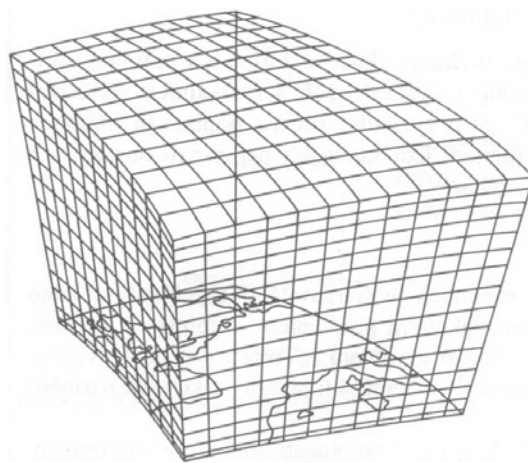


## Klimatické modely a jejich systematické chyby

Chceme-li zkoumat reakci hydrologického systému na změnu klimatických podmínek, potřebujeme k tomu odhad hodnot meteorologických veličin (srážek, teplot atd.) v budoucnu. S využitím těchto hodnot a známých zákonitostí oběhu vody v přírodě je pak možno modelovat chování celého systému. Odhady budoucích hodnot nám poskytuje klimatický model, který matematicky popisuje fyzikální a chemické děje probíhající v klimatickém systému. Model má několik samostatných částí, standardně jde o model atmosféry, model oceánu, model ledu, model biosféry a soustavu chemických modelů. Stěžejní výpočetní částí je model cirkulace atmosféry.

### Model cirkulace atmosféry

Cirkulace atmosféry je spojitý proces, při kterém se hodnoty jednotlivých veličin (rychlost proudění, tlak, teplota a vlhkost vzduchu) v čase a prostoru kontinuálně mění. Takovéto procesy bývají popsány pomocí rovnic, kterým říkáme diferenciální. Základem modelu cirkulace atmosféry je soustava diferenciálních rovnic, která tvoří tzv. dynamické jádro modelu. Zásadním problémem je skutečnost, že současná matematika neumí tuto soustavu vyřešit, tzn. neumí ze soustavy odvodit analytický předpis, pomocí kterého by šlo jednoduše spočítat hodnoty jednotlivých veličin v čase a prostoru. Namísto obecně platného analytického řešení se musíme spokojit s tím, že pro konkrétní zadání úlohy odhadujeme číselné hodnoty hledaných veličin pomocí metod tzv. numerické matematiky. Numerické řešení úzce souvisí s chybami klimatických modelů, proto ho rozebereme detailněji.



Obr. 1 Část výpočetní sítě klimatického modelu.  
(Houghton, J. 1998: Globální oteplování, Academia)

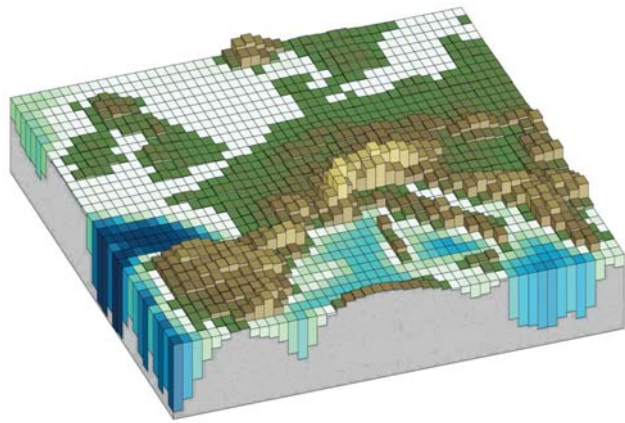
Diferenciální rovnice popisují, jak se zkoumaná veličina (rychlost, tlak...) vyvíjí na nekonečně malém prostorovém nebo časovém úseku. Principem numerického řešení je zvětšení tohoto limitně malého úseku na konečný. V prostoru se vytvoří síť vzájemně propojených bodů vzdálených od sebe o tyto konečné úseky a přibližné řešení hledáme v uzlech této sítě. Aníž bychom zacházeli do podrobností, doplňme, že v průběhu výpočtu každý uzel sítě vygeneruje jednu lineární rovnici. Tím vznikne soustava lineárních rovnic, kterou již vypočítat umíme a dostaneme tak hodnoty veličin v uzlových bodech sítě. K jejímu řešení jsou využívány počítače.

#### Klima versus počasí

Předpovídat hodnoty meteorologických veličin je úkol podobný předpovědi počasí a klimatické modely také mají s modely používanými pro předpověď počasí mnoho společného. Odtud také pochází častá námitka – jak chtějí vědci modelovat klima na desetiletí dopředu, když nejsou schopni předpovědět počasí na pár dní? Ta ale pramení z nepochopení rozdílu mezi podnebím (klimatem) a počasím. Počasí je aktuální stav atmosféry na určitém místě, rychle se mění a jeho relativně přesná předpověď je skutečně možná pouze v horizontu několika dní. Klima je dlouhodobý charakter počasí a jeho změny probíhají pozvolna. Cílem modelování klimatu tedy není kopírovat skutečný průběh počasí den po dni, ale vystihnout jeho dlouhodobý vývoj.

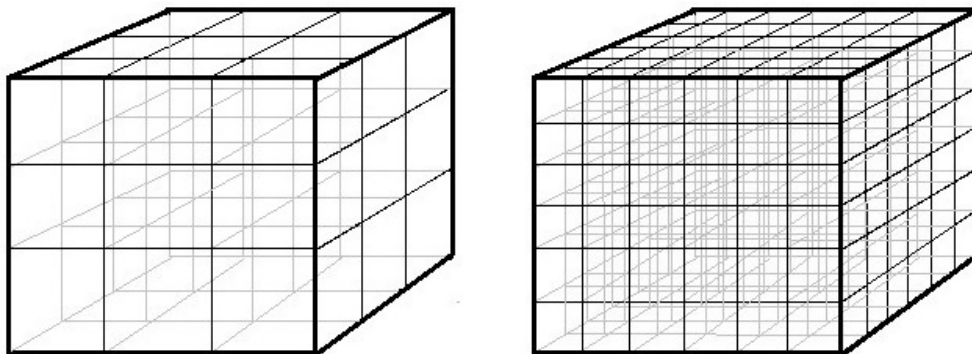
## Kde vzniká chyba modelu?

Model cirkulace atmosféry produkuje dobré výsledky při výpočtu pohybu vzduchových mas ve volné atmosféře. Problém ale nastává u zemského povrchu. Zvolená vzdálenost uzlů výpočetní sítě totiž určuje prostorové rozlišení modelu. Zemský povrch je tedy modelem reprezentován zjednodušeně - příklad takového zjednodušení můžeme vidět na obrázku 2. To způsobuje, že meteorologické veličiny, které jsou výrazně ovlivněny lokální orografií, jsou modelem vystihnuty nedostatečně. Typickým příkladem jsou orografické srážky, kdy je vzduchová masa při horizontálním pohybu přes terénní nerovnost vytlačována vzhůru, což způsobuje její ochlazení a následnou kondenzaci vodních par, která vyústí ve srážku. Podobné procesy v malém měřítku model není schopen postihnout. Takovýchto dějů, které jsou ovlivněny lokální orografií nebo nastávají v atmosféře v menším měřítku, než je prostorové rozlišení modelu bychom našli více.



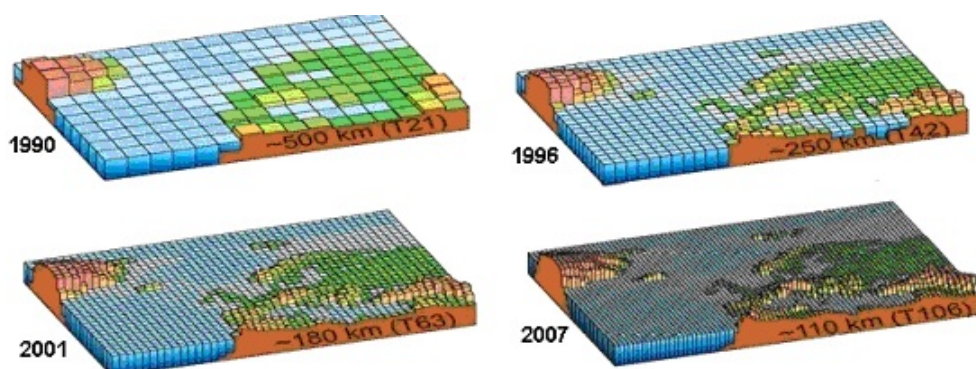
Obr. 2 Zjednodušená reprezentace zemského povrchu v klimatickém modelu. Obrázek je pouze ilustrační, prostorové rozlišení globálních modelů je ještě hrubší. (zdroj - <http://www.climateprediction.net>)

Zřejmě nás napadne, že bychom mohli zjemnit výpočetní krok modelu, abychom dosáhli realističtějšího vykreslení terénu a zachytili tak více lokálních procesů. Problémem je, že se zmenšením kroku modelové sítě velmi prudce rostou nároky na výpočetní výkon. Abychom si o této vzrůstající náročnosti udělali představu, vyjměme z výpočetní sítě modelu krychli, jejíž hrana má délku rovnou trojnásobku vzdálenosti uzlových bodů. Nákres této výpočetní sítě vidíte na obrázku 3 vlevo a můžeme jednoduše spočítat, že obsahuje 64 uzlových bodů. Pokud bychom chtěli dosáhnout přesnějších výsledků snížením vzdálenosti uzlů na polovinu, dostaneme síť zobrazenou na obrázku 3 vpravo. Ta již obsahuje 343 bodů. Pokud zůstaneme u příkladu s krychlí, pak po chvíli přemýšlení můžeme odvodit, že když počet uzlů v původní síti označíme  $n$  a následně  $k$ -krát zmenšíme vzdálenost mezi uzlovými body, počet uzlů v nově vytvořené síti bude  $((\sqrt[k]{n} - 1)k + 1)^3$ . Dosazováním si můžeme vyzkoušet, že počet bodů roste opravdu velmi rychle.



Obr. 3 Nákres výpočetní sítě při délce kroku jedné třetiny hrany krychle (vlevo) a jedné šestiny (vpravo).

Tento nárůst je samozřejmě způsoben tím, že modely pracují v trojrozměrném prostoru. Když vezmeme v úvahu, že výpočetní oblast globálních klimatických modelů (GCM) zahrnuje atmosféru kolem celé zeměkoule, je zřejmé, že ve snaze o detailní modelovou síť velmi rychle dojdeme na hranici možností současných počítačů. Dnešní globální modely pracují s prostorovým rozlišením cca 100 km (viz obr. 4).



Obr. 4 Vývoj prostorového rozlišení globálních klimatických modelů.  
(<http://scied.ucar.edu/longcontent/climate-modeling>)

### Korekce chyby

Pro korekci chyb modelů se v zásadě nabízí dva postupy. První spočívá ve zjemnění sítě, ovšem kvůli výpočetní náročnosti je nutné omezit modelovanou oblast. Vznikají tak modely regionální (RCM), pokrývající např. území Evropy. Regionální modely nemohou pracovat samostatně, ale pouze ve spojení s modelem globálním, od něhož dostávají informace o stavu atmosféry na hranicích své výpočetní oblasti, ve které pak provádějí podrobnější simulace.

Postup známý jako statistická korekce je založen na tom, že mezi hodnotami některých meteorologických veličin lze vypočítat jistou závislost. Například obsah vodních par ve vzduchu je ovlivňován jeho teplotou a rychlostí proudění, srážkové úhrny jsou zase v určitém vztahu s obsahem vodních par atd. Korekce pak spočívá v tom, že veličina, která je modelem simulována nekvalitně může být korigována pomocí jiných veličin, za předpokladu že tyto jsou modelem vystihnuty lépe a jsou s korigovanou veličinou v nějakém vztahu.

V praxi jsou oba přístupy kombinovány. Data z regionálních klimatických modelů jsou podrobena statistické korekci a teprve potom používána ve studiích, zkoumajících vliv klimatických změn.

KONTAKT  
ÚSTAV PRO HYDRODYNAMIKU AV ČR, v.v.i.  
Pod Paťankou 5, 166 12 Praha 6  
Ing. Jan Hnilica  
[www.ih.cas.cz](http://www.ih.cas.cz), e-mail: [hnilica@ih.cas.cz](mailto:hnilica@ih.cas.cz)  
tel.: 233 109 090; fax: 233 324 361