochemical Cycles* **22**, GB4008.
- Pall, P. et al., (2007) Testing the Clausius-Clapeyron constraint on changes in extreme precipitation under CO<sub>2</sub> warming. *Climate Dynamics* **28**, 351–363.
- Patricola, C. M. & K. H. Cook, (2008) Atmosphere/vegetation feedbacks: A mechanism for abrupt climate change over northern Africa. *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)* **113**, D18102.
- Pearson, P. L. & M. R. Palmer, (2000) Middle Eocene Seawater pH and Atmospheric Carbon Dioxide Concentrations. *Science* **284**, 1824–1826.
- Pedersen, C. A. et al., (2009) A new sea ice albedo scheme including melt ponds for ECHAM5 general circulation model. *Journal of Geophysical Research* **114**, D08101.
- Perovich, D. K. et al., (2007) Increasing solar heating of the Arctic Ocean and adjacent seas, 1979–2005: Attribution and role in the ice-albedo feedback. *Geophysical Research Letters* **34**, L19505.
- Petrenko, V. V. et al., (2009) <sup>14</sup>CH<sub>4</sub> measurements in Greenland ice: investigating last glacial termination CH<sub>4</sub> sources. *Science* **324**, 506–508.
- Pfeffer, W. T. et al., (2008) Kinematic constraints on glacier contributions to 21st-Century sea-level rise. *Science* **321**, 1340–1343.
- Phillips, O. L. et al., (2009) Drought sensitivity of the Amazon rainforest. *Science* **323**, 1344–1347.
- Piao, S. et al., (2007) Changes in climate and land-use have a larger direct impact than rising CO<sub>2</sub> on global river runoff records. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **104**, 15242–15247.
- Piekle, R. A. et al., (2007) An overview of regional land-use and landcover impacts on rainfall. *Tellus B* **59**, 587–601.
- Pitman, A. J. et al., (2007) The impact of climate change on the risk of forest and grassland fires in Australia. *Climatic Change* **84**, 383–401.
- Pitman, A. J. et al., (2009) Uncertainties in climate responses to past land cover change: First results from the LUCID intercomparison study. *Geophysical Research Letters* **36**, L14814.
- Pollard, D. & R. M. DeConto, (2009) Modelling West Antarctic ice sheet growth and collapse through the past five million years. *Nature* **458**, 329–332.
- Polyakov, I. V. et al., (2004) Variability of the intermediate Atlantic water of the Arctic Ocean over the last 100 years. *Journal of Climate* **17**, 4485–4497.
- Portmann, R. W. et al., (2009) Linkages between climate change, extreme temperature and precipitation across the United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **106**, 7324–7329.
- Pritchard, H. D. & D. G. Vaughan, (2007) Widespread acceleration of tidewater glaciers on the Antarctic Peninsula. *Journal of Geophysical Research* **112**, F03S29.
- Pritchard, H. D. et al., (2009) Extensive dynamic thinning on the margins of the Greenland and Antarctic ice sheets. *Nature* **461**, 971–975.
- Rahmstorf, S., (2007) A Semi-Empirical Approach to Projecting Future Sea-Level Rise. *Science* **315**, 368–370.
- Rahmstorf, S. et al., (2007) Recent climate observations compared to projections. *Science* **316**, 709.
- Ramanathan, V. et al., (2005) Atmospheric brown clouds: Impacts on South Asian climate and hydrological cycle. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **102**, 5326–5333.
- Ramanathan, V. & G. Carmichael, (2008) Global and regional climate changes due to black carbon. *Nature Geoscience* **1**, 221–227.
- Raupach, M. R. et al., (2007) Global and regional drivers of accelerating CO<sub>2</sub> emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **104**, 10288–10293.
- Raymo, M. E. et al., (1996) Mid-Pliocene warmth: stronger greenhouse and stronger conveyor. *Marine Micropaleontology* **27**, 313–326.
- Rayner, N. A. et al., (2006) Improved analyses of changes and uncertainties in sea surface temperature measured in situ since the mid-nineteenth century: the HadSST2 data set. *Journal of Climate* **19**, 446–469.
- Reichstein, M. et al., (2007) Reduction of ecosystem productivity and respiration during the European summer 2003 climate anomaly: a joint flux tower, remote sensing and modelling analysis. *Global Change Biology* **13**, 634–651.
- Repo, M. E. et al., (2009) Large N<sub>2</sub>O emissions from cryoturbated peat soil in tundra. *Nature Geoscience* **2**, 189–192.
- Richardson, K. et al., (2009) Climate Change: Global Risks, Challenges & Decisions. Synthesis Report of the Copenhagen Climate Congress. (University of Copenhagen), <<http://climatecongress.ku.dk/pdf/synthesisreport>>.
- Riebesell, U. et al., (2009) Sensitivities of marine carbon fluxes to ocean change. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **106**, 20602–20609.
- Rigby, M. et al., (2008) Renewed growth of atmospheric methane. *Geophysical Research Letters* **35**, L22805.
- Rignot, E. et al., (2004) Accelerated ice discharge from the Antarctic Peninsula following the collapse of Larsen B ice shelf. *Geophysical Research Letters* **31**, L18401.
- Rignot, E., (2006) Changes in ice dynamics and mass balance of the Antarctic ice sheet. *Philosophical Transactions of the Royal Society A* **364**, 1637–1655.
- Rignot, E. & P. Kanagaratnam, (2006) Changes in the velocity structure of the Greenland Ice Sheet. *Science* **311**, 986–990.
- Rignot, E., (2008a) Changes in West Antarctic ice stream dynamics observed with ALOS PALSAR data. *Geophysical Research Letters* **35**, L12505.
- Rignot, E. et al., (2008b) Recent Antarctic ice mass loss from radar interferometry and regional climate modelling. *Nature Geoscience* **1**, 106–110.
- Rignot, E. et al., (2008) Mass balance of the Greenland ice sheet from 1958 to 2007. *Geophysical Research Letters* **35**, L20502.
- Rintoul, S. R., (2007) Rapid freshening of Antarctic Bottom Water formed in the Indian and Pacific oceans. *Geophysical Research Letters* **34**, L06606.
- Rohling, E. J. et al., (2008) High rates of sea-level rise during the last interglacial period. *Nature Geoscience* **1**, 38–42.
- Rosa, R. & B. A. Seibel, (2008) Synergistic effects of climate-related variables suggest future physiological impairment in a top oceanic predator. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **105**, 20776–20780.
- Rotstayn, L. D. & U. Lohmann, (2002) Tropical Rainfall Trends and the Indirect Aerosol Effect. *Journal of Climate* **15**, 2103–2116.
- Rutherford, S. et al., (2005) Proxy-Based Northern Hemisphere Surface Temperature Reconstructions: Sensitivity to Method, Predictor Network, Target Season, and Target Domain. *Journal of Climate* **18**, 2308–2329.
- Sabine, C. L. et al., (2004) The Oceanic Sink for Anthropogenic CO<sub>2</sub>. *Science* **305**, 367–371.
- Salazar, L. F. et al., (2007) Climate change consequences on the biome distribution in tropical South America. *Geophysical Research Letters* **34**, L09708.
- Santer, B. D. et al., (2007) Identification of human-induced changes in atmospheric moisture content. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **104**, 15248–15253.
- Saunders, M. A. & A. S. Lea, (2008) Large contribution of sea surface warming to recent increase in Atlantic hurricane activity. *Nature* **451**, 557–560.
- Scambos, T. A. et al., (2004) Glacier acceleration and thinning after ice shelf collapse in the Larsen B embayment, Antarctica. *Geophysical Research Letters* **31**, L18402.
- Schellnhuber, H. J., (2009) Tipping elements in the Earth System. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **106**, 20561–20563.
- Scholze, M. et al., (2006) A climate-change risk analysis for world ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **103**, 13116–13120.
- Schuster, U. et al., (2009) Trends in North Atlantic sea surface pCO<sub>2</sub> from 1990 to 2006. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* **56**, 620–629, doi:10.1016/j.dsr2.2008.12.011.
- Schuur, E. A. G. et al., (2008) Vulnerability of permafrost carbon to climate change: Implications for the global carbon cycle. *BioScience* **58**, 701–714.
- Shackleton, N. J., (2000) The 100,000-year ice-age cycle identified and found to lag temperature, carbon dioxide, and orbital eccentricity. *Science* **289**, 1897–1902.
- Sheffield, J. & E. F. Wood, (2008) Global Trends and Variability in Soil Moisture and Drought Characteristics, 1950–2000, from Observation-Driven Simulations of the Terrestrial Hydrologic Cycle. *Journal of Climate* **21**, 432–458.
- Shindell, D. & G. Faluvegi, (2009) Climate response to regional radiative forcing during the twentieth century. *Nature Geoscience* **2**, 294–300.
- Siegenthaler, U. et al., (2005) Stable carbon cycle-climate relationship during the late Pleistocene. *Science* **310**, 1313–1317.
- Sitch, S. et al., (2007) Indirect radiative forcing due to ozone effects on the land carbon sink. *Nature* **448**, 791–794.

- Sokolov, A. P. et al., (2009) Probabilistic forecast for 21st century climate based on uncertainties in emissions (without policy) and climate parameters. *Journal of Climate* **22**, 5175–5204.
- Solomon, S. et al., (2009) Irreversible climate change due to carbon dioxide emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **106**, 1704–1709.
- Soon, W. & S. Baliunas, (2003) Proxy climatic and environmental changes of the past 1000 years. *Climate Research* **23**, 89–110.
- Stammerjohn, S. E. et al., (2008) Trends in Antarctic annual sea ice retreat and advance and their relation to El Niño–Southern Oscillation and Southern Annular Mode variability. *Journal of Geophysical Research* **113**, C03S90.
- Steffen, K. et al., (2008) Rapid changes in glaciers and ice sheets and their impacts on sea level. In *Abrupt Climate Change: A Report by the U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research* 60–142 (U.S. Geological Survey).
- Steig, E. J. et al., (2009) Warming of the Antarctic ice-sheet surface since the 1957 International Geophysical Year. *Nature* **457**, 459–462.
- Stott, P. A. et al., (2008) Detection and attribution of Atlantic salinity changes. *Geophysical Research Letters* **35**, L21702.
- Stramma, L. et al., (2008) Expanding oxygen-minimum zones in the tropical oceans. *Science* **320**, 655–658.
- Stroeve, J. et al., (2007) Arctic sea ice decline: Faster than forecast. *Geophysical Research Letters* **34**, L09501.
- Takahashi, T. et al., (2009) Climatological mean and decadal changes in surface ocean pCO<sub>2</sub>, and net sea-air CO<sub>2</sub> flux over the global oceans. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* **56**, 554–577.
- Tarnocai, C. et al., (2009) Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region. *Global Biogeochemical Cycles* **23**, GB2023.
- Thompson, D. W. J. & S. Solomon, (2002) Interpretation of recent Southern Hemisphere Climate Change. *Science* **296**, 895–899.
- Thorne, P. W., (2008) The answer is blowing in the wind. *Nature Geoscience* **1**, 347–348.
- Trapp, R. J. et al., (2007) Changes in severe thunderstorm environment frequency during the 21st century caused by anthropogenically enhanced global radiative forcing. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **104**, 19719–19723.
- Trapp, R. J. et al., (2009) Transient response of severe thunderstorm forcing to elevated greenhouse gas concentrations. *Geophysical Research Letters* **36**, L01703.
- Tripathi, A. K. et al., (2009) Coupling of CO<sub>2</sub> and Ice Sheet Stability Over Major Climate Transitions of the Last 20 Million Years. *Science* **326**, 1394–1397, doi:10.1126/science.1178296.
- Turner, J. et al., (2009) Non-annular atmospheric circulation change induced by stratospheric ozone depletion and its role in the recent increase of Antarctic sea ice extent. *Geophysical Research Letters* **36**, L08502.
- van den Broeke, M., (2005) Strong surface melting preceded collapse of Antarctic Peninsula ice shelf. *Geophysical Research Letters* **32**, L12815.
- Vecchi, G. A. et al., (2006) Weakening of tropical Pacific atmospheric circulation due to anthropogenic forcing. *Nature* **441**, 73–76.
- Vecchi, G. A. et al., (2008) Whither hurricane activity? *Science* **322**, 687–689.
- Velicogna, I. & J. Wahr, (2006) Acceleration of Greenland ice mass loss in spring 2004. *Nature* **443**, 329–331.
- Velicogna, I., (2009) Increasing rates of ice mass loss from the Greenland and Antarctic ice sheets revealed by GRACE. *Geophysical Research Letters* **36**, L19503.
- Vellinga, P. et al., (2008) Exploring high-end climate change scenarios for flood protection of the Netherlands: an international scientific assessment. (KNMI, Wageningen, the Netherlands).
- Veron, J. E. N. et al., (2009) The coral reef crisis: the critical importance of <350ppm CO<sub>2</sub>. *Marine Pollution Bulletin* **58**, 1428–1437.
- Wahl, E. R. et al., (2006) Comment on “Reconstructing past climate from noisy data”. *Science* **312**, 529.
- Wahl, E. R. & C. M. Ammann, (2007) Robustness of the Mann, Bradley, Hughes reconstruction of Northern Hemisphere surface temperatures: Examination of criticisms based on the nature and processing of proxy climate evidence. *Climatic Change* **85**, 33–69.
- Wallack, J. S. & R. Ramanathan, (2009 accepted) Strategies for Hedging Against Rapid Climate Change. *Foreign Affairs*.
- WBGU – German Advisory Council on Global Change, (2006) The Future Oceans – Warming Up, Rising High, Turning Sour. (WBGU, Berlin).
- WBGU – German Advisory Council on Global Change, (2009) Solving the climate dilemma: The budget approach. (WBGU, Berlin).
- Weart, S. & R. T. Pierrehumbert, (2007) *A Saturated Gassy Argument*, <<http://www.realclimate.org/index.php/archives/2007/06/asaturated-gassy-argument/>>.
- Wentz, F. J. et al., (2007) How much more rain will global warming bring? *Science* **317**, 233–235.
- Westerling, A. L. et al., (2006) Warming and Earlier Spring Increase Western U.S. Forest Wildfire Activity. *Science* **313**, 940–943.
- Wild, M. et al., (2007) The impact of global dimming and brightening on global warming. *Geophysical Research Letters* **34**, L04702.
- Wingham, D. et al., (2006) Mass balance of the Antarctic ice sheet. *Transactions of the Royal Society of London Series A* **364**, 1627–1635.
- Wouters, B. et al., (2008) GRACE observes small-scale mass loss in Greenland. *Geophysical Research Letters* **35**, L20501.
- Yeh, S.-W. et al., (2009) El Niño in a changing climate. *Nature* **461**, 511–514.
- Yin, J. et al., (2009) Model projections of rapid sea-level rise on the northeast coast of the United States. *Nature Geoscience* **2**, 262–266.
- Zhang, X. et al., (2007) Detection of human influence on twentieth century precipitation trends. *Nature* **448**, 461–465.
- Zickfeld, K. et al., (2009) Setting cumulative emissions targets to reduce the risk of dangerous climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **106**, 16129–16134.
- Zimov, S. A. et al., (2006) Permafrost and the Global Carbon Budget. *Science* **312**, 1612–1613.



# Biografie

## Allison, Ian

Ian Allison je vedoucím Programu ledu, oceánu, atmosféry a klimatu na [Australian Antarctic Division](#), vedoucím autorem Čtvrté hodnotící zprávy IPCC a prezidentem Mezinárodní asociace věd o kryosféře.

## Bindoff, Nathan

Nathan Bindoff je profesorem fyzikální oceánografie na Tasmanské univerzitě v Austrálii a koordinujícím vedoucím autorem Čtvrté hodnotící zprávy IPCC.

## Bindschadler, Robert

Robert Bindschadler je vedoucím vědcem Laboratoře pro procesy v hydrosféře a v biosféře v Goddardově centru vesmírných letů (GSFC) NASA v USA, vyšším členem Goddardova centra, členem AGU a dřívějším prezidentem Mezinárodní glaciologické společnosti.

## Cox, Peter

Peter Cox je profesorem a předsedou Met Office v oddělení [Climate system Dynamics](#) na Univerzitě v Exeteru ve Spojeném království a vedoucím autorem Čtvrté hodnotící zprávy IPCC.

## de Noblet, Nathalie

Nathalie de Noblet je výzkumnou pracovnící v Laboratoři věd o klimatu a životním prostředí (LSCE) v Gif-sur-Yvette ve Francii.

## England, Matthew

Matthew England je členem Federace Australských rad pro výzkum, profesorem fyzikální oceánografie, přispívajícím autorem IPCC a spoluředitelem Centra výzkumu změny klimatu (CCRC) na Univerzitě Nového jižního Walesu v Austrálii.

## Francis, Jane

Jane Francis je docentkou věd o Zemi na Univerzitě v Leedsu ve Spojeném království a ředitelkou Centra polárních věd Univerzity v Leedsu.

## Gruber, Nicolas

Nicolas Gruber je profesorem environmentální fyziky na ETH Zürich ve Švýcarsku a přispívajícím autorem Čtvrté hodnotící zprávy IPCC.

## Haywood, Alan

Alan Haywood je docentem paleoklimatologie na Fakultě věd o Zemi a životním prostředí Univerzity v Leedsu ve Spojeném království a nedávným držitelem Ceny Philipa Leverhulmeho.

## Karoly, David

David Karoly je profesorem meteorologie a držitelem stipendia Federace (udělovaného Australskou radou pro výzkum) na Univerzitě v Melbourne v Austrálii a vedoucím autorem Třetí a Čtvrté hodnotící zprávy IPCC.

## Kaser, Georg

Georg Kaser je glaciologem na Univerzitě v Innsbrucku v Rakousku, vedoucím autorem Čtvrté hodnotící zprávy IPCC a Technické zprávy IPCC o změně klimatu a vedě a předposledním prezidentem Mezinárodní asociace věd o kryosféře.

## Le Quéré, Corinne

Corinne Le Quéré je profesorkou environmentálních věd na Univerzitě Východní Anglie ve Spojeném království, výzkumníci [British Antarctic Survey](#), spolupředsedkyní [Global Carbon Project](#) a vedoucí autorkou Třetí a Čtvrté hodnotící zprávy IPCC.

## Lenton, Tim

Tim Lenton je profesorem vědy o zemském systému na Univerzitě Východní Anglie ve Spojeném království a držitelem ceny The Times Higher Education za výzkumný projekt roku 2008 za svoji práci na klimatických bodech zvratu.

## Mann, Michael

Michael E. Mann je profesorem na Katedře meteorologie Pensylvánské státní univerzity v USA, ředitelem tamního Centra věd o zemském systému a vedoucím autorem Třetí hodnotící zprávy IPCC.

## McNeil, Ben

Ben McNeil působí se stipendiem Královny Alžběty II., udělovaným Australskou radou pro výzkum v Centru pro výzkum změny klimatu na Univerzitě Nového jižního Walesu v Austrálii a jako odborný recenzent Čtvrté hodnotící zprávy IPCC.

## Pitman, Andy

Andy Pitman je spoluředitelem Centra pro výzkum změny klimatu na Univerzitě Nového jižního Walesu v Austrálii a vedoucím autorem Třetí a Čtvrté hodnotící zprávy IPCC.

## Rahmstorf, Stefan

Stefan Rahmstorf je profesorem fyziky oceánů a vedoucím katedry na Postupimském institutu pro výzkum dopadu změny klimatu v Německu, vedoucím autorem Čtvrté hodnotící zprávy IPCC a členem Vědeckého poradního sboru německé spolkové vlády „Globální změny životního prostředí“.

## Rignot, Eric

Eric Rignot je glaciologem a hlavním výzkumným pracovníkem v [Laboratoři proudového pohonu \(JPL\)](#) NASA v USA, profesorem věd o zemském systému na Kalifornské univerzitě v Irvine a vedoucím autorem Čtvrté hodnotící zprávy IPCC.

## Schellnhuber, Hans Joachim

Hans Joachim Schellnhuber je profesorem teoretické fyziky a ředitelem Postupimského institutu pro výzkum dopadu změny klimatu, předsedou Vědeckého poradního sboru německé spolkové vlády „Globální změny životního prostředí“ (WBGU) a dlouhodobým členem Mezivládního panelu pro změnu klimatu (IPCC).

## Schneider, Stephen

Stephen Schneider [byl profesorem interdisciplinárních environmentálních studií na Stanfordově Univerzitě v USA](#), vedoucím autorem IPCC všech čtyř hodnotících a dvou souhrnných zpráv, zakladatel a editor magazínu *Climatic Change*.

## Sherwood, Steven

Steven Sherwood je profesorem atmosférických věd v Centru pro výzkum změny klimatu na Univerzitě Nového jižního Walesu v Austrálii a přispívajícím autorem Čtvrté hodnotící zprávy IPCC.

## Somerville, Richard

Richard C. J. Somerville je Význačným emeritním profesorem na Scrippsově oceánografickém institutu Kalifornské univerzity v San Diegu v USA a koordinujícím vedoucím autorem Čtvrté hodnotící zprávy IPCC.

## Steffen, Konrad

Konrad Steffen je ředitelem Spojeného institutu pro výzkum v environmentálních vědách (CIRES) a profesorem klimatologie na Coloradské univerzitě v Boulderu v USA a předsedou projektu [Klima a kryosféra \(CliC\)](#) Světového programu výzkumu klimatu.

## Steig, Eric

Eric J. Steig je ředitelem Centra pro výzkum čtvrtohor a profesorem věd o Zemi a vesmíru na Washingtonské univerzitě v USA.

## Visbeck, Martin

Martin Visbeck je profesorem fyzikální oceánografie a zástupcem ředitele [Leibnizova institutu věd o moři \(IFM-GEOMAR\)](#) na Univerzitě Kiel, předsedou multidisciplinární výzkumné skupiny excelence v Kielu „Oceán budoucnosti“ a spolupředsedou projektu Proměnlivost a předpověditelnost klimatu (CLIVAR) Světového programu výzkumu klimatu (WCRP).

## Weaver, Andrew

Andrew Weaver je profesorem a držitelem stipendia [Canada Research Chair](#) na Centru modelování a analýzy klimatu na Univerzitě of Victoria v Kanadě, vedoucím autorem Druhé, Třetí a Čtvrté hodnotící zprávy IPCC a hlavním editorem *Journal of Climate*.