

Jan Pretel

Klima a jeho výhled

Rozhledy matematicko-fyzikální, Vol. 81 (2006), No. 4, 12–19

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/146169>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2006

Institute of Mathematics of the Czech Academy of Sciences provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This document has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://dml.cz>

Klima a jeho výhled

Jan Pretel, Český hydrometeorologický ústav

Klima a klimatický systém

Klima je definováno jako průměrný stav atmosféry v určité geografické oblasti během dostatečně dlouhého časového intervalu (obvykle měsíc, roční období, rok, desetiletí atp.). Soubor hodnocených meteorologických proměnných může být značně rozsáhlý, což závisí na požadované preciznosti popisu klimatu a na požadavcích uživatele informace. Nejčastěji jsou k hodnocení klimatu používány teploty vzduchu v blízkosti zemského povrchu a charakteristiky popisující srážkový režim. Tyto základní proměnné lze doplňovat o charakteristiky větru, oblačnosti, slunečního svitu, tlaku, dohlednosti, vlhkosti a dále o prvky, které jsou pozoruhodné z hlediska dopadů na člověka a jeho život. Mezi ně patří třeba výrazné bouře, velmi vysoké či velmi nízké teploty, mlhy, sněhová pokrývka, námrazy, krupobití apod. Průměrné hodnoty meteorologických prvků popisující klima ještě doplňují další statistické veličiny, z nichž nejdůležitější jsou směrodatné odchylky od průměrů, charakteristiky statistického rozložení veličin či autokorelační funkce.

Důležité je rozlišovat mezi počasím a klimatem. Na rozdíl od klimatu popisuje počasí atmosférické podmínky v daném časovém okamžiku na daném místě. Obecně lze tedy klima charakterizovat jako průměrné počasí, včetně jeho pravděpodobnostního rozložení kolem průměru.

Klimatický systém se skládá z pěti složek geofyzikálního systému, a to z atmosféry a z dalších čtyřech systémů, které jsou s atmosférou v přímém kontaktu a které společně s ní klima ovlivňují (oceán, zemský povrch, kryosféra – zaledněné a trvale zmrzlé plochy – a biosféra). Všechny tyto složky se vzájemně ovlivňují a zároveň vytvářejí prostor pro zpětné vazby. Kromě nich existuje ještě řada dalších externích proměnných faktorů, které na klima působí. Mezi ně patří Slunce s jeho periodicitami, orbitální charakteristiky Země, rozložení pevnin a oceánů, topografie Země a složení atmosféry a oceánů. S výjimkou poslední proměnné nejsou ostatní faktory klimatickými podmínkami zpětně ovlivňovány.

Klimatickou změnou rozumíme změnu klimatických podmínek na jednotlivých částech planety, která je přímo nebo nepřímo spjata s lidskou činností a je spolu s účinky přirozené proměnlivosti klimatu dlouhodobě pozorována. Klima se tak stává charakteristikou, která byla, je a vždy bude proměnnou v čase i v prostoru.

Radiační procesy, tepelná bilance, skleníkový efekt a jejich vliv na klima

Sluneční záření je základním zdrojem energie klimatického systému, který je udržován v rovnováze energetickými toky dopadajícího a odraženého záření. Jakákoliv změna jedné složky vede k narušení rovnovážného stavu a celý systém se ihned snaží dosáhnout zpětné rovnováhy. Dopadající krátkovlnné sluneční záření o vlnových délkách 0,2 až 4 μm je přibližně ze dvou třetin pohlcováno atmosférou, oblačností, oceány, zemským povrchem a jeho pokryvem a jeho jedna třetina je uvedenými komponentami odražena zpět do kosmického prostoru. Aby nedošlo k narušení energetické rovnováhy systému, je celkové množství energie dopadajícího krátkovlnného záření kompenzováno energií vyzařovanou zpět do vnějšího prostoru dlouhovlnným zářením o vlnových délkách 4 až 60 μm . Vše komplikuje i to, že jednotlivé složky klimatického systému část tohoto dlouhovlnného záření opět pohlcují a vyzařují. Stav rovnováhy by v případě čisté atmosféry podle Stefan-Boltzmannova zákona odpovídala přibližná teplota zemského povrchu o 33 °C nižší, než ve skutečnosti je. Rozdíl mezi takovou hypotetickou a skutečnou teplotou lze přisoudit vlivu přirozeného skleníkového efektu atmosféry. Zároveň jde i o důkaz, že atmosféra obsahuje též přirozené množství skleníkových plynů, včetně vodní páry.

Výsledné klima planety je určováno přerozdělováním tepelné energie v atmosféře a oceánech, které závisí na zeměpisné šířce a roční, resp. denní době, protože v daném časovém okamžiku nejsou slunečním zářením všechny části planety ohřívány rovnoměrně. Významnou úlohu hraje i to, že tepelná kapacita oceánů přesahuje tepelnou kapacitu atmosféry až o tři řády, a oceán se tak stává hlavní zásobárnou energie určující dlouhodobý charakter klimatu. Právě teplotní rozdíly mezi pevninami a oceány jsou základní řídicí silou všech pohybů v atmosféře i oceánech – ovlivňují charakter proudění vzduchu, vyvolávají i proudění v mořích a oceánech. Teplotní rozdíly usměrňují i spotřebu energie na výpar, ten generuje rozložení oblačnosti a oblačnost následně ovlivňuje přítok

krátkovlnné sluneční energie – energetický cyklus se začíná postupně uzavírat. Z tohoto zjednodušeného schématu vyplývá, že zcela zásadní příčinou klimatických změn jsou změny energetické bilance klimatického systému.

Jak jsme se již zmínili, působení přirozeného skleníkového efektu vděčíme za současnou přijatelnou průměrnou teplotu planety (kolem 14 °C). Rozbory vzorků ledu různého stáří (vrty v arktických a antarktických ledovcích) spolu například se studiem letokruhů starých stromů ukázaly, že změny koncentrací oxidu uhličitého (CO₂) a metanu (CH₄), jako dvou nejvýznamnějších skleníkových plynů přirozeného původu, a změny průměrné teploty spolu vždy vzájemně úzce souvisely. Před stovkami tisíc let se atmosférické koncentrace CO₂ pohybovaly v intervalu 180 až 280 ppmv*) a tyto hodnoty nebyly v minulosti pravděpodobně nikdy překročeny.

V posledních několika desetiletích však koncentrace velmi výrazně narůstají a dosahují hladiny 380 ppmv (CO₂). K podobným změnám došlo i u koncentrací CH₄ a oxidu dusného N₂O. Jako nové se v poslední době uplatňují i částečně a zcela halogenované fluorovodíky a fluorid sírový. Zvýšená produkce všech těchto plynů souvisí zejména s lidskou činností. Oxid uhličitý je produkován při spalování fosilních paliv (včetně provozu motorových vozidel), emise CH₄ ovlivňuje těžba a zpracování ropy, zemního plynu i pevných paliv, dále zemědělská výroba a odpadové hospodářství, N₂O uniká rovněž při řadě zemědělských činností a emise halogenovaných fluorovodíků souvisí s rozvojem chladírenské a klimatizační techniky. Přeměna lesů na zemědělskou půdu a sídelní území, kromě toho, že sama o sobě mění celkovou energetickou bilanci systému, snižuje i přirozené pohlcování CO₂ vegetací – i to je důsledek činnosti člověka.

Jelikož CO₂ má výrazné absorpční a vyzařovací pásy v okolí 4 μm a 15 μm, CH₄ kolem 3 μm a 7 μm a N₂O kolem 4 μm a 7 μm, zpětné dlouhovlnné záření se nárůstem jejich množství v atmosféře zvyšuje, a všechny plyny tak dohromady přispívají k rychlému zesilování původně přirozeného skleníkového efektu. Uvedené plyny působí v atmosféře desítky, stovky a v některých případech až tisíce let a jejich radiační účinnost a její následný vliv na celkovou tepelnou bilanci systému je značně rozdílná. Například účinnost stejného hmotnostního objemu metanu je

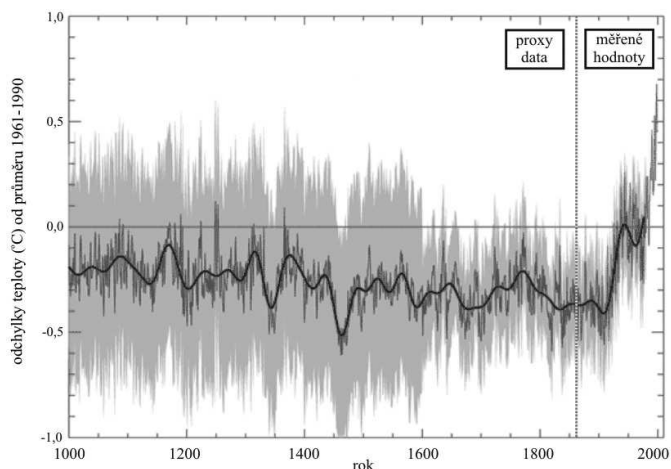
*) 1 ppmv je jedna „objemová miliontina“, tzn. jedna objemová jednotka nějaké látky v jednom milionu objemových jednotek atmosféry.

21krát vyšší než u CO_2 , účinnost oxidu dusného je 310krát vyšší apod. Dramatický nárůst emisí CO_2 , CH_4 a N_2O způsobil, že pouze za posledních deset let se jejich celková radiační účinnost zvýšila o 20 % a dnes dosahuje již hodnot kolem $2,3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (pro porovnání: průměrné množství zářivé energie přijaté zemskou atmosférou od Slunce je $1369 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$). K zesilování skleníkového efektu přispívá i troposférický ozón (současná radiační účinnost $0,35 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$), jeho působení naopak snižují emise pevných aerosolových částic (kolem $-0,6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$). Mezi látky působící na skleníkový efekt je třeba zahrnout i vodní páru, která je důležitým faktorem ovlivňujícím řadu zpětných klimatických vazeb (včetně oblačnosti), nicméně změny jejího celkového obsahu v globální atmosféře jsou v dlouhodobém pohledu zanedbatelné.

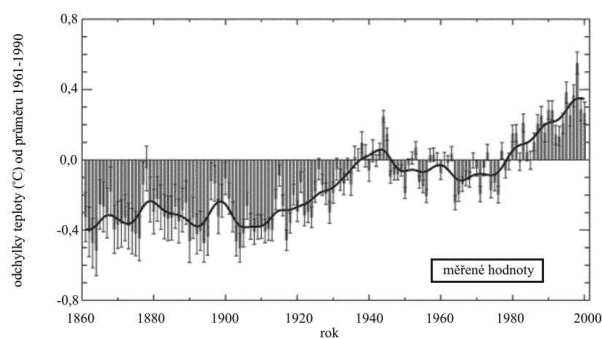
Změny klimatu v dávné i nedávné minulosti

Paleoklimatické rozbory ukazují, že z důvodů změn energetické bilance systému se klima měnilo i v dávné minulosti. Změny se projevovaly jak globálně, tak i regionálně a teplota kolísala s periodou kolem 120 až 140 tisíc let s nejnižšími teplotami v dobách ledových a nejvyššími v dobách meziledových. Téměř vždy se planeta oteplovala nepoměrně rychleji, než se pak následně ochlazovala. Většina hypotéz se shoduje na tom, že prvotní příčinou kolísání klimatu byly terestrické a extraterestrické vlivy, neboť právě ty mohly energetickou bilanci systému v minulosti nejvýznamněji ovlivňovat. V posledním tisíciletí probíhaly již pouze drobné výkyvy, např. mírné ochlazení ve 12. až 14. a 17. století (obr. 1).

Postupné oteplování se začalo projevovat ve druhé polovině 19. století (obr. 2) a s výjimkou krátkých období ochlazení ve čtyřicátých až šedesátých letech probíhalo po celé 20. století. V posledních 10 až 15 letech se trend oteplování výrazně zvyšuje. Od doby zahájení pravidelných měření teploty (polovina 19. století) bylo posledních 12 let zcela nejteplejších. Za posledních 100 let vzrostla průměrná teplota planety o $0,74 \text{ }^\circ\text{C}$, přičemž trend nárůstu $0,13 \text{ }^\circ\text{C}$ za 10 let je v posledním padesátiletém období téměř dvojnásobný oproti podobnému trendu před stolety. Podle údajů Světové meteorologické organizace byl zatím nejteplejší rok 1998, následovaný roky 2005, 2002, 2003, 2004 a 2006. Oteplování se však neprojevuje všude stejně a nejrychleji probíhá ve vyšších zeměpisných šířkách severní polokoule. Proto nemusí být globálně nejteplejší roky zároveň nejteplejšími na všech místech planety.



Obr. 1. Odchylky průměrné teploty na severní polokouli ve druhém tisíciletí od průměru z let 1961–1990



Obr. 2. Odchylky průměrné teploty na severní polokouli po roce 1860 od průměru z let 1961–1990

Jak jsme již uvedli, značnou část tepla pohlcují oceány. Nárůstu teploty vody a její následné teplotní expanzi můžeme dnes již připsat padesátiprocentní podíl na zvyšování hladin oceánů. Trend nárůstu za posledních 10 let je 3,1 mm za rok, zatímco za posledních 40 let to bylo pouze 1,8 mm za rok. I to je důkazem, že nárůst hladin oceánů se stále zrychluje.

Co můžeme očekávat v budoucnu?

Chceme-li se „dopátrat“ odhadů vývoje budoucího klimatu, existuje v současnosti pouze jediná možnost. Musíme důkladně pochopit co nejvíce složitých fyzikálních zákonitostí chování jednotlivých složek klimatického systému a ty pak, spolu s velmi důležitými zpětnými vazbami, matematicky správně a dostatečně přesně popsat. Z numerických řešení soustav rovnic lze následně získat základní představu o tom, jakou výslednou odezvu lze od sil působících na klimatický systém očekávat. Současná řešení však stále ještě podléhají řadě omezení, která nedovolují šíři procesů popsat dostatečně podrobně, a proto používáme různých zjednodušení a předpokladů.

K vytvoření věrohodné projekce budoucího klimatu je třeba znát také co nejpřesnější odpověď na otázku, jak se bude naše společnost dále vyvíjet, jak bude vypadat její sociální a ekonomická struktura za padesát, sto let. Východiskem je soubor tzv. emisních scénářů, který je složen z různých variant možného světového populačního nárůstu, úrovně technologického rozvoje, stavů stávajících energetických zásob, možného využívání nových energetických zdrojů apod. Scénáře jsou shrnuty do 6 základních skupin, které ve výhledu nejbližších 20 až 30 let dávají prakticky shodné výsledky a jejichž výstupy se začínají podstatněji lišit až v modelování situace pro druhou polovinu tohoto století.

Prozatím se provádějí odhady nejvýše do konce 21. století a spektrum výstupů z modelů „očekává“, že na jeho konci by mohly koncentrace CO_2 dosáhnout hodnot v rozmezí od 490 do 1260 ppmv, tj. o jednu čtvrtinu až třikrát vyšších, než jsou v současnosti. Spektrum odhadu je tedy dosti značné, ale to je právě dáno rozdíly mezi jednotlivými scénáři. Jelikož odhady výhledové sociální a ekonomické struktury světa jsou zatíženy značným stupněm neurčitosti, nemůžeme ani jeden ze scénářů upřednostňovat. Poslední konzervativní odhady ale naznačují, že je dnes již téměř vyloučené, aby globální teplota vzrostla během tohoto století o méně než 1°C , ale na druhé straně není příliš pravděpodobné, že by byl její nárůst vyšší než 6°C .

Z uvedených důvodů nemůžeme výstupy z těchto modelů považovat za předpovědi, ale pouze za odhady, přesněji projekce dalšího vývoje. Jejich přesnost je výrazně nižší, než třeba přesnost předpovědi počasí na několik dní dopředu. A v tomto okamžiku si musíme znovu připomenout rozdíl mezi klimatem a počasím. Zatímco předpověď počasí je o předpovědi stavu atmosféry v daném místě na několik hodin či dnů dopředu, projekce

klimatu je o trendech průměrného počasí v daném regionu na desítky let dopředu.

Naše Země se ani nadále nebude oteplovat homogenně. Teploty porostou rychleji nad pevninami a ve vyšších zeměpisných šířkách, pomaleji nad oceány a v nižších zeměpisných šířkách. Extrémně vysoké teploty se budou vyskytovat výrazně častěji než teploty extrémně nízké; některé menší části planety se mohou paradoxně i ochlazovat. S vyšší mírou nejistot jsou spojeny i odhady pravděpodobností výskytu extrémních počasových jevů na různých místech. Přesto však musíme v budoucnu zvláště ve středních zeměpisných šířkách severní polokoule očekávat i výraznější kolísání počasí. S tím souvisí také odhad budoucího srážkového režimu. Modely naznačují nárůst srážkových úhrnů ve vyšších a naopak jejich pokles v nižších zeměpisných šířkách, jakož i zvýšení jejich časové proměnlivosti. Bude se zvyšovat četnost výskytu extrémnějších počasových jevů. Znovu však připomínáme – hovoříme o klimatu, a tedy o projekcích trendů. Neznamená to tedy, že každý následující rok bude teplejší či počasově extrémnější (podívejte se znovu na obr. 1 a obr. 2, kde vidíte, jak teploty v jednotlivých letech kolísaly)!

Ubráníme se důsledkům klimatické změny?

Problém klimatických změn nespočívá pouze ve vlastním oteplování planety. Daleko podstatnější je, že se mění celkové chování klimatického systému a jeho zpětné reakce. Bohužel, negativní reakce většinou převažují a projevují se ve vodohospodářství, zemědělství, lesnictví, na celých ekosystémech, na ekonomické prosperitě, duševní pohodě a lidském zdraví apod. Jejich projevy a intenzita nejsou všude stejné a obecně platí, že ekonomicky méně vyspělé oblasti, třeba rozvojové země „třetího světa“ jsou vůči klimatické změně méně odolnější než státy ekonomicky bohatší, které obvykle snáze vzniklé potíže překonají.

Mezi výhledově nejvíce narušené ekosystémy patří tundra, boreální lesy, horské, středomořské a pobřežní ekosystémy a korálové útesy. Zvyšováním hladin moří a oceánů budou stále ohroženější pobřežní oblasti. Nejzranitelnější budou vodní zdroje ve středních a nízkých zeměpisných šířkách, kde bude klesat množství srážkových úhrnů a bude se zvyšovat výpar, bude zde klesat i zemědělská produktivita. Z regionů budou nejvíce ohrožené arktické oblasti, kde je rychlost oteplování již dlouhodobě nejvyšší, dále subsaharská Afrika s nízkou adaptační kapacitou, malé ostrovní státy v Pacifiku či Karibiku ohrožené vzestupem hladin oceánu

a tropickými bouřemi a cyklonami a rovněž území kolem rozsáhlých asijských říčních delt, kde je enormní množství populace vystaveno rizikům nárůstu hladin oceánu, tropických bouří a rozsáhlých záplav.

Při hledání řešení „boje proti klimatické změně“ se nabízí dvě zcela základní možnosti. Jednou z nich je omezovat vliv člověka a snižovat objem emisí skleníkových plynů vypouštěných do atmosféry. Tuto možnost nelze opomíjet, ale sama o sobě nemůže rizika dopadů významně snížit. Druhou možností je hledat cesty, jak se probíhajícími změnami klimatu aktivně přizpůsobovat a hledat co nejúčinnější a nejlevnější způsoby, jak jejich škodlivé důsledky s předstihem minimalizovat. Ani jednu z těchto cest bychom neměli upřednostňovat, neboť obě mají svoje opodstatnění a měly by proto působit společně.

Literatura:

- [1] *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. IPCC, 2001
(<http://www.ipcc.ch/>)
- [2] *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, Vulnerability*. IPCC, 2001
(<http://www.ipcc.ch/>)

* * * * *

NEMŮŽEME NEPROHRÁT

Americký fyzikální chemik Walter John Moore (1918–2001) formuloval tři základní věty termodynamiky populárním způsobem takto:

1. První věta termodynamiky praví, že nemůžete vyhrát; v nejlepším případě dosáhnete nerozhodného výsledku.
2. Druhá věta termodynamiky praví, že nerozhodného výsledku můžete dosáhnout pouze při teplotě absolutní nuly.
3. Třetí věta termodynamiky praví, že absolutní nuly nemůžete nikdy dosáhnout.

Ivan Štoll *)

*) Z publikace *Historiky o slavných fyzicích a matematicích*, Praha, Prometheus 2005