

Klimatické změny: **fakta bez mýtů**

Ladislav Metelka
Radim Tolasz



Centrum pro otázky životního prostředí
Univerzita Karlova v Praze

■■■ HEINRICH BÖLL STIFTUNG
PRAHA

Klimatické změny: **fakta bez mýtů**

**Ladislav Metelka
Radim Tolasz**



Centrum pro otázky životního prostředí
Univerzita Karlova v Praze

HEINRICH BÖLL STIFTUNG
PRAHA

Klimatické změny: fakta bez mýtů

Tato kniha byla vydána díky laskavé podpoře Heinrich-Böll-Stiftung.

Kancelář v Praze, Spálená 23, 110 00 Praha 1

E-mail: info@boell.cz

<http://www.boell.cz>

Recenzenti:

Doc. RNDr. Jaroslava Kalvová, CSc.

Prof. RNDr. Milan Lapin, Ph.D.

RNDr. Radan Huth, DrSc.

Vydavatel:

Univerzita Karlova v Praze, Centrum pro otázky životního prostředí

Ovocný trh 3/5, 116 36 Praha 1

E-mail: czp@cuni.cz

<http://www.cozp.cuni.cz>

Grafické zpracování:

Tomáš Barčík – design studio

© Univerzita Karlova v Praze, Centrum pro otázky životního prostředí 2009

ISBN 978-80-87076-13-2

OBSAH

Předmluva	8
Úvod	10
Počasí a podnebí	10
Historie klimatu na Zemi	13
Skleníkové plyny a skleníkový efekt	17
Koloběh a přibývání skleníkových plynů	21
Projekce změn klimatu	23
Důsledky změn klimatu	28
Snížování emisí skleníkových plynů	31
Závěr	33

Předmluva

Text, který máte před sebou, je společným dílem našich předních klimatologů. Kolegové z Českého hydrometeorologického ústavu jsou autory textu, který byl důkladně recenzován dalšími odborníky. Autoři i recenzenti velmi dbali na přesná vyjádření, nepředkládají své vlastní názory, nýbrž fundované shrnutí současného vědeckého poznání. Poskytují velmi střízlivý pohled na globální proces, jehož jsme všichni svědky: na celosvětovou klimatickou změnu.

Prezentované poznatky zčásti vycházejí ze 4. hodnotící zprávy Mezivládního panelu pro změnu klimatu, která byla vydána v průběhu roku 2007. Výzkumy a pozorování, které proběhly v poslední době, závěry této zprávy plně potvrzují a umocňují: jevy, které Mezivládní panel označuje jako pravděpodobné, se dnes považují za téměř jisté a navíc probíhají větší rychlostí, než se ještě před dvěma lety předpokládalo. Hrozba změny klimatu je bezprostřední a velmi vážná. Nejvíce zřejmou součástí této změny je oteplení naprosté většiny pevnin, které se už dnes projevuje a v budoucnu bude ještě výraznější. Znamená menší počet chladných dnů a zejména nocí. Budou se rovněž vyskytovat vlny horkých dnů, jejichž intenzita velmi pravděpodobně vzroste. Zvýšení průměrné teploty má nepříznivé dopady na přírodní ekosystémy, které se jen těžko této změně přizpůsobují. Musíme dále počítat s výskyty hmyzích a jiných škůdců tam, kde se jindy nevyskytovali, což se týká i lidských patogenů (u nás známé rozšíření areálů nebezpečných klíšťat). S tím souvisejí i častější dlouhá suchá období, obecně suché oblasti budou ještě sušší, na druhé straně oblasti, které jsou v současné době vlhké, pravděpodobně nebudou tolik ovlivněny. Oblasti postižené velkými suchy se však rozšíří. Dalším důsledkem klimatických změn je ovlivnění vodních zdrojů všude na světě. Zvláště jsou ohroženy horské ledovce, které poměrně rychle tají, což způsobuje výrazné zmenšení jejich plochy a vydatnosti. To pocítí zejména mnoho milionů lidí v Asii a v Latinské Americe, jejichž vodní zdroje jsou zásobovány vodou himalájských a andských ledovců. Výraznou hrozbou je očekávaná vyšší frekvence a zvýšená intenzita extrémních hydrometeorologických událostí, jako jsou silné větry, bouře, intenzivní srážky následované povodněmi a v tropických oblastech hurikány a jiné tropické bouře. Zvýší se hladina oceánů, značná území v blízkosti mořského pobřeží budou zaplavena (některé nízko položené ostrovy prakticky úplně zmizí), ale znamená to i ohrožení staveb, silnic a jiných konstrukcí v příbřežních oblastech a rovněž vnikání slané vody do stávajících zdrojů vody sladké.

Lidé se připravují na adaptační opatření, která by měla dopady změny klimatu výrazně zmírnit. Největší pozornost se věnuje vodním zdrojům a jejich využití. Týká se to nejen oblastí suchých, ale i území, která až dosud s vodními zdroji neměla velké problémy, jako je oblast střední Evropy včetně

České republiky. Významné změny se dají očekávat v zemědělství, které je citlivě adaptováno na klimatický režim daného regionu. Týká se to jak pěstovaných plodin, tak i způsobů kultivace včetně ochrany půdy, zejména není možno počítat s výrazným rozšiřováním zavlažovaných ploch. V souvislosti se zvyšováním hladiny oceánu se plánují nákladná opatření na ochranu proti zatopení příbřežních struktur. V této souvislosti mají velkou výhodu bohaté státy, které mohou věnovat značné finanční prostředky na tento účel, příkladem jsou nákladné plány Holandska nebo Itálie (Benátky). Chudé země, jako například Bangladéš, takové prostředky nemají. Projevy změny klimatu budou mít postupně výrazné důsledky na lidské zdraví, které bude ohroženo novými typy chorob, přesněji řečeno rozšíří se areály výskytu různých tropických chorob i do oblastí, kde se dříve nevyskytovaly. Bude třeba rozšířit zdravotní péči. Lidé však budou muset přizpůsobit i jiné své aktivity, například se výrazně změní profil turistických destinací, snad nejvýrazněji to postihne lyžařské areály. Adaptační opatření budou nutná i v dalších oblastech hospodářských aktivit, jako jsou doprava nebo dodávky energie.

Aby však mohly být adaptace úspěšné, nesmí míra změny klimatu převýšit únosnou mez. Globální změnu je nutno co nejvíce zmírnit a její průběh zpomalit. Proto byla v roce 1992 v Riu de Janeiru uzavřena Rámcová úmluva o změně klimatu, v níž se státy (smluvní strany Úmluvy) zavázaly „odvrátit nebezpečné antropogenní ovlivnění klimatického systému“. V roce 1997 byl v japonském Kjótu podepsán protokol, v němž se průmyslově vyspělé státy zavázaly snížit emise skleníkových plynů do let 2008–2012 o 5,2 % ve srovnání s rokem 1990. (Procenta snížení jsou různá pro jednotlivé státy. Evropská unie, která v té době měla 15 členů, se jako celek – tzv. společné sdílení břemene – zavázala k 8% redukci. Závazek České republiky – nezávisle na závazku EU – činil rovněž 8 %.) Kjótský protokol je často kritizován především ze dvou důvodů: nepřipojily se k němu Spojené státy a nevyžaduje žádná zmírňující opatření od rozvojových zemí včetně významných států a díky své velikosti i velkých znečišťovatelů: Číny, Indie, Brazílie a dalších. Přitom je zřejmé, že chudé rozvojové země jsou daleko zranitelnější než bohaté vyspělé státy, které si mohou dovolit nákladná adaptační opatření. Dále se namítá, že předpokládané redukce emisí skleníkových plynů, i kdyby se jich dosáhlo, jsou příliš malé, aby měly zásadnější vliv na změny klimatu. To všechno je jistě pravda, avšak je nutno vzít v úvahu, že Kjótský protokol nebyl nikdy považován za definitivní řešení problému změny klimatu, nýbrž za první krok a důkaz vážných úmyslů ze strany rozvinutých států.

Dosavadní nedostatky by měl nahradit nový režim, který bude platit po roce 2012, jehož cílem by mělo být zabránění zvýšení teploty o více než 2°C. To se dnes pokládá za ještě únosnou mez, která umožní, aby předpokládaná adaptační opatření bylo možné uskutečnit a aby byla smysluplná. Vyšší

teplota a zejména další průvodní jevy tak veliké změny klimatu by už měly skutečně nedozírné následky. To však bude vyžadovat velmi podstatné snížení emisí skleníkových plynů v globálním měřítku: prozatímní cíl (předběžně dohodnutý na celosvětové konferenci na Bali v prosinci 2007 a potvrzený summitem G8 v roce 2008) je snížení o 50 % do roku 2050.

Evropská unie pokládá změnu klimatu za velmi vážnou hrozbu nejen pro životní prostředí, ale i pro další hospodářství a civilizační rozvoj na celém světě. Proto je cílem Evropské unie dosáhnout celosvětové úmluvy, která by měla být dojednána v prosinci 2009 na světové konferenci v Kodani. Samotná Evropská unie s definitivní platností na svém summitu (zasedání Evropské rady) a rovněž na zasedání Evropského parlamentu na sklonku roku 2008 schválila tzv. klimaticko-energetický balíček legislativních aktů, který má zaručit, že EU dosáhne v roce 2020 tří konkrétních cílů stanovených Evropskou radou již v březnu 2007, tzv. 20–20–20, což znamená, že emise skleníkových plynů by se měly snížit o 20 %, k tomu by mělo přispět zvýšení podílu obnovitelných zdrojů energie na 20 % a snížení energetické náročnosti ekonomiky rovněž o 20 %.

Evropská unie si však uvědomuje, že pro úspěšné dojednání globálního režimu je klíčový postoj rozvojových států, které v poslední době vyjadřují ochotu se státy vyspělými spolupracovat. Rovněž zásadní je postoj Spojených států, které dnes naštěstí dávají najevo snahu výrazně přispět ke globálnímu úsilí o zmírnění změny klimatu. V nejbližších týdnech a měsících budou probíhat náročná jednání, při kterých bude hrát důležitou úlohu Česká republika jako předsednická země EU prvního pololetí roku 2009.

Bedřich Moldan, leden 2009

Poděkování

Rádi bychom na tomto místě poděkovali především Heinrich–Böll Stiftung za poskytnutí rozsáhlé podpory a vstřícnou spolupráci při vzniku tohoto textu. Dále potom recenzentům, jmenovitě Doc. RNDr. Jaroslavě Kalvové, CSc., Prof. Dr. Milanu Lapinovi, Ph.D. a RNDr. Radanu Huthovi, DrSc., za cenné připomínky a doporučení.

Úvod

Česká veřejná debata o globálních změnách klimatu neprobíhá zcela v souladu s posledními vědeckými výstupy na tomto poli. V denním tisku i ve výročních politiků a vysokých úředníků se objevují různá neporozumění základním aspektům problému i věcné chyby. Střetávají se tvrzení proti tvrzení a novináři, politici, byznysmeni, řada pracovníků státní správy a nakonec ani veřejnost prakticky netuší, co si mají myslet.

Proto zde stručně představujeme znalosti současné vědy o klimatických změnách a roli skleníkových plynů. Účelem této práce je shrnout, pro potřeby české veřejné diskuze, přístupnou formou dosavadní výsledky světového výzkumu.

Mezivládní panel pro změny klimatu

Obvykle se nestává, aby vědci dostali Nobelovu cenu za mír, ale rok 2007 byl výjimkou. Laureátem se stal Mezivládní panel pro změny klimatu (IPCC), který z několika tisíc odborníků ustavila OSN.

Panel ve stejném roce předložil svou v pořadí již čtvrtou hodnotící zprávu. Ta je velmi podrobná, má celkem asi 3000 stran, rozdělených do 3 základních částí, ale k dispozici jsou i stručná shrnutí pro laickou veřejnost (Summary for Policymakers) i tzv. odborné shrnutí (Technical Summary). Zpráva je k dispozici nejen v originále (<http://www.ipcc.ch>), ale její shrnutí (Summary for Policymakers) i v českých překladech (<http://www.env.cz>, <http://www.chmi.cz>). Zprávy IPCC jsou výstupem jednotlivých pracovních skupin, které podrobně sledují odbornou literaturu zabývající se problémem klimatické změny, především vědecké výstupy publikované v odborných časopisech. Každých několik let publikované poznatky shrnou a vyhodnotí. Každý výstup IPCC prochází složitým odborným připomínkováním, posuzováním a oponenturami dalších odborníků.

Počasí a podnebí

Veřejná debata o změnách klimatu často zaměňuje podnebí a počasí.

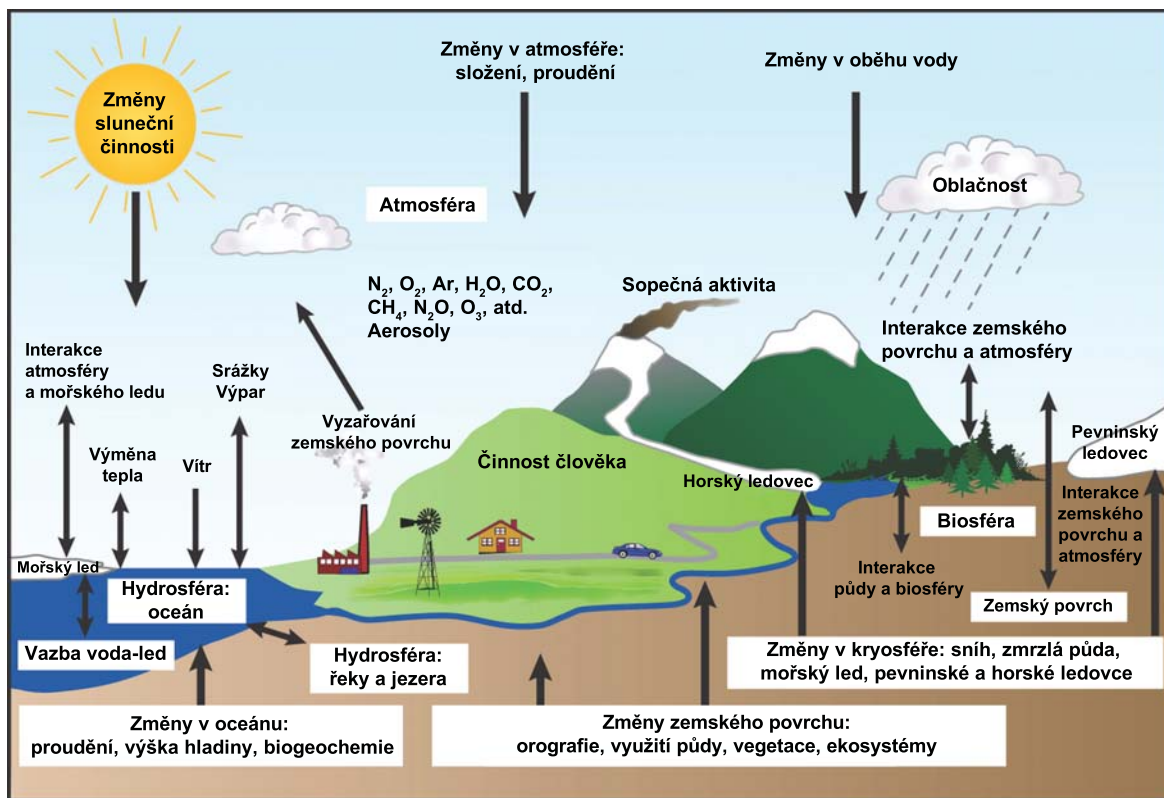
Počasí se bezprostředně dotýká nás všech. Je předmětem odborného zájmu meteorologů, kteří ho studují a předpovídají. Počasí je aktuální stav atmosféry ve výšce od zemského povrchu do 10 až 15 kilometrů nad ním. Jednou z typických vlastností počasí je jeho velká variabilita (proměnlivost) během několika dnů, během roku i mezi jednotlivými roky. Meteorolog má při své práci k dispozici výsledky měření na meteorologických stanicích, v atmosféře pomocí meteorologických balonových sondáží, z meteorologických radarů či meteorologických družic a samozřejmě výsledky předpovědních modelů. Kombinace vstupních údajů se zkušeností meteorologů dnes umožňuje předpovídat počasí až na několik dní dopředu.

Klima je, zjednodušeně vyjádřeno, charakteristický režim počasí v dané oblasti. Pro řadu meteorologických prvků (teplota, atmosférické srážky, tlak vzduchu, vlhkost vzduchu, směr a rychlost větru, sněhová pokrývka apod.) se vyhodnocují jejich statistické charakteristiky (průměry, extrém, denní a roční chody, proměnlivost, počty dní apod.) za delší období, zpravidla nejméně za 30 let. Proměnlivost klimatu, tedy dlouhodobých charakteristik, je podstatně menší než proměnlivost počasí.

Podnebí studují klimatologové, kteří od meteorologů přebírají naměřená data a podle nich popisují klima. Studují proměnlivost klimatu v prostoru i čase, analyzují klima jednotlivých oblastí. Avšak popis podnebí v daném místě je dnes pouze část moderní klimatologie. Velká pozornost je v poslední době věnována vytváření matematických modelů klimatu, s jejichž pomocí se odhaduje například i reakce klimatického systému na zásahy člověka. Paleoklimatologie studuje kolísání a změny klimatu v historické a geologické minulosti. Vzhledem k velké provázanosti klimatu s biologickými, geologickými, chemickými a dalšími procesy se klimatologie dotýká i mnoha dalších oborů, jako jsou například astronomie, oceánologie, geofyzika nebo biologie. Jistě není sporu o tom, že vývoj klimatu ovlivňuje i takové oblasti, jakými jsou například zemědělství, medicína, vodní hospodářství, energetika apod.

Atlas podnebí v České republice

Komplexní analýzu podnebí v České republice obsahuje Atlas podnebí Česka, který vydal Český hydrometeorologický ústav ve spolupráci s Univerzitou Palackého. Atlas obsahuje na více než 250 stranách mapy teploty, srážek a dalších základních klimatických charakteristik, které jsou doplněné popisem v češtině i angličtině, mnoha grafy, tabulkami i fotografiemi.



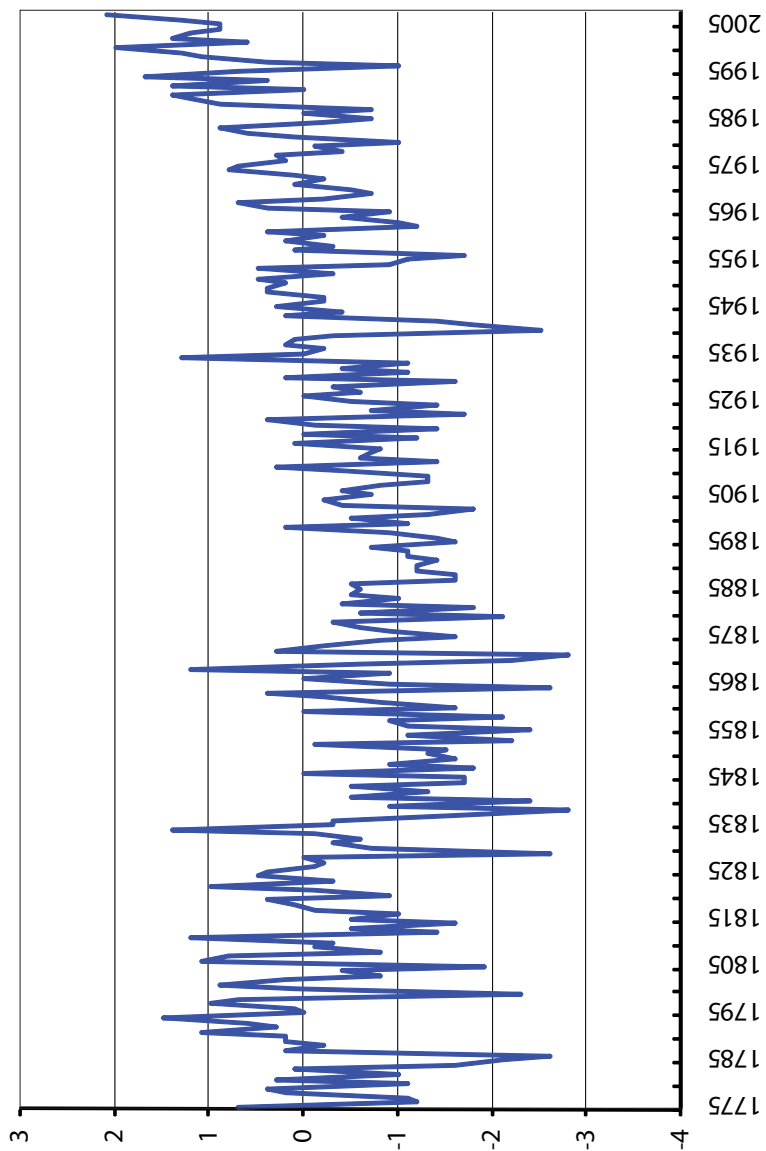
Obrázek 1: Schéma základních částí klimatického systému Země. Zdroj: Le Treut et al. (2007).

Klima se však neustále mění. Pokud máme k dispozici dostatečně dlouhé řady naměřených dat, můžeme srovnávat podnebí v různých obdobích. Dnes mají klimatologové k dispozici dostatek měření za posledních 100–150 let. Dále do minulosti před rokem 1850 je však k dispozici stále méně a méně přímo měřených hodnot. Klimatologové se proto musí ve starších obdobích spoléhat na nepřímé indikátory charakteru a změn klimatu, jejichž přesnost však postupně s časem klesá.

Klima je vytvářeno vzájemnou interakcí mnoha faktorů. Z nejvýznamnějších lze uvést např. faktory mimozemské (sluneční záření, změny orbitální dráhy Země), vlastnosti zemského povrchu (rozložení pevnin a oceánů, sopečná činnost, vegetace) a samozřejmě změny uvnitř samotného klimatického systému (chemické složení, biologické změny, změny ve využití půdy, emise skleníkových plynů). Důležitou vlastností klimatického systému jsou tzv. zpětné vazby. V důsledku těchto vazeb se mohou anomálie, způsobené určitou počáteční poruchou, zesilovat (kladné zpětné vazby) nebo naopak zeslabovat (záporné zpětné vazby). Klasickým příkladem kladné zpětné vazby je vazba mezi teplotou vzduchu a rozsahem polárního zalednění. Pokles teploty může znamenat zvětšení rozsahu sněhové či ledové pokrývky, tedy zvýšení

odrazivosti zemského povrchu, který odráží více sluneční energie než povrch bez sněhu a ledu, což vede k dalšímu poklesu teploty v okolí. Naopak příkladem záporné zpětné vazby může být vazba mezi teplotou a vývojem kupovité oblačnosti v létě. Sluneční záření, dopadající na zemský povrch, působí ohřátí přízemních vrstev vzduchu a vznik stoupavého proudění (konvekce) s následnou tvorbou kupovité oblačnosti. Oblačnost ale po svém vzniku začne část dopadajícího slunečního záření odrážet, k povrchu proniká méně slunečního záření, klesne tedy i míra ohřívání přízemních vrstev vzduchu, tedy i konvekce a tvorba kupovité oblačnosti. Obecně se dá konstatovat, že kladné zpětné vazby podporují nestabilitu klimatického systému, zatímco záporné zpětné vazby stabilitu zvyšují. Míra působení kladných i záporných zpětných vazeb se ale v klimatickém systému mění během dne, během roku i místo od místa. To vše vytváří z klimatu velmi složitý systém s prvky chaotického chování.

**Odchylky (°C) průměrné roční teploty od normálu 1961–1990
(Klementinum 1775–2007)**



Obrázek 2: Mezi meteorologické stanice s nejdéle řadou měření patří pražské Klementinum. Průměrná roční teplota v Klementinu v období 1775–2007. Zdroj: data i graf CHMÚ.

Historie klimatu na Zemi

Podnebí se v minulosti vždy měnilo, přirozené změny klimatu probíhají i dnes a nadále probíhat budou.

Rekonstrukci podnebí před začátkem přístrojových měření se zabývají historická klimatologie a paleoklimatologie. Přispívají k poznání stavu a chování klimatického systému v dobách, kdy jednoznačně převažoval vliv přírodních faktorů: změn orbitální dráhy Země, sluneční činnosti, rozložení pevnin, oceánů či vegetace a sopečné činnosti.

Rekonstrukce průběhu teploty v geologické minulosti Země

V dávné minulosti docházelo neustále ke změnám klimatu. Během celé geologické historie se patrně střídala období teplejší a chladnější, sušší i vlhčí. Srovnávání tehdejšího klimatu s dnešním je však poměrně problematické. Jednak proto, že nemáme k dispozici dostatečné množství kvalitních a spolehlivých dat k přesné rekonstrukci klimatu těch dob, jednak proto, že geologické podmínky na Zemi se výrazně lišily od těch dnešních. Jiné rozložení pevnin a oceánů mělo za následek i jiný systém proudění vody v oceánu a tím i jiné podmínky pro přenos tepelné energie z tropických oblastí do vyšších zeměpisných šířek.

Pro srovnání se současností jsou důležité hlavně čtvrtohory. Zatím trvají dva až tři miliony let. Teplota během nich sice s výkyvy, nicméně poměrně rychle klesala, takže se na souši okolo pólů rozšířily ledovce a vyvinul se moderní člověk. Podnebí ve čtvrtohorách se vyznačuje střídáním chladnějších dob

ledových (tzv. glaciálů) a teplejších dob meziledových (tzv. interglaciálů). Průměrné globální teploty poslední doby ledové byly oproti dnešním nižší řádově o jednotky stupňů Celsia (do 10 °C). Polární oblasti byly dlouhodobě zřetelně teplejší než dnes naposledy v posledním interglaciálu, před 125 000 lety.

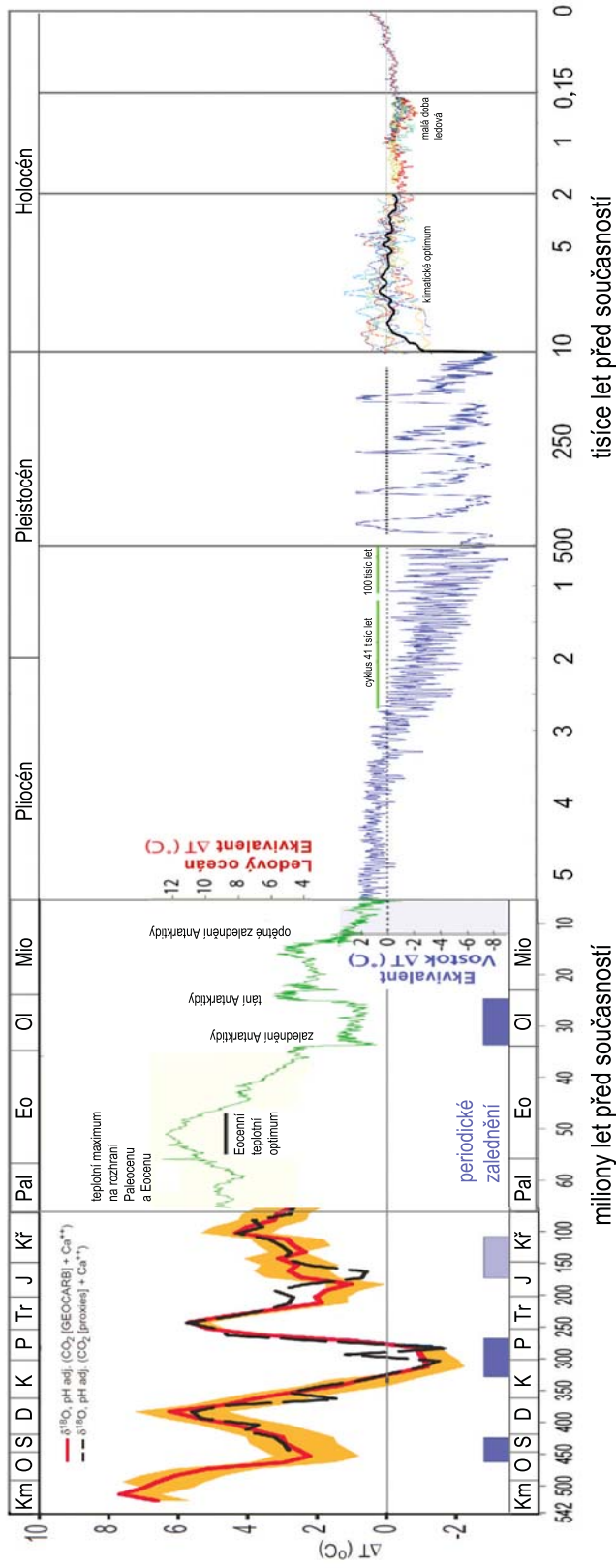
Indikátory minulého klimatu

Klima se v minulosti vždy vyvíjelo. K jeho postupným změnám docházelo v minulosti nedávně i v té pradávné, geologické.

Přímá data z měření počasí máme jen asi 150 let dozadu. Nicméně vědci objevili několik postupů, jak se bez nich alespoň částečně obejít. Jak vypadalo podnebí v dávné minulosti, se dozvídají pomocí tzv. klimatologických proxy dat. Spočívají v nepřímých metodách zjišťování klimatických charakteristik (především teploty) v minulosti.

Odborníci například přesným měřením porovnávají letokruhy stromů. Šířka letokruhů má statistickou vazbu na vývoj počasí během daného roku. Hlubokými vrty získávají led z vrstev uložených v Grónsku či Antarktidě před statisíci let a posléze analyzují složení vzduchových bublin v něm. Poměr izotopů kyslíku ^{18}O a ^{16}O v bublinách vzduchu totiž mírně závisí na jeho teplotě, takže lze nepřímou odhadnout, jaká byla teplota vzduchu v minulosti. Obdobně se používá analýza starých pylových zrn, sedimentů v jezerech nebo na mořském dně či izotopové rozbory mořských korálů a karbonátových fosilií. Spolehlivost a přesnost nepřímých dat je samozřejmě nižší než výsledky přímých měření, které známe dnes.

Vývoj teploty planety Země



Obrázek 3: Rekonstrukce průběhu teploty v geologické minulosti Země, nehomogenní časová osa.

Poznámka: Km = Kambrium, O = Ordovik, S = Silur, D = Devon, K = Karbon, P = Perm, Tr = Trias, J = Jura, Kř = Křída, Pal = Paleocén, Eo = Eocén, Ol = Oligocén, Mio = Miocén.
Zdroj: Zachos et al. (2001).

Klima posledního tisíciletí

V klimatu posledního tisíciletí lze rozeznat tři období: středověké teplé období, tzv. malou dobu ledovou v 16. až 19. století a po ní následující období globálního oteplování.

Pokud jde o středověké teplé období, zdá se jeho určení značně nejisté. Teploty tehdy měly být v některých oblastech vyšší než v dalších stoletích, ale ne o více než 1–2 °C, a v měřítku polokoulí nebyly vyšší než ve druhé polovině 20. století. Navíc nové výzkumy naznačují, že toto teplé období nezasáhlo celou planetu zároveň, šlo spíše o sérii lokálních nebo regionálních oteplení, která přicházela

do různých oblastí v různém čase, vzájemně se lišícím až o několik staletí. Například v letech 900–1100 panovaly v severní části Atlantského oceánu poměrně příznivé podmínky (bez nebezpečí mořského ledu), které umožnily Vikingům prozkoumání a osídlení Islandu, jihozápadního Grónska, Labradoru a Newfoundlandu.

Pojem malá doba ledová původně označoval poslední období, kdy se horské ledovce na celém světě rozšířily. Ačkoliv nástup a ústup ledovců bývá nejčastěji spojován s kolísáním teploty vzduchu, jejich změny ovlivňují i různé další meteorologické faktory, např. změny režimu srážek.

Spor o hokejku

Podle klimatologů je současná průměrná teplota na severní polokouli vyšší než kdykoli během posledního tisíciletí. Ale někteří publicisté a politici tvrdí, že jde o omyl. Takže – mají pravdu? Popíšeme tuto diskusi podrobněji. Ilustruje totiž, jak debatu o klimatu ovlivňují různé fámy a neporozumění základním odborným výsledkům.

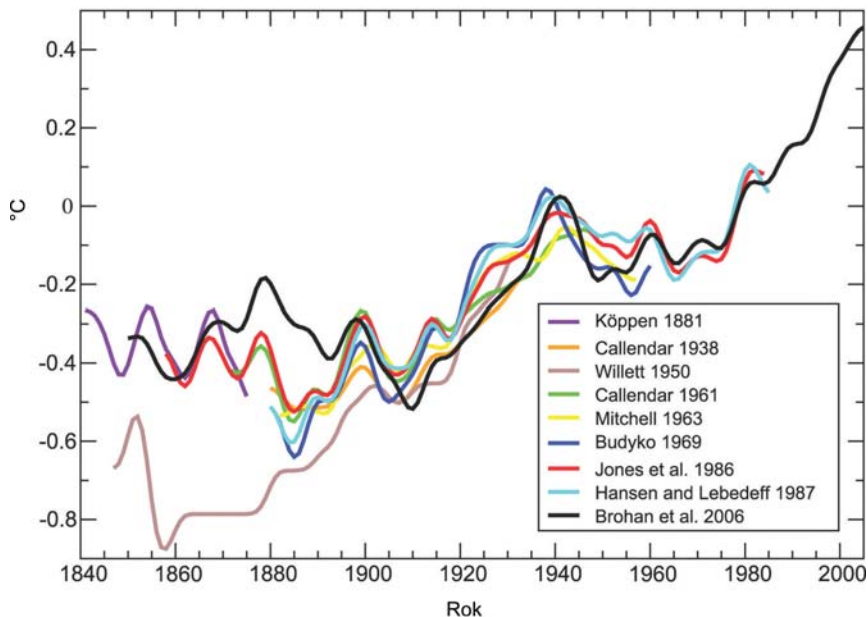
Američtí vědci Mann, Bradley a Hughes v roce 1998 publikovali odbornou studii, kde prezentovali rekonstrukci průměrných teplot severní polokoule od roku 1400. Stejně jako obdobné výzkumy byla založena na analýze nepřímých indikátorů (viz rámeček Indikátory minulého století): letokruhů, vzorků z ledovců, sedimentů a samozřejmě i dlouhých řad přístrojových pozorování. Ukázali, že konec 20. století je nejteplejší za posledních 600 let. Výsledný graf se tvarem poněkud podobá hokejce – teplota nejprve od středověku velmi mírně klesá zhruba do konce 19. století, pak se prudce obrací a následuje výrazné oteplení. Tento jev začal být záhy nazýván „Mannova hokejka“. Krátce nato vyšlo několik dalších studií, které výsledky víceméně potvrdily, a další byly publikovány v následujících letech. Zpráva IPCC z roku 2007 podobných výstupů už cituje více než deset.

Na Mannovu práci po čase reagovali mineralog McIntyre a ekonom McKitrick, kteří v ní údajně našli řadu chyb. Reakci na Mannovu práci, ačkoli se věnuje klimatologii, kupodivu vydali v jednom ekonomickém časopise.

Původně ji chtěli zveřejnit v prestižním časopise Nature, kde vyšla i původní práce Manna a jeho kolegů, v recenzním řízení však byli odmítnuti, protože text obsahoval řadu faktických chyb.

McIntyre a McKitrick nejen kritizovali Manna, ale také „opravili“ jeho rekonstrukci teplot, aby ukázali, že žádná „hokejka“ v průběhu teplot vlastně není a že teploty ve středověku byly vyšší než dnes. Další klimatologové posléze analyzovali práce obou stran. Potvrdili, že Mannova rekonstrukce, i když obsahuje některé problematictější partie, je v zásadě zpracována správně, že se výsledky nemění bez ohledu na použitou metodiku nebo při vynechání některých dílčích zdrojů dat a že v době, pro kterou máme i údaje z přímého měření teploty, skutečné údaje a křivka podle nepřímých indikátorů souhlasí. Naopak v McIntyrově a McKitrickově rekonstrukci našli řadu i zcela zásadních chyb a problémů. Navíc McIntyrova a McKitrickova rekonstrukce končí rokem 1980. Pokud do ní ale doplníme data naměřená po roce 1980, zjistíme, že na počátku 21. století jsou globální průměrné teploty vyšší než hodnoty teplot během středověkého „klimatického optima“ podle McIntyry a McKitricka. Vlastně tím sami potvrdili, že současné teploty jsou nejvyšší za posledních nejméně 600 let. Přesto ji někteří novináři nebo politici dodnes citují a odkazují na ni jako na důkaz, že Mannova práce (a potažmo i ostatní podobné) byla odmítnuta či „diskreditována“.

Časové řady globálních teplot



Obrázek 4: Publikované řady přízemních změn teploty v regionálních měřících.

Poznámka: Köppen (1881) – tropické oblasti a mírné šířky, stanice na pevnině. Callendar (1938) – globální s použitím stanic na pevnině.

Willett (1950) – globální s použitím stanic na pevnině. Callendar (1961) 60° severně až 60° jižně s použitím stanic na pevnině.

Mitchell (1963) – globální s použitím stanic na pevnině. Budyko (1969) – severní polokoule s použitím stanic na pevnině i informací z lodí. Jones et al. (1986 a,b) – globální s použitím stanic na pevnině. Hansen and Lebedeff (1987) – globální s použitím stanic na pevnině.

Brohan et al. (2006) – globální s použitím stanic na pevnině a teplot povrchu oceánu.

Všechny řady byly vyhlazeny stejným způsobem (13bodový filtr) a přepočteny na anomálie vzhledem k období 1961–1990.

Zdroj: Le Treut et al. (2007).

Skleníkové plyny a skleníkový efekt

Atmosféru tvoří směs plynů, jejichž relativní podíly se až do výšky asi 100 kilometrů téměř nemění. Výjimkou je vodní pára, ozon a některé plyny antropogenního původu, jejichž relativní zastoupení ve vzduchu může být naopak prostorově velmi proměnlivé. Většina vodní páry se nachází v troposféře (spodní vrstva atmosféry do výšky cca 10–11 km, v polárních oblastech do cca 8 km, v rovníkových oblastech až do 14 km), většina ozonu v ozonové vrstvě ve výšce kolem 25 km (ale za příznivých podmínek se může tvořit i tzv. přízemní ozon v blízkosti zemského povrchu), plyny antropogenního původu zejména v blízkosti zdrojů. Drtivou většinu vzduchu tvoří čtyři nejvíce zastoupené plyny. Které to jsou, ví každý ze školy: dusík, kyslík, argon a oxid uhličitý.

Tabulka 1: Hlavní čtyři plyny v atmosféře.

Plyn	Chem. značka	% objemu suchého vzduchu
dusík	N ₂	78,0840
kyslík	O ₂	20,9480
argon	Ar	0,9340
oxid uhličitý	CO ₂	0,0379

Zdroj: Netopil R. (1984).

Některé plyny obsažené v atmosféře mají významný vliv na tzv. energetickou bilanci atmosféry. Nazývají se skleníkové plyny. Mají obrovský význam a znatelně ovlivňují chování celého klimatického systému. Kvůli svým fyzikálním vlastnostem totiž na Zemi zadržují energii slunečního záření. Říká se tomu skleníkový efekt.

Nejdůležitějším skleníkovým plynem v atmosféře je vodní pára, která má na přirozeném skleníkovém efektu podíl 36–70 % (bez započtení vlivu oblačnosti). Následuje oxid uhličitý s 9–26 %, metan se 4–9 %, ozon se 3–7 % a oxid dusný.

Proč nemáme přesná čísla? Protože roli jednotlivých skleníkových plynů nejde přesně určit a jejich podíly nelze jednoduše sčítat. Tzv. absorpční pásy – tedy části spektra infračerveného (tepelného) záření, které jednotlivé plyny pohlcují – se totiž často vzájemně překrývají.

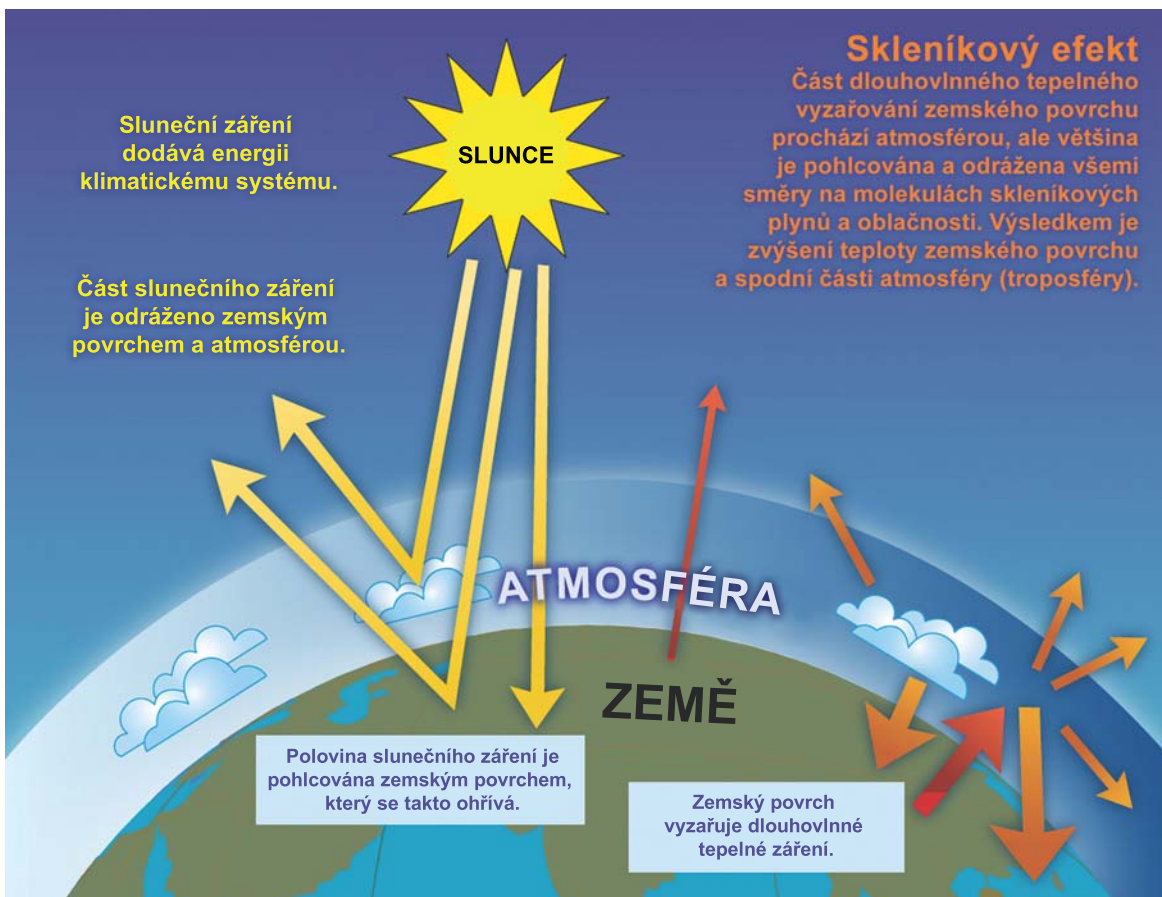
Sluneční záření

Hlavním zdrojem energie pro celý klimatický systém je sluneční záření. Jeho dlouhodobé změny se proto musí projevit změnou chování klimatického systému. Dlouhodobé změny orbitálních parametrů Země v časových měřítcích desetitisíců až statisíců let (Milankovičovy cykly) tak např. zřejmě souvisí s nástupy a konci ledových dob. Avšak klimatický systém má také poměrně velkou setrvačnost, a krátkodobé výkyvy proto výrazně tlumí. Nejsilnější, jedenáctiletý cyklus sluneční aktivity je provázen změnou příkonu slunečního záření jen asi o 0,1 %, projevuje se jen vysoko ve stratosféře, ale u zemského povrchu jsou jeho důsledky skoro neměřitelné. Projevují se spíše dlouhodobé změny solární aktivity.

V první polovině 20. století pozvolně rostla sluneční aktivita. Patrně i kvůli tomu ve stejné době stouply globální průměrné teploty vzduchu asi o 0,3 °C. Od poloviny století solární aktivita stagnuje, ale globální průměrné teploty stouply o dalšího asi 0,5 °C.

Objevují se rovněž teorie o vlivu kosmického záření na podnebí. Podle nich kosmické záření podporuje tvorbu kondenzačních jader, mění tak podmínky pro srážení vodní páry, a tudíž i tvorbu oblačnosti. Protože intenzita kosmického záření úzce souvisí se sluneční aktivitou, která se v posledních asi 50 letech příliš nemění, tato tzv. Svensmarkova teorie by jen sotva mohla vysvětlit aktuální růst teplot. Navíc i ve velmi čistém vzduchu je dost kondenzačních jader, aby na nich mohla zkondenzovat veškerá dostupná voda. Proto jejich přibývání bude mít na oblačnost pravděpodobně jen zcela okrajový vliv.

Horní hranice uvedených intervalů tak odpovídají plynu samotnému, dolní hranice přibližnému podílu, pokud počítáme s překrýváním absorpčních pásů s ostatními skleníkovými plyny. Navíc koncentrace některých plynů se v různých částech světa mění. To je patrné hlavně u vodní páry. Absolutní vlhkost vzduchu v rovníkových oblastech je podstatně vyšší než v polárních oblastech.



Obrázek 5: Zjednodušený model skleníkového efektu.

Zdroj: Le Treut et al. (2007).

Princip skleníkového efektu lze popsat následovně: přibližně 30 % slunečního záření pronikajícího do zemské atmosféry se vrací zpět do kosmu, a to vlivem odrazu od oblačnosti, rozptylu na molekulách vzduchu nebo odrazu od zemského povrchu. Zbýlých cca 70 % je pohlceno povrchem (v malé míře i atmosférou), a to má za následek zvýšení teploty povrchu a částečně i vzduchu. Podle fyzikálních zákonů (Planckův zákon) ale každé těleso, jehož teplota je vyšší než absolutní nula ($-273,15^{\circ}\text{C}$) energii také vyzařuje. To platí i pro zemský povrch, který vyzařuje v infračervené oblasti. Pokud by v atmosféře nebyly přítomny skleníkové plyny, toto záření by odcházelo do kosmu. Ale skleníkové plyny v atmosféře právě toto záření pohlcují a tím dochází k ohřívání vzduchu. Ohřátý vzduch sám o sobě ale také vyzařuje infračervené záření. Vyzařuje všesměrově, to znamená, že polovina záření odchází směrem nahoru (do kosmu nebo může být pohlceno skleníkovými plyny ve vyšších hladinách atmosféry), polovina směrem dolů (a je pohlceno buď v nižších vrstvách atmosféry, nebo povrchem). Vzhledem k možnosti mnohonásobného pohlcení a následného vyzaření infračerveného záření

v atmosféře je matematický popis celého procesu poměrně komplikovaný, celkově ale vede k omezení infračerveného vyzařování ze soustavy Země – atmosféra, a tedy ke zvýšení její teploty.

Bez skleníkových plynů by byla průměrná teplota atmosféry v blízkosti zemského povrchu asi o 33°C nižší, než je dnes. Země by pravděpodobně nebyla vhodná pro život, jak ho známe, byla by pokryta sněhem a ledem od pólů až k rovníku. Tím ale význam těchto plynů nekončí. Energie, kterou zadržují, se totiž může projevovat nejen jako teplota vzduchu. Přirozeně ovlivňuje také pohyb (proudění) vzduchu, potenciální energii (vertikální stabilita vzduchové hmoty) nebo kondenzaci vodní páry, vypařování, mrznutí nebo tání vody.

Že zvýšení koncentrací skleníkových plynů vede ke zvýšení teploty, je známo už od 19. století. Je to poměrně jednoduchý důsledek Planckova a Stefan–Boltzmannova zákona (popisuje vyzařování těles s teplotou vyšší než absolutní nula), tzv. absorpčních spekter skleníkových plynů v infračervené

oblasti (proměřených laboratorně) a zákona zachování energie. Jako první ho podrobněji zkoumal švédský fyzik Svante Arrhenius už na konci 19. století. Ten také jako první upozornil na to, že antropogenní emise oxidu uhličitého mohou způsobit růst teplot atmosféry. Jeho odhady „účinnosti“ CO₂ při tomto procesu se později ukázaly být mírně nadhodnocené, ale i tak byly na svou dobu poměrně dobré.

Často (a zcela zbytečně) jsou dávány do vzájemného protikladu dvě protichůdná tvrzení: je růst globální průměrné teploty důsledkem, nebo příčinou rostoucích koncentrací skleníkových plynů? Pravdivé jsou obě. Zvýšení teploty vzduchu jako následek zvýšení koncentrací skleníkových plynů logicky vyplývá z některých základních fyzikálních zákonů. Opak, totiž že zvýšení teploty vzduchu může zvýšit koncentraci skleníkových plynů, zase vychází ze schopnosti vody absorbovat plyny, která klesá s rostoucí teplotou. Oteplení oceánu by tedy snížilo absorpci oxidu uhličitého (a dalších plynů) v mořích, případně i vedlo k jejich uvolňování. Rovněž odtávání permafrostu (věčně zmrzlé půdy) je doprovázeno uvolňováním skleníkových plynů, hlavně CO₂ a metanu.

Skleníkový efekt má navíc pozitivní zpětnou vazbu právě na vodní páru. Samozřejmě čím vyšší teplota, tím vyšší je i výpar,

Tabulka 2: Hlavní skleníkové plyny (bez vodní páry), jejich koncentrace v roce 2005 a změna jejich radiačního působení ve srovnání s dobou před průmyslovou revolucí.

Plyn	Koncentrace		Radiační vliv	
	Rok 2005		Rok 2005 [W/m ²] vzhledem k roku 1750	
oxid uhličitý	379 ± 0,65 ppm	+13 ppm	1,66	+13
metan	1774 ± 1,8 ppb	+11 ppb	0,48	0
oxid dusný	319 ± 0,12 ppb			
	+5 ppb	0,16	+11	
	dále v ppt	dále v ppt		
CFC-11	251 ± 0,36	-13	0,063	-5
CFC-12	538 ± 0,18	+4	0,17	+1
CFC-113	79 ± 0,064	-4	0,024	-5
HCFC-22	169 ± 1,0	+38	0,033	+29
HCFC-141b	18 ± 0,068	+9	0,0025	+93
HCFC-142b	15 ± 0,13	+6	0,0031	+57
CH ₃ CCl ₃	19 ± 0,47	-47	0,0011	-72
CCl ₄	93 ± 0,17	-7	0,012	-7
HFC-125	3,7 ± 0,10	+2,6	0,0009	+234
HFC-134a	35 ± 0,73	+27	0,0055	+349
HFC-152a	3,9 ± 0,11	+2,4	0,0004	+151
HFC-23	18 ± 0,12	+4	0,0033	+29
SF ₆	5,6 ± 0,038	+1,5	0,0029	+36
CF ₄ (PFC-14)	74 ± 1,6	-	0,0034	-
C ₂ F ₆ (PFC-116)	2,9 ± 0,025	+0,5	0,0008	+22

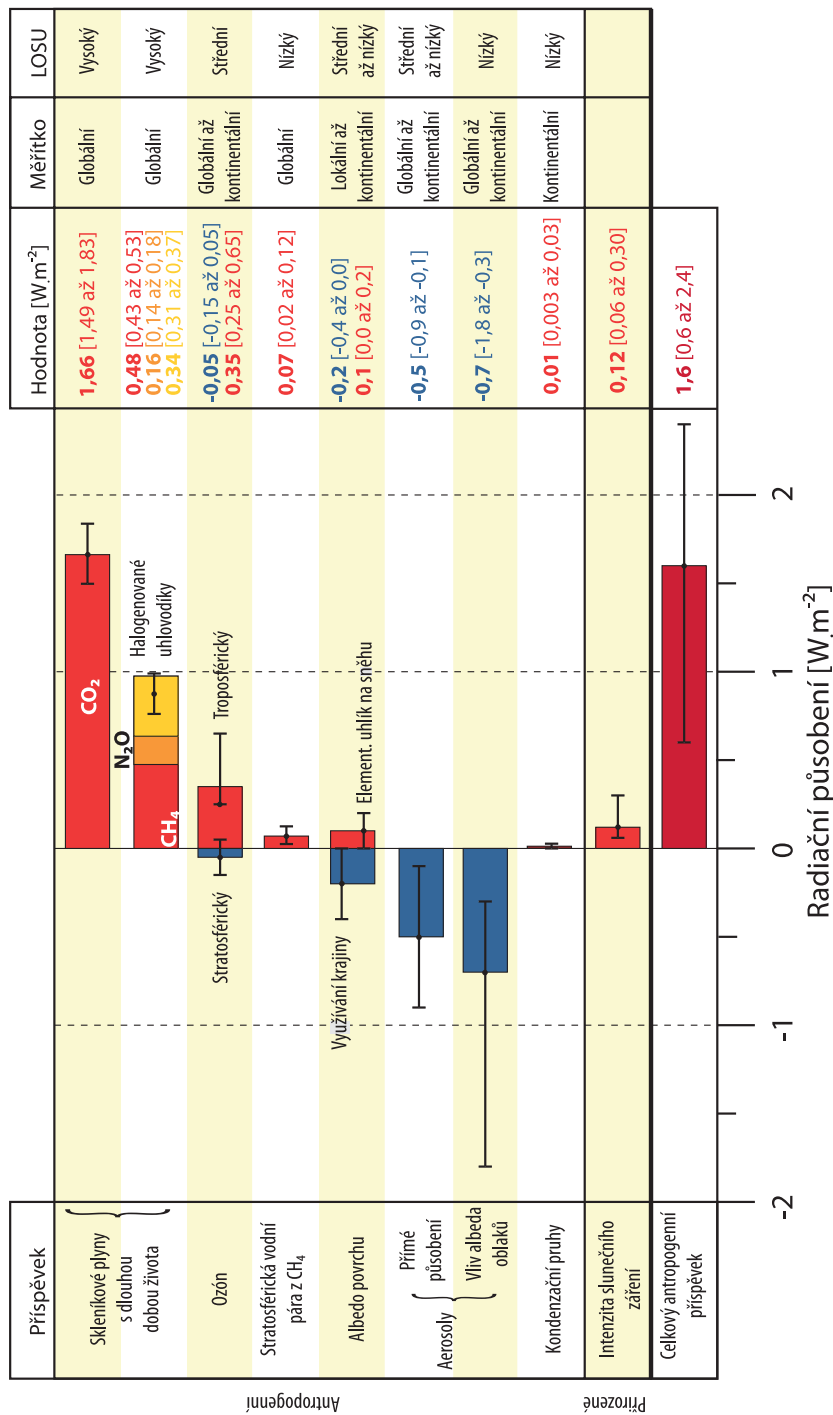
Poznámka: ppm = parts per million (1 molekula v milionu molekul vzduchu), ppb = parts per billion (1 molekula v miliardě molekul vzduchu), ppt = parts per trillion (1 molekula v trilionu molekul vzduchu). Zdroj: Forster et al. (2007).

tudíž také obsah vodní páry v atmosféře, a tedy i silnější skleníkový efekt – a to následně vede k dalšímu zvyšování teploty. Nelinearita této vazby a existence dalších, negativních zpětných vazeb ale zajišťují, že se teplota na Zemi při tomto procesu nemůže zvyšovat lavinovitě a nemůže samovolně narůst na libovolně vysoké hodnoty. Vodní pára zde funguje jako zesilovač vlivu ostatních skleníkových plynů.

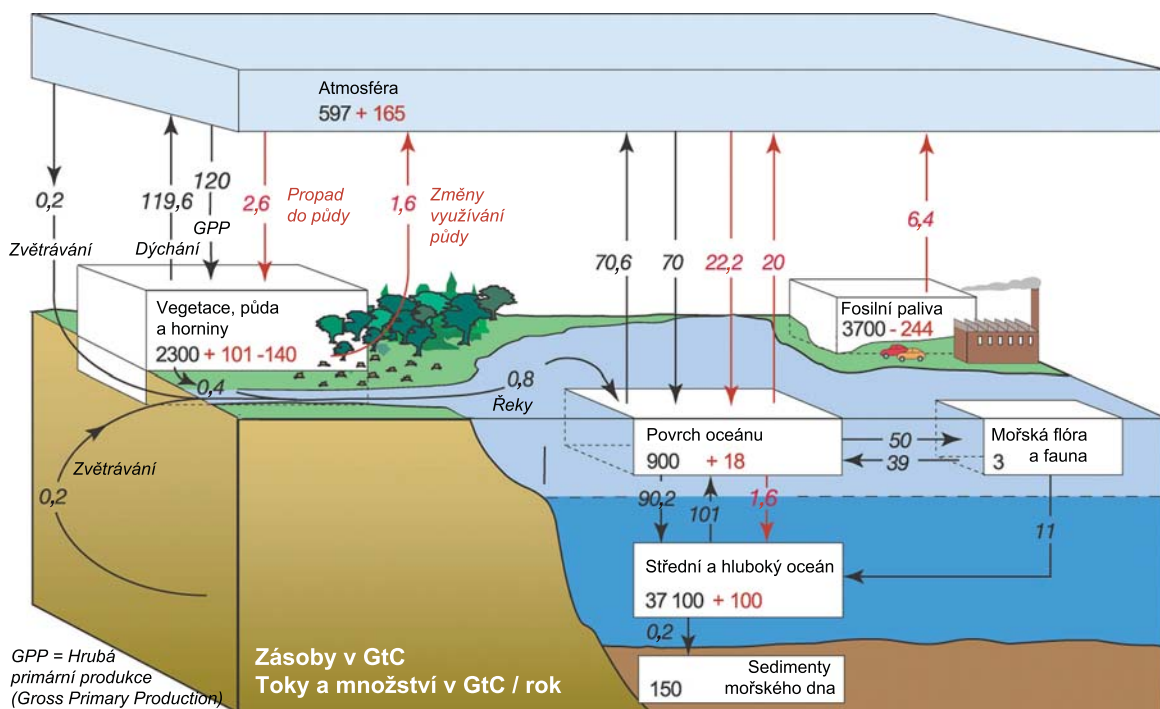
Pokud by zemská atmosféra měla všude stejnou hustotu jako u mořské hladiny, její tloušťka by činila asi 8 kilometrů. Kdybychom v ní navíc oddělili jednotlivé plyny a rozdělili je do vrstev, oxid uhličitý z toho bude zabírat všeho všudy asi 3 metry. Nabízí se proto otázka, jak to, že taková troška může rozhodovat o globálním podnebí?

Míra vlivu různých skleníkových plynů na chování atmosféry závisí na dvou věcech: na jejich množství a fyzikálních vlastnostech. Čím více je plyn radiačně účinný (tj. čím více ovlivňuje energetickou bilanci atmosféry v přepočtu na jednotku hmotnosti), tím menší množství stačí k ovlivnění procesu v atmosféře. Ostatně vrstvička stratosférického ozonu by za uvedených podmínek byla silná jen kolem 3 milimetrů, tedy tisíckrát tenčí než vrstva CO₂, přesto do značné míry rozhoduje o teplotních poměrech ve stratosféře.

Příspěvky k radiálnímu působení



Obrázek 6: Globální průměr odhadů radiálního působení a rozsahy neurčitosti v roce 2005 pro antropogenní oxid uhlíčitý (CO₂), metan (CH₄), oxid dusný (N₂O) a další důležité činitele a mechanismy, doplněný typickým geografickým rozsahem působení a odhadovaným stupněm vědeckého pochopení (LOSU, Level of scientific understanding).
Zdroj: IPCC SPM (2007).



Obrázek 7: Globální koloběh uhlíku v roce 1990, zobrazující hlavní roční toky uhlíku v GtC/rok.
Zdroj: Denman et al. (2007).

Koloběh a přibývání skleníkových plynů

Řada skleníkových plynů je přirozenou součástí atmosféry (vodní pára, oxid uhličitý, metan, ozon), některé jsou pouze syntetického původu (freony). Nicméně člověk svou činností mění i koncentraci některých přirozených skleníkových plynů, zejména oxidu uhličitého, metanu, ozonu.

Koloběh skleníkových plynů

Některé významné skleníkové plyny, zejména pak oxid uhličitý a metan, jsou součástí přirozených procesů, které na Zemi probíhají. Koloběh těchto plynů tvoří součást tzv. globálního uhlíkového cyklu.

Uhlík permanentně proudí mezi rezervoáry v oceánu (jako ve vodě rozpuštěný oxid uhličitý a také v malých organismech –

Největším rezervoárem uhlíku je hluboký oceán, který obsahuje kolem 37 000 gigatun (miliard tun) uhlíku (GtC). Na zemském povrchu, převážně v živých organismech, je kolem 2 300 GtC uhlíku, dalších 750 GtC v atmosféře a asi 900 GtC ve vrchních vrstvách oceánu.

planktonu), na zemi (kde je obsažen nejčastěji v živých organismech) a v atmosféře (zde se objevuje nejčastěji právě ve formě oxidu uhličitého a metanu).

Atmosféra, svrchní vrstvy oceánu, biosféra a půda jsou velice úzce propojeny. Vzájemně si vyměňují obrovská množství uhlíku. Oceán pohlcuje mnoho uhlíku hlavně v oblastech s chladnou vodou a naopak uhlík uvolňuje v tropech. Výměna s hlubokými vrstvami oceánu je slabší a pomalejší, takže zde se změny projevují v měřítcích několika staletí.

Fotosyntéza rostlin odstraňuje oxid uhličitý (a tím i uhlík) z atmosféry a ukládá ho do vegetace. Dýchání živočichů naopak uvolňuje uhlík zpět do vzduchu.

Přirozené toky uhlíku mají mnohem větší objem než emise (množství uměle vypouštěné do atmosféry) z průmyslu nebo dopravy. Jsou však dlouhodobě velmi dobře vyrovnané, takže množství uhlíku, které se za rok dostane do atmosféry přirozenými procesy, je přibližně stejné jako množství uhlíku přirozenými procesy odstraněné. Za této situace ale může i poměrně malý (například průmyslový) příspěvek ke zdrojům vést k dlouhodobému systematickému zvyšování koncentrací skleníkových plynů v atmosféře.

Antropogenní (umělé) zdroje oxidu uhličitého však už dnes odpovídají asi 10 % toku oxidu uhličitého z oceánu do atmosféry (nebo z atmosféry do oceánu) a jsou asi 20x větší než přirozený tok uhlíku zpět do fosilních rezervoárů. Nejsou tedy zanedbatelné oproti přírodním procesům.

Emise skleníkových plynů

Průmyslová revoluce přirozený koloběh uhlíku narušila, protože do ovzduší začala dodávat velká množství oxidu uhličitého a dalších skleníkových plynů.

Největším antropogenním zdrojem skleníkových plynů je bezesporu spalování fosilních paliv: uhlí, ropy a zemního plynu. Uhlík, který byl před mnoha miliony let uložen do rezervoárů fosilního uhlíku pod zem (a tím i mimo uhlíkový cyklus), se velmi rychle vrací do oběhu v emisích oxidu uhličitého. Postupně tak roste množství uhlíku ve vzduchu (a potažmo v uhlíkovém cyklu).

Největší podíl na antropogenních emisích oxidu uhličitého ze spalování mají uhlí (40 %) a ropa (také asi 40 %). Zbýlých zhruba 20 % připadá na zemní plyn. Vydatným zdrojem oxidu uhličitého je i výroba cementu a odlesňování (snižuje se množství uhlíku zachyceného ve vegetaci).

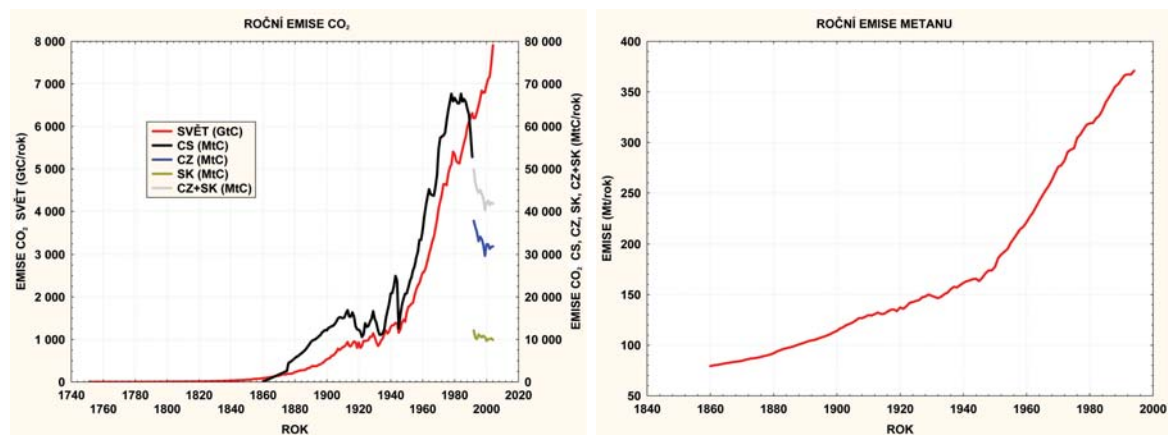
Další zdroje skleníkových plynů vznikají při chovu dobytka a pěstování rýže (emise metanu) i jinde. Ty ale nepatří ke zdrojům v pravém slova smyslu, protože jen ovlivňují intenzitu toků uhlíku uvnitř uhlíkového cyklu, ale nepřidávají do něj žádný další (fosilní) uhlík. Přispívají k přerozdělení uhlíku v celém uhlíkovém cyklu a ovlivněním toků uhlíku mohou přispět i ke změně koncentrací oxidu uhličitého a metanu v atmosféře.

V roce 1990 přidala lidská činnost ročně do atmosféry asi 5,4 miliardy tun uhlíku, který byl doposud uložen v geologických vrstvách (fosilní paliva, vápenec), a nebyl tedy součástí přírodního koloběhu, a 1,7 miliardy tun vlivem změny využití půdy (například úbytek lesů v důsledku vypalování). Antropogenní příspěvek CO_2 celkově rychle stoupá, v roce 2008 byl už kolem 8 miliard tun. Část z toho je pohlcena do půdy a oceánů. Čistý roční přírůstek atmosférického uhlíku činí přibližně 3,5 miliardy tun.

Rostoucí koncentrace skleníkových plynů

Kolik skleníkových plynů ve vzduchu přibývá vlivem činnosti člověka, vědci především vypočítávají z každoroční spotřeby fosilních paliv. Spálení jedné tuny uhlí, ropy nebo zemního plynu totiž vytvoří určité množství emisí, které lze odvodit z chemických rovnic. Avšak zároveň potřebujeme vědět, jaké byly koncentrace v dávné minulosti, abychom je mohli srovnávat se současnými trendy.

Koncentrace CO_2 v atmosféře se systematicky přímo měří jen asi 50 let, metan dokonce ještě kratší dobu. Tak krátké řady samozřejmě neumožňují zkoumat vývoj koncentrací plynů během řádově staletí. Naštěstí existuje způsob, jak získat informace o koncentracích různých plynů ve vzduchu i ze starší doby. Tyto metody jsou (podobně jako zkoumání prehistorických teplot) založeny na analýze vzorků z bublin ve vzduchu, které se zachovaly v ledu odebraném z ledovců v Antarktidě a Grónsku. Vědci vrtají do hloubky a vrstvu po vrstvě získávají starší a starší led, se kterým dostanou také bublinky staršího a staršího vzduchu. Tak se můžeme dozvědět, jaké byly koncentrace oxidu uhličitého až před 800 tisíci lety.



Obrázek 8: Roční emise CO_2 a metanu.
Zdroj: data CDIAC, graf ČHMÚ.

Výsledky z Antarktidy a Grónska se celkem shodují. V dobách ledových se koncentrace oxidu uhličitého pohybovala většinou mezi 180–210 ppm, zatímco v tzv. dobách meziledových většinou od 280 do 300 ppm.

Současné koncentrace (rok 2008) dosahují hodnot kolem 385 ppm. Jsou tedy výrazně vyšší než hodnoty v dobách ledových a meziledových, které vědci zjistili analýzou ledovcových vrtů. Ale čím starší ledovcové vzorky, tím horší je jejich časové rozlišení. Proto staré výsledky ukazují spíše střední úroveň koncentrací za několikatisíciletá období a nemohou dobře postihnout krátkodobé výkyvy v měřítku desítek nebo stovek let. I tak lze ale říci, že dnešní koncentrace oxidu uhličitého jsou přinejmenším neobvykle vysoké ve srovnání s obdobím posledního alespoň půl milionu let.

Pro ještě delší časové úseky vědci používají chemické a fyzikální analýzy usazenin (zpravidla z mořského dna) nebo počítají množství průdchů ve zkamenělých listech rostlin. Lze tak dělat odhady až kolem 500 milionů let nazpět. Jejich přesnost a časové rozlišení jsou však výrazně horší než např. data, která získáváme z vrtů v ledovcích. Naznačují ale, že v dávné minulosti kolísaly koncentrace oxidu uhličitého výrazněji než v posledních několika statisících let. V některých obdobích dosahovaly i několika tisíc ppm. Oproti tomu emise metanu byly vždy více závislé na rozvoji zemědělství. Vyvíjely se tedy rovnoměrněji, i když i v tomto případě je ve druhé polovině 20. století patrné zrychlení růstu emisí.

S přibýváním skleníkových plynů ve vzduchu se samozřejmě zvětšuje také jejich působení na klimatický systém. Nicméně tato změna není jediným způsobem, jak lidé ovlivňují podnebí. Ke skleníkovým plynům se přidávají také další faktory: úbytek ozonu ve stratosféře (zapříčiněný produkcí freonů), přibývání přízemního ozonu (chemické znečištění vzduchu může napomáhat tvorbě tzv. fotochemického smogu, zejména ve velkých městech a v létě), změny albeda (odrazivosti) zemského povrchu způsobené rozvojem zemědělství, ubýváním lesů a usazováním sazí na sněhu, přibývání aerosolů (oxid siřičitý, prach a další) ve vzduchu nebo kondenzační pásy za letadly.

Vliv různých faktorů, které ovlivňují radiační bilanci, a pro srovnání také účinek výkyvů sluneční aktivity uvádí obrázek 6.

Projekce změn klimatu

Pokud skleníkové plyny způsobují zvyšování teploty vzduchu a pokud skleníkových plynů přibývá, přirozeně by se měla také měnit teplota. Klimatologové dovedou odhadovat možnosti budoucího vývoje klimatického systému. Používají k tomu počítačové modely klimatu.

Nejde tu, jak si mnozí myslí, o statistické výpočty, které vezmou měření v minulosti a extrapolují je do budoucnosti.

Klimatické modely jsou dynamické a fyzikální a jsou založeny na základních a dobře prověřených fyzikálních principech. Globální klimatické modely pracují v současné době s rozlišením kolem 150–300 kilometrů. Pro některá místa – zejména v oblastech se složitějším terénem nebo s velmi různorodým povrchem – je ale takové rozlišení příliš hrubé. Tady se používají tzv. regionální modely, které nepočítají vývoj atmosféry na celé Zemi, ale pouze v určité omezené oblasti. Jako vstupy na okrajích své výpočetní oblasti však používají údaje z globálního modelu. Regionální modely běžně dosahují rozlišení kolem 25–50 kilometrů, úspěšně se ale vyvíjejí i regionální modely s přesností asi 10 kilometrů. Výpočty navíc probíhají většinou v několika desítkách hladin atmosféry, od povrchu až po hladiny ležící ve výšce mnoha desítek kilometrů. Takový klimatický model je velice složitý, proto se k jeho propočítávání používají výkonné počítače.

K čemu je dobrý ansámbl

Klimatologové samozřejmě dobře vědí, že žádný model není dokonalý, nepopisuje svět úplně a zcela přesně. Každý model je jen přiblížením se realitě. Proto se vědci v zásadních věcech nespolehají na žádný jednotlivý model. Za dostatečně průkazné považují pouze výsledky, které potvrdilo několik na sobě nezávislých modelů. Stále častěji se používá postup, při kterém vědci využívají výsledků několika modelů zároveň – tzv. ansámbl modelů. Rozdíly mezi modelovými výstupy nám totiž řeknou, jaký je rozptyl výsledků jednotlivých modelů. Navíc odborníci zjistili, že když spočtou průměr z výstupů celého ansámblu, dostávají často výsledky, které jsou blíže skutečnosti než každý jednotlivý model samostatně.

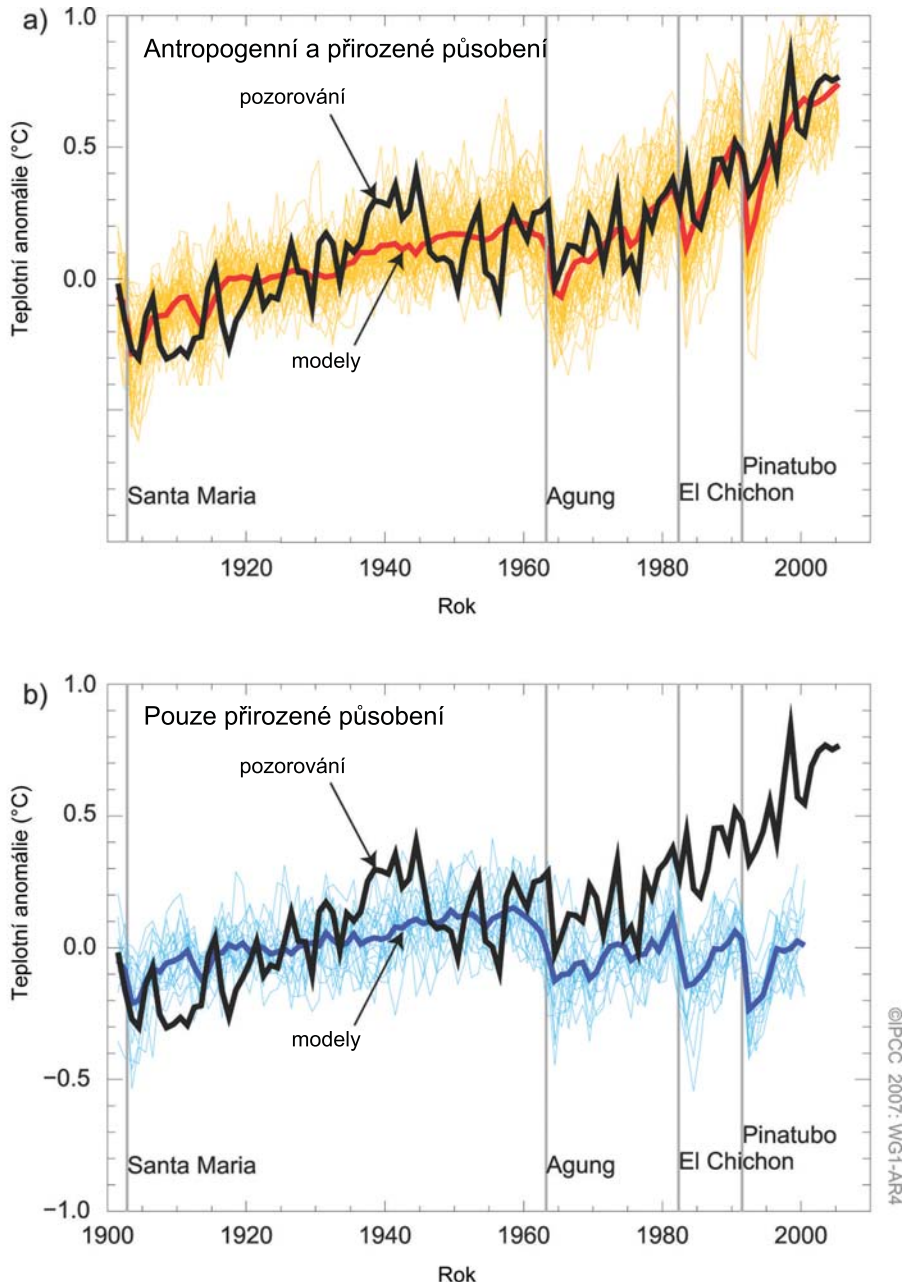
Validace modelů

Každý model se validuje. Je to vlastně prověření, zda dobře popisuje klima, jestli jsou v něm správně zachyceny všechny důležité vazby i toky, tedy zda model poskytuje reálné výsledky. Dělá se to porovnáním jeho výsledků s naměřenými daty. Jednoduše řečeno – model vypočítá klimatické charakteristiky pro určité období v minulosti a vědci pak výsledky porovnávají s hodnotami ze skutečných měření ve stejném období. Validace se většinou provádějí na datech z 20. století, protože z tohoto období máme k dispozici dostatek měření z celého světa a v poměrně husté síti bodů. Abychom např. mohli prověřit správnost regionálního modelu, který počítá klima s rozlišením 25 kilometrů, potřebujeme také naměřená meteorologická data v přibližně stejné husté síti bodů. Prověřuje se řada charakteristik, od průměrných teplot a srážkových úhrnů přes jejich roční chody, dlouhodobé trendy až po speciálnější charakteristiky, jako např. zastoupení jednotlivých cirkulačních typů.

Klimatický systém samozřejmě není jen atmosféra. Tvoří jej rovněž oceány, biosféra nebo sněhový a ledový povrch a také litosféra. Klimatické modely proto kromě dílčího modelu atmosféry zahrnují také model oceánu, biosféry a kryosféry (led a sníh) a popisují i fyzikální vazby mezi nimi.

Jak klima reaguje na přibývání skleníkových plynů

Reakci klimatu na změnu koncentrace skleníkových plynů poměrně jednoduše popisuje parametr zvaný citlivost klimatu. Je to nárůst globální průměrné teploty, ke kterému



Obrázek 9: Srovnání odchylek globální přízemní teploty (°C) – pozorovaných (černá) s modelovou simulací AOGCM (atmosféricko-oceánický globální cirkulační model) zesílenou (a) antropogenním i přirozeným působením skleníkových plynů a (b) pouze přirozeným působením. Teplotní odchylky jsou vypočteny od průměru za období 1901-1950. Zdroj: Hegerl et al. (2007).

by došlo, pokud koncentrace oxidu uhličitého ve vzduchu stoupne na dvojnásobek. Poslední výzkumy (shrnuté ve čtvrté zprávě IPCC) zjistily, že s více než 66% pravděpodobností hodnota leží v intervalu od 2 do 4,5°C a střední odhad je kolem 3°C. Přitom je velmi nepravděpodobné (pravděpodobnost menší než 10 %), že by byla nižší než 1,5°C. Nelze vyloučit možnost, že by senzitivita klimatu byla více než 4,5°C, ale modelové výpočty pro tyto hodnoty senzitivity vykazují horší shodu modelových výstupů s napozorovanými hodnotami.

Emisní scénáře

Klimatické modely propočítávají možný budoucí vývoj klimatu. Výsledky samozřejmě závisejí na jednom z klíčových vstupních údajů: budoucí koncentraci skleníkových plynů,

potažmo jejich emisích. Potřebujeme proto vědět, nejen že skleníkové plyny budou přibývat, ale také jakou rychlostí se tak bude dít.

Koncentrace skleníkových plynů však budou silně záviset především na dalším ekonomickém, technologickém a také politickém vývoji, tedy na okolnostech, které klimatologie popisovat nemůže. Proto se do klimatických modelů vkládají různé scénáře vývoje koncentrací skleníkových plynů v příštích desetiletích, které závisejí na technologických trendech, vývoji ekonomiky, počtu lidí na Zemi i politických změnách. Tyto scénáře nelze chápat přímo jako předpovědi dalšího vývoje, spíše jako eventuality. Spektrum těchto scénářů by mělo pokrývat všechny reálné možnosti dalšího vývoje, od pesimistických až k optimistickým.

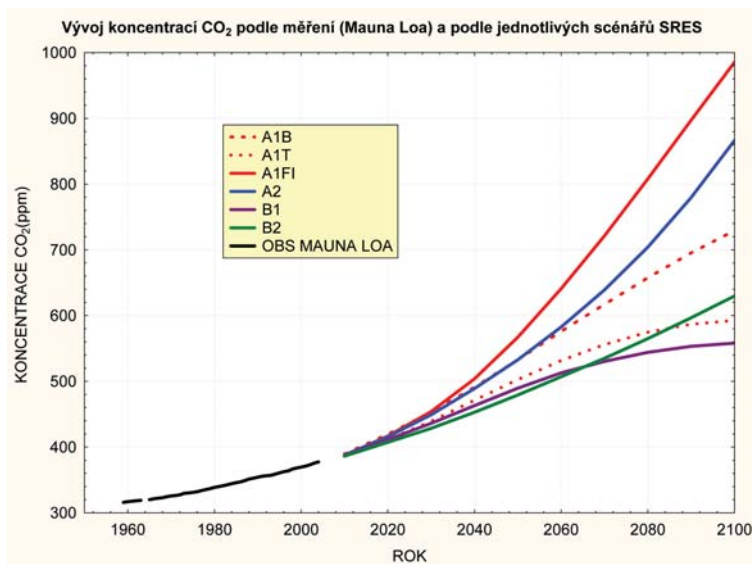
Tabulka 3: Přehled scénářů SRES včetně variant ekonomického, politického a společenského vývoje.

Scénář	Ekonomický růst	Populace	Technologický pokrok	Globálnost/lokálnost vývoje
A1	Rychlý	9 miliard v roce 2050, pak postupný pokles	Rychlý rozvoj nových technologií	Konvergentní svět, příjmy a způsob života se vyrovnávají, velká kulturní a sociální interakce mezi různými částmi světa
<i>Varianta A1FI (Fossil Intensive)</i>		<i>Důraz na spalování fosilních paliv</i>		
<i>Varianta A1B (Balanced)</i>		<i>Vyvážený důraz na různé energetické zdroje</i>		
<i>Varianta A1T (Technological)</i>		<i>Důraz na nefosilní zdroje energie</i>		
A2	Pomalejší	Postupně rostoucí	Pomalejší	Regionálně orientovaný, nízké tempo globalizace
B1	Rychlý (jako A1)	Jako A1	Důraz na ekologická řešení	Globální řešení problémů
B2	Střední	Postupně rostoucí, ale pomaleji než v A2	Střední, důraz na ekologická řešení	Regionálně orientovaný

Zdroj: Nakicenovic et al. (2000) a Solomon et al. (2007).

Koncentrace skleníkových plynů jsou pro odhad vývoje klimatického systému ještě důležitější než samotné emise. Žádný ze scénářů, ani ty, které předpokládají poměrně výrazný pokles emisí oxidu uhličitého v průběhu 21. století, by ale v tomto období ještě nevedl k jeho ubývání v atmosféře. Oxid uhličitý totiž v ovzduší zůstává průměrně asi 100 let, takže pokles jeho koncentrací nutně přijde se znatelným časovým zpožděním a bude poměrně pomalý.

Prakticky všechny scénáře indikují pro první čtvrtinu 21. století podobný růst koncentrací oxidu uhličitého. Křivky se začínají výrazně vzájemně odchylovat až ve druhé polovině století. Nepřesnost odhadu budoucích koncentrací oxidu uhličitého je kolem 10 %, podle konkrétně použitého modelu uhlíkového cyklu.



Obrázek 10: Vývoj koncentrací CO₂ podle jednotlivých scénářů SRES v porovnání s naměřenými daty z Mauna Loa. Zdroj: data – Nakicenovic et al. (2000), CDIAC. Graf – ČHMÚ.

Velikost klimatických změn

Přibývající koncentrace skleníkových plynů evidentně povedou ke změnám celého klimatického systému. Jakým konkrétně, na to dávají odpověď modely klimatu.

Odpovědi různých modelů se vzájemně poněkud liší. Tyto odlišnosti nám umožňují rozeznat, jak dalece výsledky závisí na konkrétním modelu a naopak, které výsledky jsou obecněji platné (ty jsou typické pro více modelů nebo dokonce pro všechny modely). Nicméně důsledkem je, že pro každý konkrétní trend emisí dostaneme řadu projekcí podnebí. Získáváme tedy vždy určité rozpětí výsledků, nikoli jednu jedinou hodnotu. Tu ostatně z žádného modelu ani získat nelze.

Tabulka 4 shrnuje projekce změn teploty během 21. století, které z klimatických modelů vycházejí při různých emisních

scénářích. Velikost předpokládaných změn roční globální průměrné teploty pro období 2090–2099 (vzhledem ke stavu za období 1980–1999) jsou v následující tabulce. Pro srovnání je uveden i scénář, který předpokládá, že po celé století bude v ovzduší pořád stejná koncentrace skleníkových plynů jako v roce 2000, tj. že jich přestane přibývat.

Dolní odhad představuje přibližně 15% kvantil a horní odhad přibližně 85% kvantil předpokládaného statistického rozdělení. Srozumitelněji řečeno: je asi 15% pravděpodobnost, že růst teplot při dané velikosti emisí bude menší než dolní odhad, a rovněž 15% pravděpodobnost, že bude větší než horní odhad.

Pravděpodobnost, že skutečný růst teploty bude v intervalu mezi dolním a horním odhadem, tedy v každém emisním scénáři, činí asi 70 %.

Tabulka 4: Projekce předpokládané průměrné roční globální teploty v posledním desetiletí 21. století ve srovnání s roky 1980–1999 při různých emisních scénářích.

Scénář	Střední odhad	Dolní odhad	Horní odhad
A1FI	+4,0	+2,4	+6,4
A1B	+2,8	+1,7	+4,4
A1T	+2,4	+1,4	+3,8
A2	+3,4	+2,0	+5,4
B1	+1,8	+1,1	+2,9
B2	+2,4	+1,4	+3,8
Konstantní emise	+0,6	+0,3	+0,9

Zdroj: IPCC SPM (2007).

Růst teplot ve scénářích s vysokými emisemi (např. A1FI) se vůbec nepřekrývá s výsledky z optimističtějších scénářů (např. B1). Z toho vyplývá, že vývoj globálních teplot, zejména ve druhé polovině 21. století, bude silně záviset na hodnotách emisí.

Změny klimatu při určitém zvýšení koncentrace skleníkových plynů však nemusejí být (a nebudou) stejné na všech místech na Zemi. Obecně oteplení bude nad pevninou větší než nad oceány. To je dáno především tím, že oceán má ve srovnání s pevninou daleko větší tepelnou kapacitu, a je tedy schopen pojmout mnohem více tepla. Navíc v oceánu je hodně vody k odpařování a výpar vody také spotřebovává teplo, které je následně ve formě tzv. latentního tepla odváděno do vyšších vrstev atmosféry. A zároveň se teplá povrchová voda promíchává s chladnějšími hlubšími vrstvami oceánu. Podobně ve vyšších zeměpisných šířkách je předpokládané oteplení větší než v tropech a subtropích. I to má svůj důvod. V chladném polárním vzduchu je obsaženo poměrně málo vodní páry (dominantní plyn skleníkového efektu), takže se tu relativně více projeví rostoucí koncentrace ostatních skleníkových plynů, zejména oxidu uhličitého. Oproti tomu na rovníku je přirozený obsah vodní páry ve vzduchu velmi vysoký, takže zvýšení koncentrace dalších skleníkových plynů nezpůsobí tak velké zvýšení skleníkového efektu a tedy ani teploty.

Srážky

Zesílení skleníkového efektu by neznamenal pouze zvýšení teploty. Modely naznačují i další možné dopady: změnu rozložení srážek na Zemi i změny během roku, změny v četnosti a intenzitě extrémních projevů počasí apod.

Tabulka 5: Pravděpodobné změny srážkové činnosti.

Typická změna srážek	Oblast
Více srážek	Severní Evropa, Arktida (zima), Kanada, severovýchod USA, severní Asie (zima), Tibet, tropická a východní Afrika, sever Pacifiku a Indického oceánu, rovníkový Pacifik, Antarktida, severní, jižní, jihovýchodní a východní Asie (léto), střední Evropa (zima)
Méně srážek	Středomoří, severní Afrika, Střední Amerika, jihozápad USA, jižní Austrálie (zima a jaro), jihozápad Austrálie (zima), střední Evropa (léto), střední Asie (léto), jižní Kanada (léto)
Nárůst extrémních srážek (povodní)	Severní Evropa, jižní a východní Asie, Austrálie
Nárůst rizika sucha	Austrálie, Středomoří, střední Evropa (léto), Střední Amerika
Pokles délky období se sněhovou pokrývkou	Většina Evropy a Severní Ameriky

Zdroj: Christensen et al. (2007).

Rozdíly mezi částmi zeměkoule

Vedle růstu globální průměrné teploty můžeme modelovat také změny v jednotlivých částech zeměkoule. Největší vzestupy teploty jsou indikovány v severních polárních oblastech. Pro scénář B1 vychází globální růst teploty o 1–2°C, ale v Arktidě by to měly být 3–5°C. Horší scénář (vyšší emise) A2 vychází mezi 2°C a přibližně 3,5°C v globální teplotě, ale 6–8°C kolem Severního pólu). Nejmenší změny vycházejí v oceánech: v severním Atlantiku jižně od Grónska a v oblasti antarktického cirkumpolárního proudu (do 1°C pro scénář B1 nebo o 1–2°C pro scénář A2). Ve střední Evropě bychom museli očekávat oteplení o přibližně 2–3°C při emisích podle scénáře B1 či 4–5°C podle scénáře A2.

Nejvýznamnější důsledky nastanou, pokud se několik takových vlivů vzájemně zkombinuje. Například jedním z hlavních rizik pro střední Evropu je přibývání četnosti a intenzity suchých období, hlavně v létě a počátkem podzimu. Pravděpodobně by to mělo hned několik spolupůsobících příčin. Jednou z nich je úbytek sněhu, a tedy horší doplňování zásob podzemní vody při jarním tání. Navíc na jaře vlivem vyšších teplot začne vegetační období dříve a bude intenzivnější, což povede k silnějšímu odpařování (a rychlejší spotřebě půdní vlhkosti rostlinami). Posléze se přidají nižší letní srážky a na jaře i v létě vyšší výpar z půdy vinou vyšších teplot. Konečný důsledek: snížení průměrné zásoby vody v půdě koncem léta a počátkem podzimu až zhruba na polovinu dnešních hodnot. To by pochopitelně mělo velké důsledky zejména v zemědělství a vodním hospodářství. Ubývání srážek by samozřejmě bylo velkým

problémem v oblastech, které už nyní mají vážný nedostatek vody. Patří mezi ně především některé části Afriky nebo Asie, ale i další části světa.

Dalším důsledkem klimatických změn by mohl být nárůst četnosti výskytu a intenzity extrémních projevů počasí, které způsobují velké škody, někdy i ohrožují zdraví či životy lidí: víchřice, extrémně intenzivní či dlouhotrvající srážky a povodně, silné mrazy, dlouhá období bez srážek, extrémně vysoké teploty apod.

Růst globálních průměrných teplot, který by bylo možné čekat v důsledku přibývání skleníkových plynů během 21. století, tedy s velkou pravděpodobností přesahuje zamenané změny klimatu v průběhu posledního tisíciletí. Tento růst je ale nižší než pravidelné výkyvy, k nimž docházelo během čtvrtohor. Nicméně závažná je především velká rychlost současných změn.

Důsledky změn klimatu

Klima a jeho kolísání ovlivňuje lidi i ekonomiku. Větší výkyvy přirozeně přinášejí i horší důsledky. Právě proto vědci varují, že nárůst teploty, který by podle klimatických modelů v řadě oblastí nastal při pokračujících emisích skleníkových plynů, je větší než přirozené proměny, jež jsme zažívali přinejmenším v posledním tisíciletí.

Dopady se mohou řetězit. Nejprve působí na rostliny, mikroorganismy (třeba výskyt tropických chorob), zvířata (dobytek) a teprve následně na lidské zdraví, zemědělství, energetiku, dopravu a další. Závažné jsou zejména změny snižující celkovou stabilitu přirozených ekosystémů. Změny v zemědělství pak mají mnohostranné důsledky pro život a ekonomiku společnosti, bez ohledu na její vyspělost. Mezi jednotlivými faktory pak existují mnohostranné přímé a zpětné vazby. Tak například zvýšená migrace nebo společenské bezpráví během hladomorů mohou významně přispět k rozšíření nemocí. Války mají zase vliv na zásoby potravin, lidské zdraví a spuštění vln migrace.

V posledních letech lze na Zemi pozorovat mnoho dopadů probíhající změny klimatu. Ve velehorách přibývá ledovcových jezer, klesá stabilita jejich hrází a odtéká více vody. Mění se režim horských ledovcových řek, což v oblastech, které závisí na zásobování jejich vodou, má nepříznivé dopady již dnes (podhůří Himaláje). Kvůli tání trvale zmrzlé půdy (permafrostu) se zvyšuje nestabilita půdy, jsou narušovány mosty, silnice, železnice, produktovody. Obnovují se hnilobné procesy, jež jsou dalším zdrojem emisí metanu. Povrchová jezera a vodní toky se postupně oteplují. Vinou většího výparu ubývá povrchových zdrojů vody. Jaro nastupuje časněji, takže dochází k dřívějším rozvinutí listů a kvetení, zrychluje se migrace a rozmnožování ptáků i ryb.

Zkracuje se délka sněhové pokrývky, což dramaticky mění vlastnosti půdy i hydrologického režimu povodí. Samozřejmě je dřívější nástup jarních polních prací a delší vegetační období (včetně delší aktivity škůdců a větší degradace půdy). Areály rostlinných i živočišných druhů se posouvají do vyšších nadmořských výšek a k pólům včetně mikroorganismů, plísni a přenašečů různých chorob (hlodavci, klíšťata, hmyz). Rozšiřují se oblasti výskytu alergenních pylů a plísňových spor a prodlužuje se doba jejich škodlivého působení. Zvyšuje se úmrtnost v horkých vlnách a ubývá smrtí z podchlazení. Vyskytují se delší období sucha (jižní Evropa, subsaharská Afrika) a vyšší úhrny srážek (severní Evropa, některé monzunové oblasti).

V dnešní době vědci podrobně studují problém možných nevratných změn klimatu. K nim často mohou vést procesy, při kterých se uplatní tzv. pozitivní zpětná vazba. Mohou se totiž od určité fáze vyvíjet prakticky samy, bez vlivu člověka, a vývoj přitom může být i poměrně rychlý. Dobrým příkladem je odtávání mořského ledu v severních polárních oblastech. Kry na povrchu oceánu odrážejí velkou část slunečního záření. Pokud ale odtají, sluneční paprsky budou dopadat do tmavší vody, která jich bude většinu absorbovat, a teplota moře tak poroste. Teplejší voda bude však přispívat k odtávání dalšího ledu. Navíc ledová pokrývky brání toku tepla z oceánu do atmosféry, který bez ní bude větší, takže dál poroste teplota vzduchu. Podle některých propočtů by tak mohly být severní polární oblasti na konci 21. století koncem léta prakticky bez ledové pokrývky. Polární oblast bez ledu pak významně ovlivní klima také v dalších částech planety.

Voda

Přibývání skleníkových plynů ve vzduchu zvýší množství vody ve vyšších zeměpisných šířkách a ve vlhkých tropech. Oproti tomu horší bude dostupnost vody v suchých oblastech středních šířek a suchých subtropích. Milionům Afričanů a dalších obyvatel venkova v rozvojovém světě to promění každodenní životy, které závisí na zemědělství. Voda je zde už nyní kritickým zdrojem. Úbytek srážek a průtoku vody v řekách situaci ještě zhorší.

S postupným táním pevninských a horských ledovců se bude snižovat dostupnost vody v řekách, které odtud vytékají. Dnes na nich životně závisí téměř šestina světové populace, především v Indii, Číně, jihovýchodní a střední Asii. Málokdo si uvědomuje, že vysokohorské ledovce tvoří nejdůležitější zdroj pro tak důležité veletoky, jako je Ganga nebo Indus.

Postupně se bude zvětšovat rozloha oblastí postihovaných suchem a zároveň silnými srážkami, a povodněmi. Úbytek vody v řekách postihne i využívání vody jako energetického zdroje. Zemědělský výnos ve vyšších zeměpisných šířkách se při zvýšení průměrné globální teploty o 1–3°C zvětší,

po překročení třístupňové hranice začne klesat i tam. V suchých tropech začnou výnosy klesat už při menším zvýšení teploty. Zemědělskou produkci sníží také čtenější záplavy a suchá období.

Zdravotní rizika

Projektované změny ovlivní zdravotní stav milionů lidí, zejména v oblastech a ekonomikách s malou adaptační schopností. V teplejším podnebí lze očekávat rozšíření infekčních nemocí vázaných na tropické oblasti. Kvůli častějším extrémním jevům (horké vlny, záplavy, sucha) dojde ke zvýšení nemocnosti z nekvalitní vody. Jen někde dojde k nižší úmrtnosti kvůli menšímu riziku podchlazení.

Ekosystémy

Život budou přímo ovlivňovat častější a rozsáhlejší požáry, povodně a suchá období. Očekávaná vyšší kyselost oceánu (kvůli větší koncentraci oxidu uhličitého, který reakcí s vodou vytváří slabou kyselinu uhličitou) bude mít zásadní vliv na mořské ekosystémy (postupně se zpomalí pohlcování uhlíku oceánem a vyšší teplota mořské vody může způsobit dodatečné uvolňování oxidu uhličitého do atmosféry). Změny v kvalitě ekosystémů budou mít dopad i na druhovou biodiverzitu. Při zvýšení průměrné globální teploty o 1,5–2,5°C ohrožuje nevratné vyměnění zhruba 20–30 % druhů rostlin a živočichů.

Zvyšující se extremita klimatu

Více energie a vodní páry v klimatickém systému znamená více extrémních jevů, jako jsou silné srážky a povodně, vichřice, hurikány a další.

Odhady vývoje četnosti a intenzity extrémních jevů při zvýšení koncentrace skleníkových plynů jsou i při použití dnešních moderních prostředků (klimatické modely, superpočítače) velice obtížné. Ze své podstaty se totiž vyskytují (a budou vyskytovat) relativně zřídka. Pro výpočty středních nebo průměrných hodnot teploty, srážek a dalších prvků poskytují modely poměrně velké vzorky výsledků, které lze zpracovávat. Avšak u extrémních jevů i při modelování mnoho desítek let dlouhého období jde často jen o jednotlivé izolované případy, které se obtížně statisticky vyhodnocují. Jedná se však o jevy nebezpečné, které mohou mít za následek značné materiální škody, škody na zdraví obyvatel i ztráty na životech. Proto je třeba jim věnovat pozornost.

Změny ve výskytu některých extrémních klimatických událostí byly podrobněji studovány pro několik emisních scénářů. Pro území střední Evropy tak lze například očekávat větší intenzitu srážek (v den, kdy prší nebo sněží během 24 hodin spadne v průměru více srážek než nyní) i více po sobě jdoucích dnů beze srážek. Srážky samotné tedy budou silnější (což zvyšuje například riziko povodní), ale na druhou stranu je budou střídát delší suchá období.

Modely skutečně potvrzují, že by mělo k pozorovatelnému přibývání extrémních srážek i období nezvyklého sucha docházet. Konkrétní výsledky se ale liší podle velikosti emisí v použitém scénáři a do určité míry se liší i mezi jednotlivými modely. Čím více emisí, tím větší nárůst extrémních výkyvů počasí modely ukazují. Zejména přibývání suchých období je poměrně silně závislé na koncentraci skleníkových plynů.

Podobně bude ubývat mrazových dnů (dny, kdy teplota vzduchu klesne pod nulu), vzroste délka tzv. horkých vln (souvisele období, kdy průměrné denní teploty jsou alespoň o 5°C vyšší než dlouhodobý normál pro dané období) a vzroste délka vegetačního období. Modely rovněž ukazují, že by mělo dojít k viditelným změnám podnebí, jejichž velikost bude záviset na množství emisí.

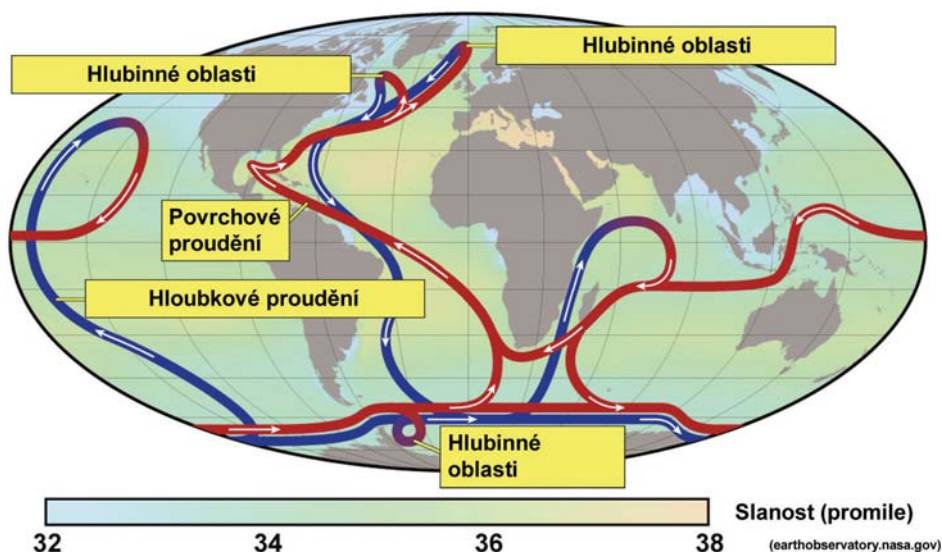
Vznikly také už některé konkrétní kvantifikované projekce, jak by přibývání skleníkových plynů v ovzduší zvýšilo frekvenci nebo intenzitu hurikánů v Atlantiku a silných monzunových dešťů v Asii.

Výskyt některých extrémních projevů počasí mohou ovlivnit i změny cirkulace, ke kterým kvůli změnám klimatu může docházet. Pro Evropu může být jednou z nejdůležitějších změn posun dvou známých „akčních center“ v severním Atlantiku, totiž islandské tlakové níže a azorské tlakové výše, směrem k východu. Právě tento předpokládaný posun (o několik stovek kilometrů v průběhu 21. století) je jedním z důvodů, proč vědci předpokládají, že rostoucí koncentrace skleníkových plynů v ovzduší by v severní Evropě vedla k přibývání srážek, zatímco v jižní Evropě by vedla k jejich úbytku. Severní Evropa se totiž dostane více pod vliv islandské níže a jižní Evropa bude více ovlivňována azorskou výší. Hlavně v létě lze očekávat vyšší četnost výběžků azorské tlakové výše i nad střední Evropou a z toho plynoucí úbytek srážek a častější suchá období.

Extrémní projevy počasí tu byly vždy a také asi vždy budou. Samotný jejich výskyt není nijak vázán na změny klimatu. Žádnou jednotlivou, byť extrémní, epizodu počasí nelze dávat do příčinné souvislosti se změnami klimatu. Co ale s přibýváním skleníkových plynů ve vzduchu souvisí, je četnost a intenzita výrazných období sucha, horkých vln, vichřic, povodní, hurikánů a podobných jevů.

Mořské proudění

Globální podnebí nenápadně, ale velmi závažně ovlivňuje jeden málo nápadný faktor, který suchozemci skoro neznají: mořské proudění. Vědci mu říkají termohalinní cirkulace – pohání jej totiž složitý mechanismus, který spočívá v teplotních rozdílech (termo-) a nerovnoměrné slanosti (-halinní) mořské vody.



Obrázek 11: Schéma globální termohalinní cirkulace oceánu.
Zdroj: NASA.

Voda v oceánu je většinou stabilně zvrstvena, teplejší voda při hladině má nižší hustotu než chladnější voda ve větších hloubkách. Teplá povrchová voda v několika oblastech oceánu proudí od rovníku do vyšších zeměpisných šířek, odevzdává postupně své teplo do atmosféry a tím ji ohřívá. Zároveň se výrazně odpařuje, takže narůstá slanost povrchové vody (obsahuje teď méně vody, ale stejně soli) a klesá její teplota (při vypařování moře ztrácí i teplo). Oba procesy – ochlazování a zvyšování slanosti – mají za následek postupné zvyšování hustoty vody. Proto v oblastech blíže pólům relativně hustá povrchová voda začne klesat do větších hloubek. Hlubkový protiproud potom vede zpátky do tropických oblastí. Pohybuje se v hloubce stovek metrů až několika kilometrů. Složitý motor tak pohání celou globální termohalinní cirkulaci.

Při současném rozložení pevnin převažuje na severní polokouli, zejména v Atlantickém oceánu, proudění podél poledníků na sever či na jih. To je nejsilnější v severním Atlantiku, v oblasti Golfského proudu. Oproti tomu na jižní polokouli dominuje proud, který podél rovnoběžek obtáčí Antarktidu. Proto na severu je více tepla přenášeno oceánickým prouděním do vyšších zeměpisných šířek.

Proudění je velmi citlivé na hustotu povrchových vrstev oceánu. Pokud by zde voda zůstávala příliš teplá nebo málo slaná, zůstane blízko hladiny a nezanoří se do větších hloubek. To by mohlo buď oslabit celý systém mořských proudů, nebo změnit jeho směr. Obojí by zásadně ovlivnilo klima v oblastech, které jsou závislé na Golfském proudu, zejména Evropa a východní pobřeží Severní Ameriky.

Ohřívání vody v povrchových vrstvách oceánu vlivem globálního oteplování a snižování slanosti vody způsobené odtáváním pevninských ledovců (např. grónského) jsou dva faktory, které mohou v budoucnu ovlivnit oceánické proudění v severním Atlantiku. Dokonce je zde precedent z minulosti. Asi před 12 900–11 500 roky se v Evropě po krátkém a výrazném oteplení na konci poslední doby ledové náhle opět ochladilo. Bylo to zřejmě způsobeno tím, že při postupném oteplování vzniklo v Severní Americe obrovské jezero z tajícího sněhu a ledu. Ledovcová hráz tohoto jezera se pravděpodobně protrhla a obrovské množství sladké vody vyteklo do Atlantiku. Klesla tak slanost (a tedy hustota) povrchové vody v oceánu, což zpomalilo zanořování povrchové vody do větších hloubek. Celé severoatlantické proudění tím bylo výrazně narušeno, zpomalilo se nebo odklonilo. Přestalo dodávat teplo do severního Atlantiku a k pobřeží západní Evropy a velká část našeho kontinentu se na několik staletí vrátila na teploty blízké době ledové.

Grónský a západoantarktický ledovec

Významný vliv na globální klima by mělo také tání největších pevninských ledovců na světě: grónského a antarktického.

Ledový příkrov Antarktidy se dělí na dvě části – východoantarktický a západoantarktický. Navzájem se liší: velká část východoantarktického ledovce leží na pevném (skalnatém) podloží, zatímco většina západoantarktického sahá až pod hladinu oceánu a jeho okraje plavou na hladině. Také proto je západoantarktický ledovec méně stabilní. Vzestup teploty mořské vody zde může znamenat i výraznější odtávání

ledu na jeho okrajích. Poměrně výrazné odtávání západantarktického ledovce již bylo pozorováno. Výzkumy ukázaly, že rychlost odtávání je zde asi o 60 % vyšší než tvorba nového ledu, takže ledovec postupně snižuje svůj objem. Oproti tomu východoantarktický ledovec je poměrně stabilní, v nejbližších desetiletích se neočekává žádné výraznější snížení jeho objemu a měření dokonce u něj ukazují na mírný nárůst objemu ledu, především ve vyšších nadmořských výškách. Protože průměrné teploty vzduchu zde i v nejhroších scénářích budou zůstávat výrazně pod nulou a ledovec je jen v minimálním přímém kontaktu s oceánem, v dohledné době zde výraznější tání nenastane.

Zvyšování teploty vzduchu by v budoucnosti mohlo ohrozit stabilitu některých částí grónského ledovce. Příčinou je především jeho poloha. Neleží totiž přímo v polární oblasti, takže jej více ovlivňují jednotlivé změny počasí, typické pro mírné zeměpisné šířky. K tomu se přidává relativní blízkost teplého Golfského proudu. Předpokládané oteplení v průběhu 21. století je navíc v Arktidě výraznější než na jižní polokouli. To vše činí grónský ledovec zranitelnějším vůči globálnímu oteplení, než je tomu například u východoantarktického ledovce.

Roztátí jednoho z ledovců (grónského nebo západantarktického) by zvýšilo hladinu světového oceánu o 5–7 metrů. Avšak i při poměrně pesimistických scénářích by odtátí trvalo řádově stovky let. I pomalé a postupné tání ledu v Grónsku by mohlo vést ke snížení slanosti vody v severním Atlantiku a k oslabení nebo změně směru Golfského proudu se všemi důsledky pro klima Evropy.

Snižování emisí skleníkových plynů

Průběh změn klimatu lze zmírnit nebo zpomalit tím, že zastavíme růst koncentrace (tedy snížíme emise) skleníkových plynů.

Zejména v politickém rozhodování se objevují cíle udržet koncentrace skleníkových plynů pod určitou mezí (zpravidla se uvádí 450 ppm pro CO₂) nebo zvýšit globální průměrné teploty po určitou hranici (obvykle 2°C oproti předindustriálnímu období). Někdy jsou tyto limity považovány i za meze, jejichž překročení by mohlo způsobit nevratné změny v klimatickém systému. Limity však mají význam spíše politický: jako jasně kvantifikovaný cíl, o jehož dosažení lze usilovat a jehož splnění či nesplnění lze poměrně dobře ověřit. Většinou ale nevycházejí přímo z klimatologických rozborů a modelů.

Splnění podmínky nepřekročit v koncentraci oxidu uhličitého hranici 450 ppm je i pro neoptimističtější scénáře prakticky nemožné a i při těchto scénářích emisí bude s největší pravděpodobností limit 450 ppm v průběhu 21. století překročen. Pro nepřekročení hladiny 450 ppm CO₂ by totiž bylo nutné během asi dvou desetiletí drasticky zredukovat emise CO₂, což je politicky i technicky nerealizovatelné. Množství oxidu uhličitého ve vzduchu by smělo vzrůst maximálně o dalších 15 % oproti dnešní hladině. Avšak aby se růst koncentrace CO₂ zastavil na této hladině, musely by emise brzy klesnout prakticky na úroveň, jakou je tento plyn z atmosféry odstraňován. Emise jsou dnes ale několikanásobně vyšší, než kolik činí čistá kapacita procesů, které CO₂ z atmosféry odstraňují. Emise CO₂ by tedy musely během několika málo desetiletí rapidně klesnout. Reálněji vypadá možnost nepřekročení limitu 550–600 ppm. Podobně i projekce globálních průměrných

Tabulka 6: Stabilizační scénáře: jak se musí emise snižovat, abychom růst teploty zastavili na určité hladině.

	Jak se změní radiační působení [W/m ²]	Maximální koncentrace CO ₂ [ppm]	Maximální koncentrace skleníkových plynů [přepočtených na CO ₂ , ppm]	Jak se zvýší globální průměrná teplota [°C]	Emise CO ₂ by musely začít klesat v období:	Jak musí emise v roce 2050 klesnout (či o kolik nejvýše mohou stoupnout) vzhledem k roku 2000 [%]
I	2,5 – 3,0	350 – 400	445 – 490	2,0–2,4	2000–2015	–85 až –50
II	3,0 – 3,5	400 – 440	490 – 535	2,4–2,8	2000–2020	–60 až –30
III	3,5 – 4,0	440 – 485	535 – 590	2,8–3,2	2010–2030	–30 až +5
IV	4,0 – 5,0	485 – 570	590 – 710	3,2–4,0	2020–2060	+10 až +60
V	5,0 – 6,0	570 – 660	710 – 855	4,0–4,9	2050–2080	+25 až +85
VI	6,0 – 7,5	660 – 790	855 – 1130	4,9–6,1	2060–2090	+90 až +140

Zdroj: Fisher et al. (2007).

teplot pro jednotlivé emisní scénáře ukazují, že splnění limitu jejich zvýšení o 2°C nemusí být reálné ani při dosažení neoptimističtějšího z nich.

Snižování emisí

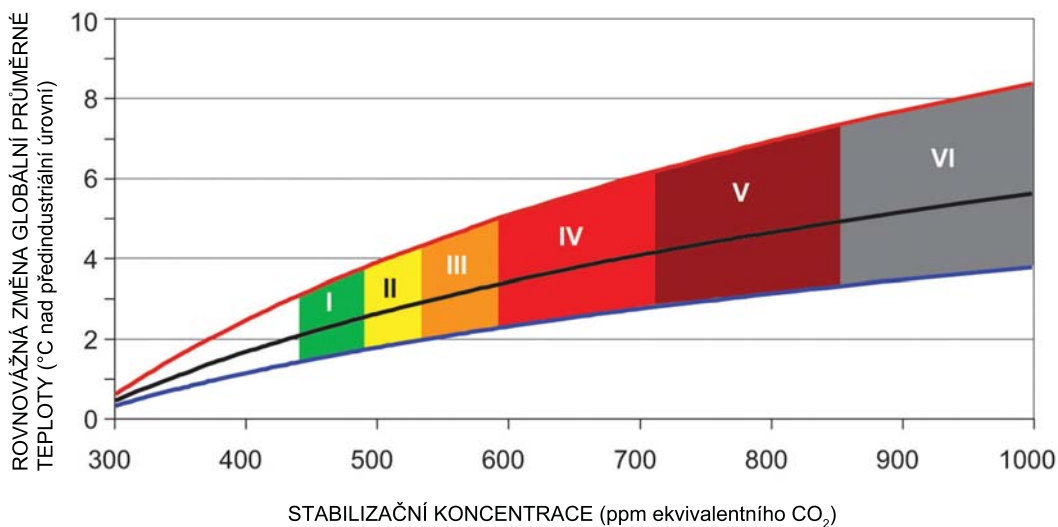
Každému emisnímu scénáři přirozeně odpovídá určité tempo – nebo spíše trajektorie – přibývání skleníkových plynů. Ale pokud chceme vědět, jak musíme emise snížit, abychom udrželi změny klimatu v určitém rozsahu, potřebujeme řešit obrácenou úlohu – najít pro určitou trajektorii koncentrací takový emisní scénář, který zajistí její splnění. Takové speciální scénáře byly spočteny pro šest kategorií cílových koncentrací oxidu uhličitého.

Výsledkem emisních scénářů jsou vždy intervaly hodnot, nikdy jediné konkrétní číslo. Příčinou jsou určité nejistoty například v odhadech a modelech toho, jak se daný objem emisí projeví na jejich koncentraci v atmosféře či jak se konkrétní koncentrace projeví ve změně teploty a dalších klimatických podmínkách. Intervaly hodnot pak zpravidla vyjadřují meze, ve kterých by se s asi 90% statistickou pravděpodobností měla nacházet správná hodnota. Přes

tyto nejistoty jsou ale zřetelné rozdíly mezi prognózovanými hodnotami pro různé scénáře. Chyba počtů je tedy menší než rozdíly mezi dopady, které různá velikost emisí bude mít na světové podnebí. To také potvrzuje značnou citlivost klimatického systému na další vývoj emisí a koncentrací skleníkových plynů v ovzduší.

Závislost změny teploty na koncentraci skleníkových plynů znázorňuje následující graf. Horní červená křivka odpovídá hornímu odhadu předpokládané citlivosti klimatického systému na skleníkové plyny (plus 4,5°C při zdvojnásobení koncentrace oproti úrovni před průmyslovou revolucí), spodní modrá křivka odpovídá spodnímu odhadu (2°C) a střední černá křivka reprezentuje nejlepší odhad citlivosti (3°C).

Zastavit oteplování na růstu 2°C do roku 2100 (nebo udržení koncentrace skleníkových plynů na hladině 450 ppm) je možné jen při rychlých a tvrdých opatřeních ke snížení emisí skleníkových plynů a za předpokladu, že citlivost klimatu na zvyšování koncentrací skleníkových plynů bude nízká. Pro citlivost blízkou nejlepšímu odhadu už tyto cíle nejsou reálné.



Obrázek 12: Změny rovnovážné teploty na zvolené stabilizační koncentraci ekvivalentního CO₂.
Zdroj: Barker et al. (2007).

Závěr

Klimatologie má dnes už hodně dobře prověřených poznatků o chování globálního klimatického systému a vlivech, které na něj působí. Základní lze shrnout do následujících bodů:

- klima se vždy měnilo a mění se i v dnešní době,
- v současnosti je jedním ze základních projevů těchto změn globální oteplování,
- emise skleníkových plynů mají na tom nezanedbatelný podíl,
- klimatické změny a jejich důsledky mohou mít v některých oblastech velký vliv na ekonomiku i přírodní poměry,
- příští vývoj klimatického systému silně závisí na dalších emisích skleníkových plynů.

Klimatologie však poskytuje i informaci o statistické pravděpodobnosti, spolehlivosti či věrohodnosti svých výsledků. Je to důležité zejména pro výzkum dopadů klimatických změn na život lidí nebo pro ekonomické analýzy.

Klimatický systém Země je velice složitý a musí být studován především fyzikálními metodami. Chceme-li jako lidstvo optimálně reagovat na současné i předpokládané budoucí změny klimatu, musíme vycházet z výzkumu klimatického systému, příčin změn klimatu a předpokládaného budoucího vývoje. To je jednoznačně úkolem klimatologie. Na základě podkladů od klimatologů mohou potom specialisté z dalších oborů (hydrologie, vodní hospodářství, zemědělství, lesnictví, energetika, medicína, biologie a další) zjistit, co předpokládané změny klimatu přinesou pro život lidí a také vyhodnotit, jaké klady či zápory budou mít. Na ekonomech pak je, aby podle těchto výsledků formulovali postupy, které zajistí co nejvyšší efekt při vynaložení co nejnižších nákladů nebo s co nejnižšími škodami. Politici by potom měli především zajistit dobré legislativní prostředí pro realizaci zvolených postupů.

Tato zpráva podává jen zcela základní informace o problematice klimatických změn, jejich možných dopadů a o možnostech zmírnění následků.

Zájemcům o podrobnější informace lze doporučit zejména čtvrtou zprávu IPCC (<http://www.ipcc.ch>).

LITERATURA A ZDROJE

Barker, T., Bashmakov, I., Bernstein, L., Bogner, J. E., Bosch, P. R., Dave, R., Davidson, O. R., Fischer, B. S., Gusta, S., Halsncs, K., Heij, G. J., Kahn Ribeiro, S., Kobayashi, S., Levine, M. D., Martino, D. L., Masera, O., Metz, B., Meyer, L. A., Nabuurs, G.-J., Najam, A., Nakicenovic, N., Rogner, H.-H., Roy, J., Sathaye, J., Schock, R., Shukla, P., Sims, R. E. H., Smith, P., Tirpak, D. A., Urge-Vorsatz, D., Zhou, D. (2007): Technical Summary. In: *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [B. Metz, O. R. Davidson, P. R. Bosch, R. Dave, L. A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

CDIAC – Carbon Dioxide Information Analysis Center/World Data Center for Atmospheric Trace Gases (<http://cdiac.ornl.gov>)

Denman, K. L., Brasseur, G., Chidthaisong, A., Ciais, P., Cox, P. M., Dickinson, R. E., Hauglustaine, D., Heinze, C., Holland, E., Jakob, D., Lohmann, U., Ramachandran, S., da Silva Dias, P. L., Wofsy, S. C., Zhang, X. (2007): Couplings Between Changes in the Climate System and Biogeochemistry. 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, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Fischer, B. S., Nakicenovic, N., Alfsen, K., Corfee Modlit, J., de la Chesnaye, F., Hourcade, J.-Ch., Juany, K., Kainuma, M., La Rovere, E., Matysek, A., Rana, A., Riahi, K., Richels, R., Rose, S., van Vyučen, D., Warren, R. (2007): Issues related to mitigation in the long term context, In *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Inter-governmental Panel on Climate Change* [B. Metz, O. R. Davidson, P. R. Bosch, R. Dave, L. A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge.

Forster, P., Ramaswamy, V., Artaxo, P., Berntsen, T., Betts, R., Fandy, D. W., Haywood, J., Lean, J., Lowe, D. C., Myhre, G., Ganga, J., Princ, R., Raga, G., Schulz, M., Van Borland, R. (2007): Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. 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, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Hegerl, G. C., Zwiers, F. W., Braconnot, P., Gillett, N. P., Luo, Y., Marengo Orsini, J. A., Nicholls, N., Penner, J. E., Stott, P. A. (2007): Understanding and Attributing Climate Change. 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, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Christensen, J. H., Hewitson, B., Busuioc, A., Chen, A., Gao, X., Held, I., Jones, R., Kolli, R. K., Kwon, W.-T., Larise, R., Magaña Rueda, V., Mearns, L., Menéndez, C. G., Räisänen, J., Rinke, A., Sarr, A., Whetton, P. (2007): Regional 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, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and 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* [S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Le Treut, H., Somerville, R., Cubasch, U., Ding, Y., Mauritzen, C., Mokssit, A., Peterson, T., Prather, M. (2007): Historical Overview of Climate Change. 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, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Nakicenovic, N., Swart, R. et al. (2000): *Special Report on Emission Scenarios*, Cambridge University Press, United Kingdom.

NASA – <http://earthobservatory.nasa.gov>

Netopil, R. (1984): Fyzická geografie I., SPN, Praha, 273 s.

Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Alley, R. B., Berntsen, T., Bindoff, N. L., Chen, Z., Chidthaisong, A., Gregory, J. M., Hegerl, G. C., Heimann, M., Hewitson, B., Hoskins, B. J., Joos, F., Kouzel, J., Kattsov, V., Lohmann, U., Matsuno, T., Molina, M., Nicholls, N., Overpeck, J., Raga, G., Ramaswamy, V., Ren, J., Rusticucci, M., Somerville, R., Stocker, T. F., Whetton, P., Wood, R. A., Watt, D. (2007): Technical Summary. 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, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Zachos, J., Pagani, M., Sloan, L., Thomas, E., Billups, K. (2001). Trends, Rhythms and Aberrations in Global Climate 65 Ma to Present. *Science* 292 (5517): 686–693.



RNDr. Ladislav Metelka, Ph.D. je vedoucím oddělení meteorologie a klimatologie pobočky Českého hydrometeorologického ústavu v Hradci Králové. Zabývá se zejména změnami klimatu, empirickým nelineárním modelováním procesů v klimatickém systému a využitím systémů umělé inteligence v meteorologii a klimatologii.

RNDr. Radim Tolasz, Ph.D. se věnuje klimatologii na Českém hydrometeorologickém ústavu již řadu let. Odborně se zabývá databázovým a geografickým zpracováním klimatologických dat, je expertem Světové meteorologické organizace pro klimatická data a vedl autorský kolektiv významné publikace "Atlas podnebí Česka", která vyšla v roce 2007. V současné době je náměstkem ředitele pro meteorologii a klimatologii.