

2. Modelování klimatického systému

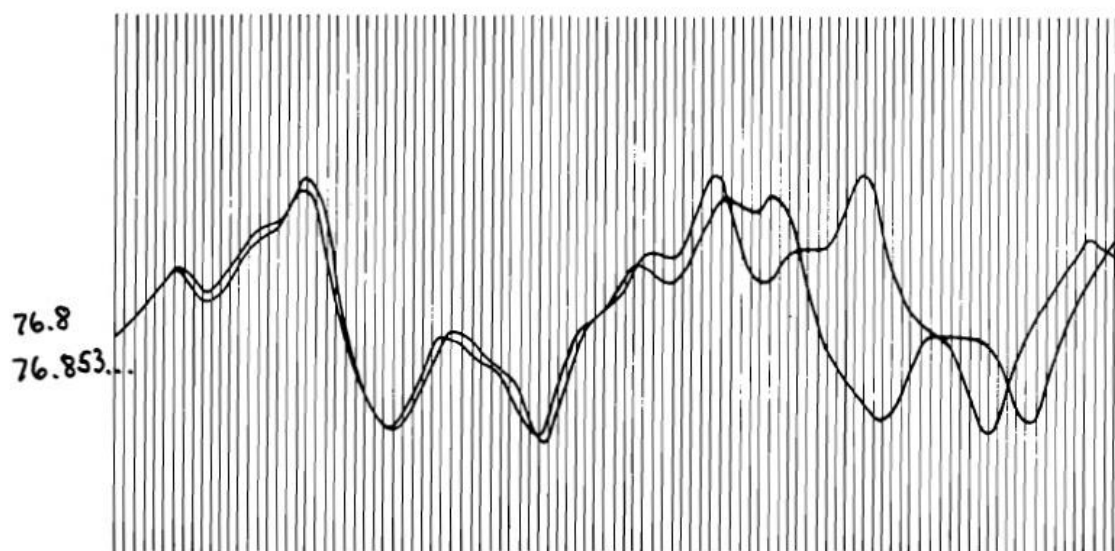
2.1. Co znamená deterministický chaos a jeho implikace pro studium klimatického systému

Když Isaac Newton definoval ve svém základním díle Principia (1686) základní pohybové zákony, předurčil směr fyziky na dvě století dopředu. Od této práce byl svět většinou fyziků chápán jako deterministický matematický model. Tedy, systém v němž platí, že známe-li výchozí podmínky, jsme schopni přesně vypočítat budoucí vývoj. Svět je v deterministickém pojetí chápán jako poměrně snadno předvídatelný, a tedy i říditelný hodinový stroj. Příkladem takového systému je jednoduché kyvadlo, jehož pohyb a dráhu jsme schopni v čase vyjádřit a téměř přesně odhadnout pomocí soustavy rovnic, jejichž řešení je poměrně triviální.

Nicméně od éry Henriho Poincarého (na přelomu 19. a 20. století) si fyzici a matematici začali uvědomovat, že popsat a předpovědět chování v zásadě jednoduché fyzikální soustavy představuje pro dostupný matematický aparát neřešitelný problém. Předpovídat polohu planety ve Sluneční soustavě je pro zkušeného astronoma poměrně jednoduché, ale co jen u o málo složitějšího systému Slunce-Země-Měsíc? To je překvapivě pořádný oříšek, a v případě tří podobně hmotných těles jde o oříšek nerozlousknutelný, neboť jak koncem předminulého století H. Poincaré dokázal, neexistuje analytické řešení tohoto problému. To, že neexistuje analytické řešení, by mohlo svádět k domněnce, že tuto soustavu dokonce nelze vyjádřit rovnicemi. To sice lze, ale míra vzájemného ovlivňování je velmi vysoká (což je vyjádřeno značnou nelinearitou soustavy). Není tedy možné žádným spolehlivým způsobem předpovědět dlouhodobé chování tří blízkých hvězd. Pro podobný úkaz ale nemusíme létat do vzdáleného vesmíru. V pásu asteroidů mezi Marsem a Jupiterem obíhá skupina tří velkých asteroidů, které nazýváme Trojany. Zde je situace ještě komplikována přítomností menších těles a prachu. Proto je systém extrémně nestabilní i při malé změně počátečních podmínek, a proto není možné pro tento systém připravit dlouhodobé předpovědi.

Henry Poincaré svůj intelekt nevěnoval jen studiu astronomických problémů, ale uvědomoval si, že problémy objevené při popisu soustavy tří těles se mohou týkat i dalších fyzikálních problémů. Po konci druhé světové války začalo být řadě vědců zřejmé, že existující fyzikální modely a aparát, prostě nemůže vysvětlit pozorované chování v určitých experimentech (ať šlo o problematiku turbulence či šíření elektromagnetických signálů). Hlavním katalyzátorem vývoje teorie chaosu byl elektronický počítač. Většina matematických teorií chaosu zahrnuje jednoduché opakované iterace, jejichž vývoj je nepraktické zkoušet ručně, ale s pomocí výpočetního stroje (se schopností lepší kalkulačky) je možné začít podivuhodné experimenty. Jedním z prvních pionýrů tohoto postupu byl americký fyzik Edward Lorenz, jehož zájem se soustředil na problematiku předpovědi počasí. Počátkem 60. let minulého století, vyvinul Lorenz zjednodušený model klimatického systému a pro výpočetní iterace použil počítač Royal McBee LPG-30. Jeho model byl na základě zadaných informací schopen relativně věrně simulovat a graficky zachycovat průběh nejdůležitějších atmosférických procesů. V dalším zkoumání sehrála velkou roli náhoda: Lorenz chtěl zopakovat jeden z výpočetních běhů, ale zadal počáteční hodnoty s menší přesností než poprvé – namísto šestimístného čísla zadal stejné číslo zaokrouhlené pouze na tři místa. Tento rozdíl je malý a neměl by mít prakticky na řešení vliv (představte si rozdíl v povrchové teplotě tělesa lišící se o 1 deseti-tisícinu stupně, když běžně teplotu vzduchu na meteorologických stanicích měříme s přesností na $\pm 0,1^\circ\text{C}$, tedy o 3 řády méně přesně). Nicméně Lorenz zjistil, že malé změny v počátečních podmínkách vedou k velkým změnám na výstupu z dlouhodobého hlediska, jak dokresluje obr. 2.1. Tato zdánlivě zanedbatelná změna vstupních parametrů zásadně proměnila chování celku což odporovalo intuici. Předpoklad, že druhý výsledek bude stejný jako první, že drobné odchylky se časem „ztratí“ najednou prostě neplatil.

Křivka vykreslovaná programem se oproti prvnímu průběhu odchýlila nečekaně silně. Objev se stal jedním ze základních stavebních kamenů teorie chaosu. Lorenz dokázal, že chování složitých nelineárních dynamických systémů je silně závislé na výchozích podmínkách. Prvním jeho objevem bylo, že se žádný průběh simulace neopakoval dvakrát přesně stejně, přestože zadával vždy stejné hodnoty. I přesto však systém vykazoval překvapivě podobné vzorce chování. Byl to uspořádaný nepořádek – chaos.

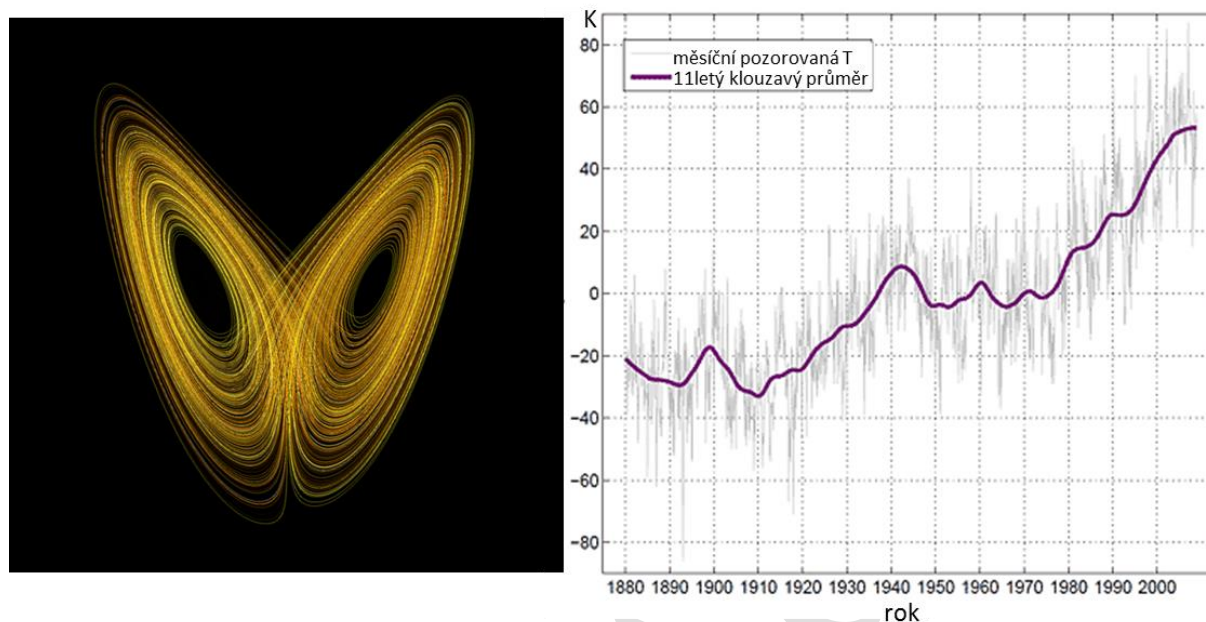


Obr. 2.1: Příklad divergujících hodnot dvou běhů Lorenzova jednoduchého klimatického modelu. Vertikální linie značí jednotlivé dny. (Původní Lorenzova prezentace z r. 1961).

Samotný termín „chaos“, jak je používán v matematice, byl poprvé použit aplikovaným matematikem Jamesem A. Yorkem, který si mj. jako jeden z prvních uvědomil význam Lorenzovi práce. Nejznámější metaforou kterou často v souvislosti s „chaosem“ v klimatickém systému slyšíme je tzv. efekt motýlích křídel. Tento pojem poprvé použil Edward Lorenz 29. prosince 1979 na své přednášce "Predictability: Does the flap of the butterfly's wings in Brazil set off a tornado in Texas?" přednesené na zasedání Americké asociace pro pokrok ve vědě ve Washingtonu. Pro meteorology, kteří se chystali díky superpočítačům stoprocentně předvídat, či dokonce ovládat počasí, to byl šok, ale pro vědu – matematiku, fyziku i filozofii – to byl nový přínosný pohled. Když se teorie chaosu aplikovala i na jiné systémy, znamenala přehodnocení řady dalších odvětví, která jsou na předpověditelnosti budoucího chování systémů založena. V praxi samozřejmě většinou dojde k vyrušení malé nerovnováhy zapříčiněné např. právě pohybem motýlích křídel jinými podobnými procesy – samotný fakt vysoké citlivosti systému ale výrazně mění uvažování o charakteru přírodních systémů o zákonitostech, pravděpodobnosti a náhodě. A tady se můžeme vrátit ke kyvadlu, které jsme si na úvod uvedly jako symbol deterministického modelu světa. Pokud totiž zkonstruujeme zdvojené kyvadlo kdy jedno kyvadlo je připevněno na konec druhého zjistíme, že rovnice pohybu dvojitého kyvadla pro velké kmity jsou nelineární, a pohyb je zcela nepravidelný a velmi citlivý vůči počátečním podmínkám.

Deterministicky chaotický systém se ovšem nechová náhodně (pouze nepředvídatelně), ale jeho stav se vyvíjí dle jasných a přesných pravidel, ale přitom vykazuje vysoce nepředvídatelné a neuspořádané chování (obr. 2.2). Systém sám se náhodně nechová, tedy platí že absolutně stejné podmínky vedou

vždy ke stejnému výsledku. Na druhou stranu i nepatrná změna počátečních podmínek může (ale také nemusí) znamenat naprosto odlišné chování, takže je těžké a v praxi (kvůli nepřesnosti měření, která existuje vždy) dokonce nemožné předvídat chování tohoto systému.



Obr. 2.2: Vlevo: Tzv. Lorenzův atraktor popisuje pohyb systému ve stavovém prostoru. Zde pro počáteční hodnoty $r = 28$, $\sigma = 10$, $b = 8/3$. Nejde jen o výstižné grafické znázornění abstraktního matematického problému, ale i ideální demonstraci “uspořádané neuspořádanosti” deterministického chaosu. Zdroj: http://cs.wikipedia.org/wiki/Teorie_chaosu#/media/File:Lorenz_system_r28_s10_b2-6666.png; Vpravo: ukázka anomálie globální průměrné teploty (od průměru 1951-1980) vyjádřená v desetínách stupně Celsia na základě databáze GHCN & HADISST1. Fialová linie představuje 11-letý průměr. Zdroj: <http://www.skepticalscience.com/print.php?r=134>

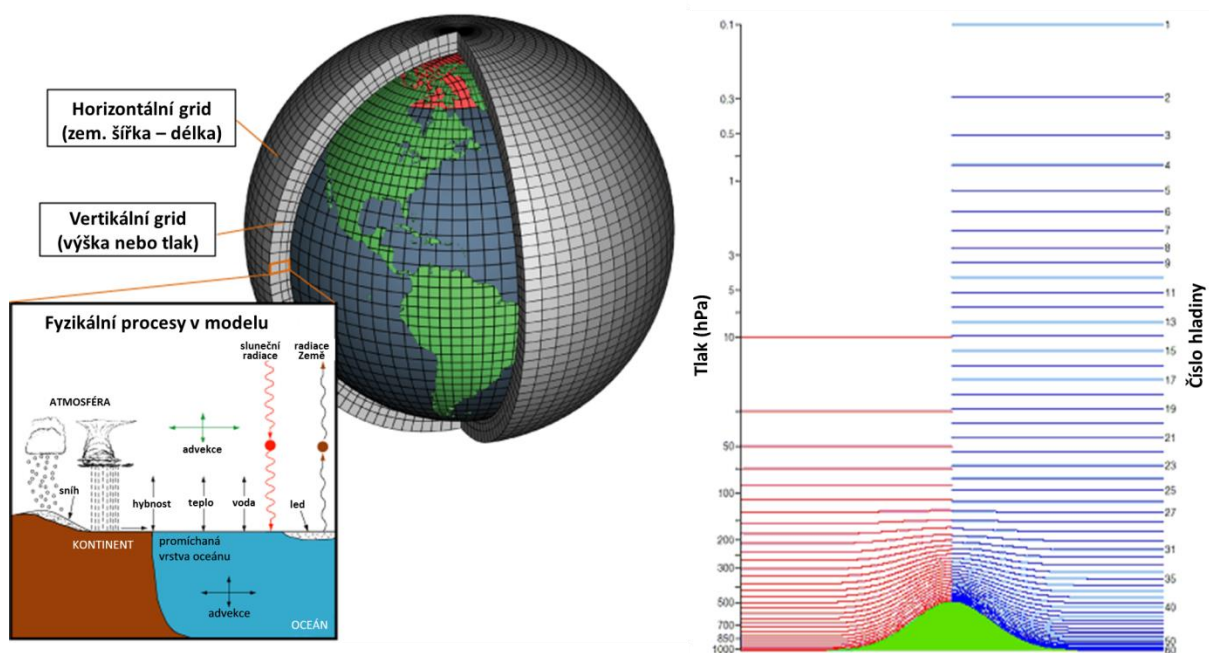
Otázka ovšem je, zda v deterministicky chaotickém systému, kterým klimatický systém naší planety je, lze provádět projekce v delším časovém období. Pokud totiž chod počasí má deterministicky chaotickou povahu, pak by ho podle některých názorů mělo mít i klima, které je dlouhodobým “stavem” počasí. Tento pohled se zdá logický a aplikujeme-li ho na naši současnou situaci a potřebu modelovat chování klimatického systému naší planety, abychom dokázali porozumět budoucím změnám, jeví se celá myšlenka klimatického modelování jako slepá ulička. Všichni ze zkušenosti vědí, že chod počasí je jak chaotický tak silně sezónní. Teplota vzduchu prochází významnými změnami, někdy nepředvídatelně, i o více než 20 °C, v daném místě během několika dní. Nicméně ačkoliv je celý klimatický systém nelineární, klima je přesto poměrně předvídatelné v horizontu desítek až stovek let. Je tomu tak proto, že mezi procesy, které ovlivňují chod počasí a klimatu, je řada zásadních rozdílů, které ovlivňují jejich předvídatelnost. Když Edward Lorenz studoval chování stoupajícího teplého vzduchu v atmosféře pomocí soustavy nelineárních rovnic, zjistil, že pro určité hodnoty parametrů je celkový pohyb vzduchu nepředvídatelný. Největším překvapením bylo, že na malé změny v počátečních podmínkách systém reaguje nepředvídatelně. To je podstatou deterministického chaosu a příčinou současného stavu, kdy nejsme schopni předpovědět počasí na více než cca 10-dní dopředu. Nicméně, zhodnotíme-li obr. 2.2 a obě křivky na grafu vpravo podrobněji, zjistíme, že zatímco měsíční globální teploty mají vskutku těžko předvídatelný průběh, dlouhodobá tendence je ale zřejmá. V časovém horizontu desítek let má totiž každý planetární objekt

průměrnou teplotu danou především silou své hvězdy podle zákona Stefan- Boltzmann v kombinaci se skleníkovým efektem (detailněji viz kap. 3.1). Pokud by nárůst a pokles koncentrace CO₂ či dalších skleníkových plynů byl chaotický tj. koncentrace by se mohla rychle snižovat a zvyšovat, pak by klima mohlo mít chaotický a nepředvídatelný průběh. Pokud oběžná dráha Země byla ovlivňována např. Měsícem o srovnatelné hmotnosti k samotné hmotnosti naší planety, pak by změny v oběžné dráze opět mohly vést k chaotickému klimatu. Ale ve skutečnosti je Země vůči Měsíci výrazně větší a Měsíc tak stabilizuje její rotační osu. Stejně tak trend nárůstu koncentrace CO₂ v atmosféře chaotický není (viz. kap. 4). Proto ačkoliv průběh počasí chaotický je (daný vlastnostmi klimatického systému zejména přítomností nelineárních procesů jako je turbulentní transfer tepla), průběh klimatu je v zásadě předvídatelný díky jasným a přímočarým fyzikálním zákonitostem, které svazují energetickou bilanci naší Země v delším časovém horizontu. A proto má smysl modelovat reakci klimatu na vnější podněty měnící tyto dlouhodobě působící fyzikální parametry v horizontu desítek, stovek i tisíců let.

2.2. Klimatické modelování a globální klimatické (cirkulační) modely (GCM)

První numerický model počasí vytvořil britský matematik Lewis Fry Richardson, který byl během 1. světové války odveden ke zdravotnické jednotce a ve volných chvílích uskutečnil první šestihodinovou numerickou předpověď počasí. Samotný výpočet trval šest měsíců (tedy předpověď vydal o cca 180 dní později), což bylo i v tehdejších podmínkách možné zrychlit distribucí výpočtu mezi dostatečný počet matematiků provádějících výpočty synchronně, ale samotný výsledek předpovědi nebyl příliš uspokojivý. Nicméně jeho základní metody byly v zásadě správné a používají se dodnes. Faktem je, že zásadním způsobem předběhl svoji dobu, protože první funkční předpověď na počítači vznikla teprve o čtyřicet let později. Dnešní předpovědi počasí i klimatické modely staví na výsledcích prací meteorologů, klimatologů, matematiků a fyziků, nicméně původní "mentální model", tak jak ho své době používal zakladatel moderní předpovědi počasí Wilhelm Bjerknes, nahradily počítačové modely. Ty ve své podstatě obsahují po generace získávané poznatky o klimatickém systému formulované v podobě matematických rovnic. K předpovědi počasí byť jen na několik dní dopředu musí model pokrývat celou zeměkouli (a tím spíše chceme-li předvídat klimatické podmínky). V globálním předpovědním modelu jsou parametry (tlak, teplota, vlhkost, vítr aj.), jež jsou potřebné k popsání stavu atmosféry, zadávány v síti uzlových bodů (obr. 2.3), které pokrývají celou zeměkouli. Vzdálenost mezi těmito body není u všech modelů stejná. Ve vertikálním směru bývá většinou kolem desítek až tisíců metrů, km, v horizontálním směru desítky až stovky kilometrů. Tato vzdálenost je v zásadě omezena výkonností počítače, ale i našim znalosti.

Nejpoužívanější typ klimatických modelů jsou modely všeobecné cirkulace atmosféry spojené s modelem oceánu. Často se používá zkratka GCM, což označuje buď „*general circulation model*“ anebo „*global climate model*“. Jedná se o počítačové modely klimatického systému. Jsou založeny na řešení pohybových a termodynamických rovnic, které popisují procesy v klimatickém systému, pomocí metod numerické matematiky. Jelikož řešení těchto rovnic je výpočetně velice náročné, k realizaci GCM je nutné použít ty nejrychlejší superpočítače, které jsou v dnešní době k dispozici. Numerické řešení rovnic probíhá v síti tzv. gridových (uzlových) bodů a v různých vertikálních hladinách (obr. 2.3). Vzájemná horizontální vzdálenost uzlových bodů určuje horizontální rozlišení modelu.

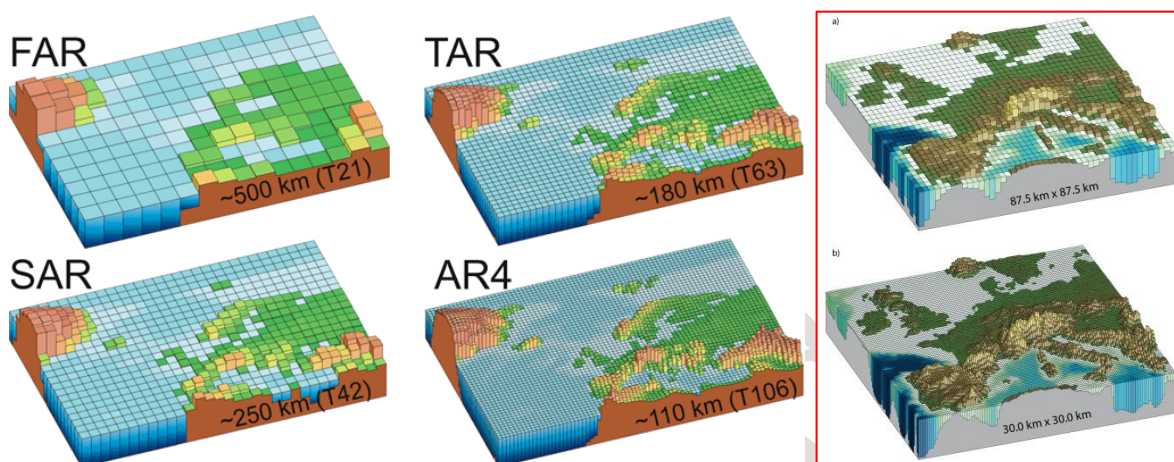


Obr. 2.3: Ukázka gridové sítě globálního cirkulačního modelu (vlevo) a horizontálních vrstev modelu (vpravo). Pokud jde o vertikální členění, povšimněte si, že žádná z vrstev neprotíná zemský povrch a sleduje hladinu tlaku vzduchu nikoliv nadmořskou výšku. Tím je zaručeno, že počet gridů je v každé horizontální vrstvě stejný.

Mají-li být modelové předpovědi úspěšné, musí zahrnovat patřičný popis zpětných vazeb. Zpětná vazba, spojená s vodní párou a jejím geografickým rozložením, závisí na detailních procesech vypařování, kondenzace a advekce, a také na konvekci. Tyto procesy jsou ovlivňovány vyšší teplotou povrchu. Všechny tyto jevy jsou již dostatečně zahrnuty v modelech pro předpověď počasí. Nejdůležitější z ostatních zpětných vazeb je zpětná vazba spojená s oblačností a zpětná vazba oceánského proudění. Modely pro předpověď počasí a většina klimatických modelů zatím používají poměrně jednoduchá schémata k začlenění vlivu oblaků. Typický model například umožňuje uvažovat tři druhy oblaků (nízké, střední, vysoké), z nichž každý má předepsané hodnoty odrazivosti a propustnosti vůči záření. Pro oblak, který je výsledkem atmosférických pohybů velkého měřítka, je přítomnost anebo nepřítomnost oblaku v modelu určena tzv. prahovou hodnotou vlhkosti. Je-li relativní vlhkost vzduchu nad prahovou hodnotou (obvykle kolem 90 %), považuje se oblak za existující; je-li vlhkost pod touto hodnotou, oblak se v modelu nevytvoří. Hodnota prahové vlhkosti se může stanovit experimentálně, abychom zajistili, že průměrná oblačnost se modeluje přibližně stejně jako ve skutečné atmosféře. Pro popis tvorby a vývoje konvektivní oblačnosti je třeba do modelu zahrnout zvláštní parametrizaci, tzv. konvektivní schéma. Neúplnost znalostí o zmíněné vazbě představuje v modelových předpovědích největší nejistotu.

Druhou důležitou zpětnou vazbou je vazba spojená s cirkulací v oceánech. Ve srovnání s globálním atmosférickým modelem je nejobtížnějším problémem při formulaci klimatického modelu zahrnutí vlivu oceánů. První modely, které zahrnovaly pouze povrchovou vrstvu oceánu, měly velmi omezené možnosti. Ke shodnějšímu popisu vlivu oceánů je nutné modelovat cirkulaci v oceánech a tento model propojit s modelem atmosférické cirkulace. Aby bylo možné současnou výpočetní technikou realizovat výpočty, nemohou být vzdálenosti mezi uzlovými body v horizontálním směru menší než asi 300 km.

Mezi oceánem a atmosférou dochází k výměně tepla, vody a ke tření. Sladká voda, jež vypadává z oblaků ve formě srážek, má na proudění oceánu také vliv – ovlivňuje rozložení soli, což ovlivňuje hustotu vody oceánu. Proto je klima popsáno modelem velice citlivé k velikosti a lokalizaci výměny tepla vody na rozhraní oceánu a atmosféry. Modely, pokud jde o interakci oceánů a atmosféry, prošly intenzivním kvalitativním vývojem. Zpočátku byl oceán simulován jako „bažina“ tedy v zásadě jako pevný zemský povrch s neomezenou zásobou vody pro výpar. Následně přišly verze modelů, které uvažovaly procesy v oceánu do hloubek několika desítek metrů až po současné modely, ve kterých došlo ke sprázení atmosférické a oceánské cirkulace.



Obr. 2.4: Vlevo: Rozlišení klimatických modelů používaných hodnotícími zprávami IPCC: FAR (IPCC, 1990), SAR (IPCC, 1996), TAR (IPCC, 2001a), a AR4 (2007). Uvedené demonstrují rozlišení modelů na příkladu Evropy. Vpravo: v červeném rámečku nahoře je ukázka téhož regionu v rozlišení poslední AR5 zprávy (2013) a dole pak rozlišení vyvíjených modelů s vysokým rozlišením cca 30 km. Zdroj: IPCC-WG1 (2007) a IPCC-WG1 (2013).

Vzdálenosti jednotlivých vertikálních vrstev určují vertikální rozlišení modelu (obr. 2.3). Typicky mívají dnešní GCM 25-40 hladin v atmosféře a 20-30 hladin v oceánu (ale tyto parametry se postupem času mění a rozlišení se daří zvyšovat). Horizontální rozlišení pak dosti zásadně ovlivňuje regionální použitelnost modelu, jak ukazuje obr. 2.4. V modelech používaných pro zprávu IPCC v roce 2007 se rozlišení pohybovalo mezi 2-4° zeměpisné šířky/délky v atmosférické části modelu, v oceánské části bylo toto rozlišení zpravidla větší, 0,5-1°. V případě poslední zprávy (modely experimentu CMIP5 pro zprávu IPCC 2013) mají toto rozlišení větší a experimentuje se s modely o rozlišení cca 30 km, přičemž efekt na realističnost reprezentace povrchu je zřejmá z obr. 2.4.

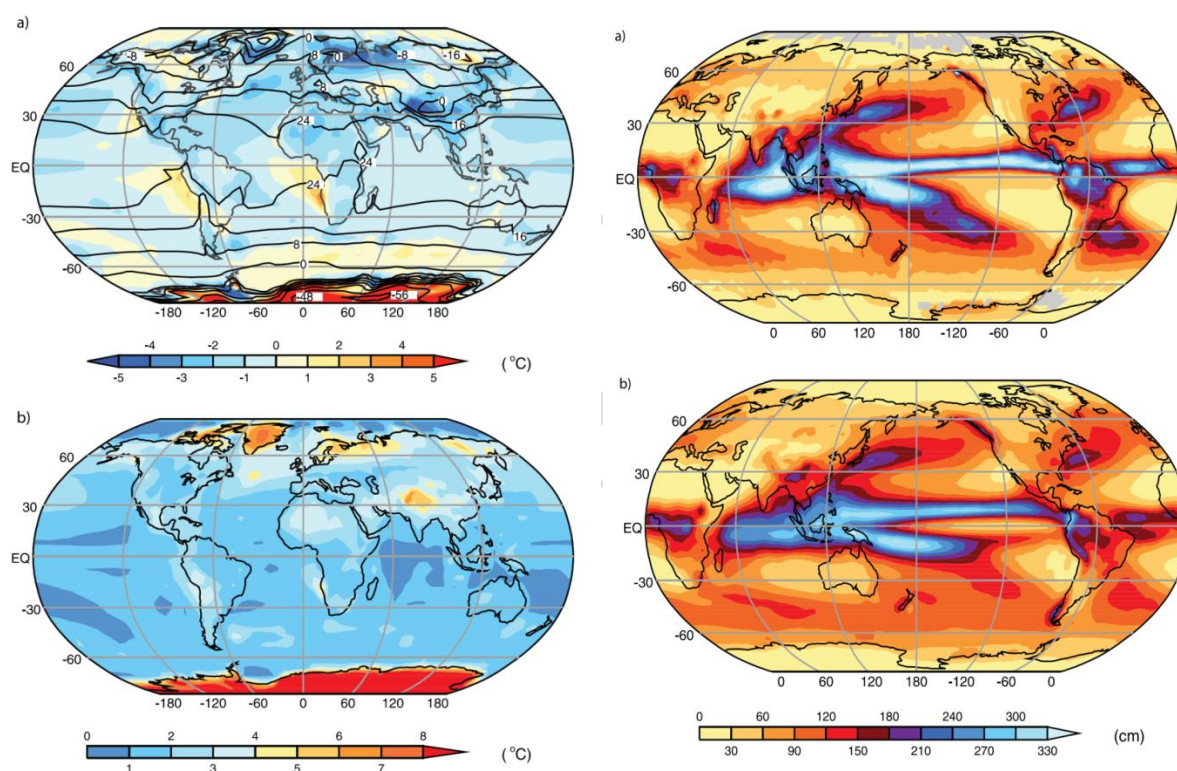
Model pochopitelně dokáže zachytit pouze procesy probíhající v měřítcích větších než je jeho prostorové rozlišení. Pro procesy menšího měřítka je nutné používat výše uvedené parametrizace, tedy vyjádřit tyto procesy pomocí velkoprostorových veličin na základě empirických nebo semi-empirických vztahů (viz výše uvedený příklad modelování oblačnosti, konvektivní činnost a s ní související srážky či bouřková činnost lokálního/regionálního rozsahu). Každý globální klimatický model se skládá z několika samostatných částí – modelu atmosféry, oceánu, příp. biosféry, mořského ledu, uhlíkového cyklu a dalších. Tyto části jsou navzájem propojeny. Experimenty prováděné s GCM se dělí podle předepisovaných vnějších podnětů. Pro odhady změn klimatu v budoucnu jsou důležité dva typy modelových běhů. Základním experimentem je historický běh, kdy se modelu předepisují v minulosti pozorované vnější podněty. Tyto simulace se používají pro validaci klimatických modelů, kdy se výsledky modelů porovnávají s pozorovanými hodnotami klimatických

veličin. Většinou se provádějí pro 2. polovinu 20. století, protože z této doby máme k dispozici dostatečně kvalitní a podrobná validační data.

2.3. Validace modelu

Po sestavení modelu bývá jeho schopnost předpovídat ověřena testy (tzv. validací). Ta se provádí třemi způsoby.

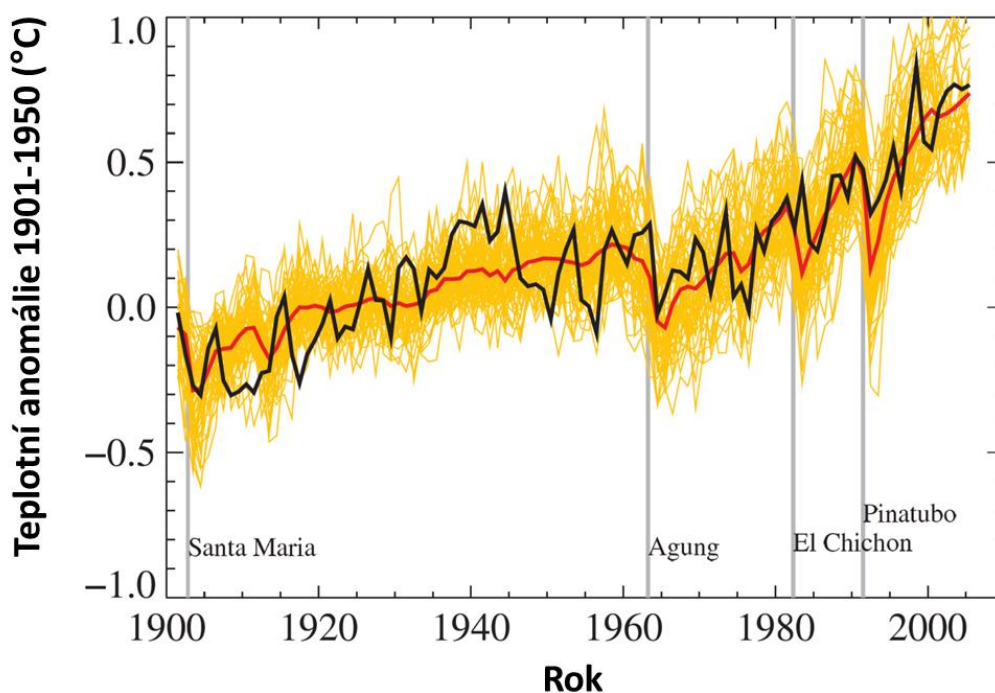
Za prvé může model počítat po dobu několika let a klima jím vytvořené je detailně srovnáváno se současným klimatem. Aby model vyhovoval, musí se sezónní rozdělení a proměnlivost příslušných parametrů, jako je teplota, tlak vzduchu, srážky, shodovat s pozorovanými hodnotami. Současné klimatické modely, které se používají pro předpovědi, při takových zkouškách dobře obstály. To ukazují obr. 2.5, které na příkladu pole teplot a srážek ukazují schopnost modelů poměrně věrně reprodukovat klimatické podmínky na naší planetě.



Obr. 2.5: Vlevo: a) odchylka pozorovaná povrchové teploty oceánu a přízemní vrstvy atmosféry nad pevninou od průměru modelů použitých v AR4 (2007). Izolinie ukazují absolutní hodnoty pozorovaných teplot; b) typická chyba modelu vyjádřená jako střední kvadratická chyba modelu; Vpravo: a) průměrná roční suma srážek v cm na základě pozorovaných a b) modelového průměru simulovaných dat

Druhým způsobem je porovnání modelu s paleoklimatickými informacemi – podmínkami značně odlišnými od současnosti. Například se může použít období před 9 000 lety, kdy byly jiné minimální a maximální vzdálenosti od Slunce a náklon osy Země. Díky těmto odlišnostem existovaly významné rozdíly v distribuci slunečního záření během celého roku. V průměru bylo množství energie v červenci dodávané Sluncem asi o 7 % vyšší. Zabudují-li se změněné parametry do modelu, je výsledkem odlišné klima. Tyto simulované změny dobře souhlasí s paleoklimatickými údaji.

Třetí způsob, kterým se mohou modely ověřovat, je jejich použití k předpovídání účinku velkých poruch na klima. Bylo tak docíleno např. pokroku v předpovědích jevu El Nino až na jeden rok dopředu. Jiné krátkodobé poruchy jsou vyvolány sopečnými výbuchy. Několik běhů modelů bylo zrealizováno, při nichž bylo množství slunečního záření procházejícího atmosférou změněno tak, aby bylo možné popsat vliv sopečného prachu z filipínské sopky Pinatubo, která vybuchla v roce 1991, ale i dalších sopečných výbuchů. Po každém takovém výbuchu ve 20. století následovaly klimatické anomálie, například velmi chladné zimy na Středním východě a mírné zimy v západní Evropě; modelování těchto výkyvů bylo úspěšné (viz. obr. 2.6).

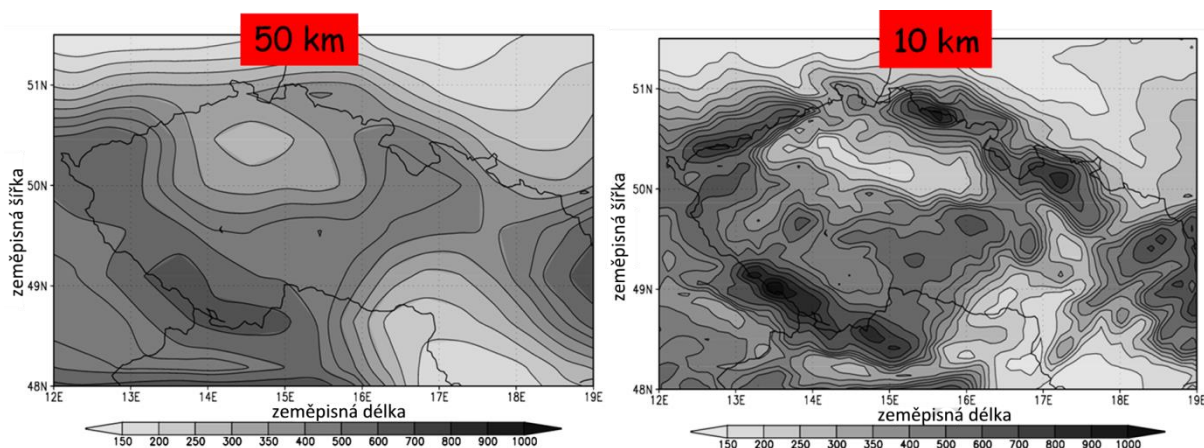


Obr. 2.6: Průměrná globální teplota v blízkosti povrchu v průběhu 20. století na základě pozorovaných dat (černě) a 58 simulací 14 různých globálních cirkulačních modelů s vlivem kolísání přirozených faktorů (sluneční záření i sopečné výbuchy) a nárůstem koncentrace radiačně aktivních plynů (žluté křivky). Průměrná hodnota všech běhů je shrnuta červenou linií. Vertikální šedé linie indikují časy hlavních sopečných erupcí, které ovlivnily klima v průběhu 20. století. Zdroj: IPCC WG I, 2007.

2.4. Regionální klimatické modely (GCM)

Vzhledem k poměrně hrubému prostorovému rozlišení nedokáží GCM věrně simulovat klima v regionálním měřítku. Proto se používají techniky tzv. downscalingu, tedy zmenšování měřítka. Jednou z možností, jak získat informace o klimatických charakteristikách na menších měřítkách než je to možné u GCM jsou regionální klimatické modely (RCM). Jedná se o modely atmosféry, podobné jako atmosférická část GCM, ovšem výpočet v tomto případě neprobíhá pro celou planetu Zemi, ale pouze na omezené oblasti (domény), např. pro území Střední Evropy. Tím je umožněno dosáhnout s danou výpočetní kapacitou většího rozlišení modelu, které se v současnosti pohybuje od 50 do 10 km (a dokonce i méně). Význam vyššího rozlišení regionálních cirkulačních modelů demonstruje příklad výškopisu ČR právě v rozlišení 50 a 10 km (obr. 2.7), přičemž nejlepší RCM model dostupný pro ČR

pracuje právě s rozlišení 10 km. Hodnoty veličin na okrajích modelové domény, tzv. okrajové podmínky, jsou převzaty z některého globálního modelu (tzv. řídicí GCM). V oblasti klimatického modelování probíhá v posledních desetiletích překotný vývoj.



Obr. 2.7: Ukázka výškopisu ČR na základě gridové sítě 50 a 10 km. Zdroj: Halenka et al., projekt CECILIA - <http://www.cecilia-eu.org/>

Příkladem mohou být mezinárodní projekty, které se v posledních několika letech řešily v Evropě a byly zaměřeny na regionální klimatické modely. Jedná se o projekty ENSEMBLES (<http://ensembles-eu.metoffice.com/>), v roce 2005 dokončený projekt PRUDENCE (<http://prudence.dmi.dk/>) či v současnosti probíhající experiment EURO-CORDEX (WCRP-CORDEX, 2009). Odkazy na mnohé další podobné projekty z různých oblastí světa lze nalézt na internetových stránkách projektu CLIVAR (<http://www.clivar.org/>). Mezinárodní spolupráce umožnila mj. srovnání modelů a jejich následné zlepšení, a analýzu a vyhodnocení rozsahu neurčitostí v jejich výstupech. V České republice se problematice modelování klimatu věnují zejména tři instituce, a to Český hydrometeorologický ústav, Katedra meteorologie a klimatologie Matematicko-fyzikální fakulty Univerzity Karlovy a nově i Centrum výzkumu globální změny AV ČR, které se svými regionálními projekty účastnily několika mezinárodních projektů. Vyhodnocování a analýze výstupů GCM a RCM se věnují i další vědecké instituce, např. již zmíněné Centrum výzkumu globální změny (www.czechglobe.cz) a Ústav fyziky atmosféry (obě instituce patří mezi ústavy Akademie věd ČR).

2.5. Nejistoty výstupů klimatických modelů

Simulace klimatických modelů (GCM i RCM) jsou zatíženy celou řadou nejistot. Tyto neurčitosti vyplývají z několika zdrojů, zejména se jedná o zadávání počátečních a okrajových podmínek, použití parametrizací a vlastní strukturu modelů (např. numerické metody použité pro řešení rovnic nebo prostorové rozlišení). Nejistoty v modelových simulacích lze analyzovat pomocí souborů (tzv. ansámblů) více modelových běhů (např. CMIP5). Např. pro odhad nejistoty pramenící z počátečních podmínek používáme soubory modelových běhů, z nichž každý má nadefinován mírně pozměněný výchozí stav. Dalším příkladem jsou soubory simulací jednoho modelu s pozměněnými parametrizačními schémata, na jejichž základě vyhodnocujeme neurčitost spojenou s právě s použitím fyzikálních parametrizací.

Při použití modelových simulací pro tvorbu scénářů budoucí změny klimatu se k vyjmenovaným zdrojům nejistot přidává další, a to je naše neznalost vývoje přirozených i antropogenních faktorů ovlivňujících klima. Vliv přirozených faktorů, zejména velkých sopečných erupcí a změn intenzity sluneční činnosti není v modelových simulacích budoucího klimatu běžně zohledňován. Je ale

Autoři: Trnka M., Žalud Z., Hlavinka P, Bartošová L a kol.

nepravděpodobné, že v globálním měřítku by tyto přirozené vlivy na klima zcela potlačily antropogenní vlivy. Ty zahrnují zejména emise skleníkových plynů a aerosolů a změny ve využívání povrchu. Nejistota v budoucím vývoji emisí skleníkových plynů a aerosolů vedla IPCC k vytvoření sady emisních scénářů, označovaných jako SRES a RCP scénáře (viz další kapitoly).

Literatura:

Gleick J., 1996: Chaos, vznik nové vědy. Brno, 350p.

Kuro-šio Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Marquis, M., Averyt, K., Tignor, M. M. B., Leroy Miller, H., Chen, Z. (Eds.), IPCC 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge United Kingdom and New York, NY, USA 996 p.

Metelka, L., Tolasz, R. (2009): Klimatické změny: fakta bez mýtů. Univerzita Karlova v Praze, Centrum pro otázky životního prostředí, Praha, 35 s.

Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.) Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. (český překlad)

http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/ok/klimazmena/files/cc_chap07.pdf