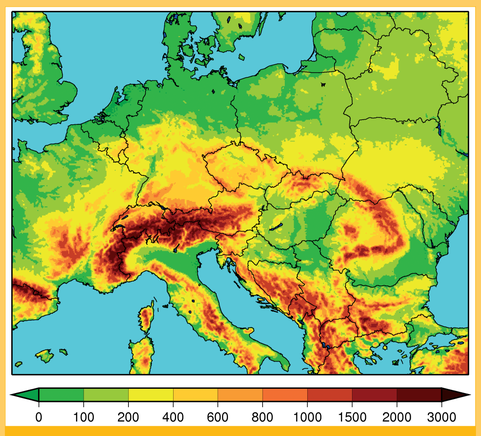
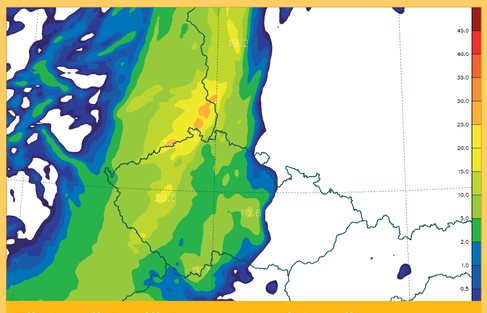
III JAK SPOČÍTAT POČASÍ
COMPUTING THE WEATHER

Do poloviny 20. století se předpovědi počasí dělaly převážně extrapolací pozorované skutečnosti. Teprve příchod počítačů umožnil nástup numerické předpovědi počasí pomocí modelů, které matematicky popisují fyzikální procesy vývoje atmosféry. Řešení modelových rovnic je realizováno na vysoce výkonných počítačích, které patří do vybavení každé moderní meteorologické služby.

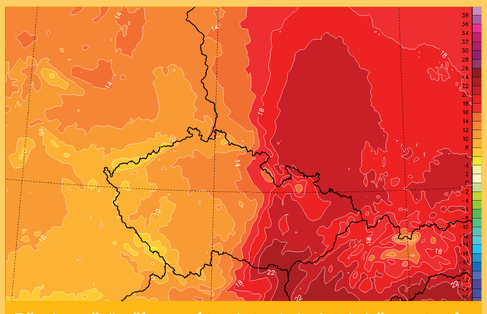
Oblast modelu ALADIN z globálního pohledu.



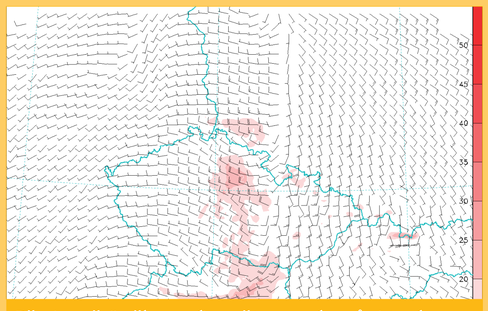
Oblast modelu v Lambertově mapě: pole orografie.



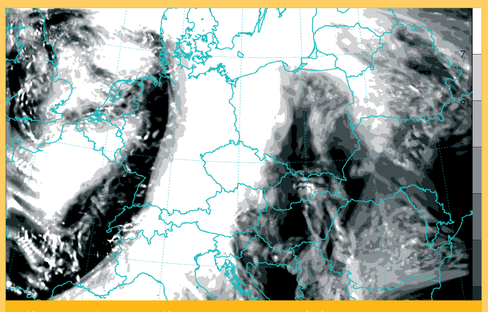
Předpověď srážek na studené frontě dne 18. 9. 2011 – úhrn v milimetrech za 6 hodin.



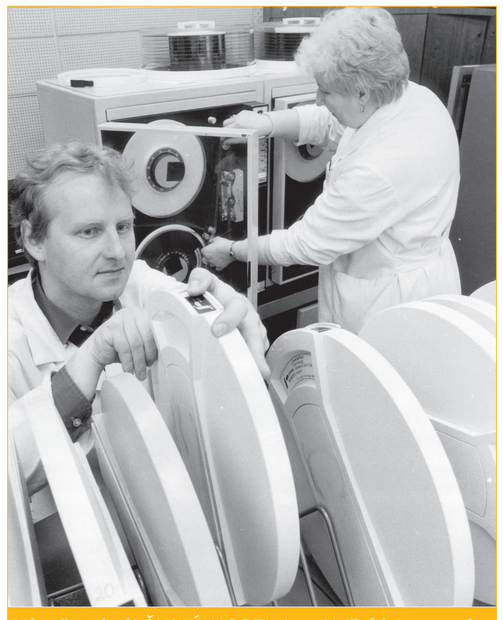
Předpověď přízemní teploty, kde je dobře patrný příliv studeného vzduchu od západu.



Předpověď přízemního větru a nárazů, které dosahují maxima na čele studené fronty.



Předpověď oblačnosti zachycující struktury atmosféry ve výpočetní oblasti s pásem výrazné studené fronty. Na východě v teplém vzduchu model předpovídá výškovou oblačnost a lokální bouřkovou oblačnost. Na západě je fronta ostře ohraničena projasněním oblohy díky silným sestupným pohybům vzduchu. Následuje oblačnost podružné studené fronty.



Výpočetní sál ČHMÚ (1985): Ing. Krištůfek a paní Šťastná zakládají pásky se staničními daty ke zpracování počítačem ADT.

Instalace prvního superpočítače pro model ALADIN v ČHMÚ. Vektorová platforma NEC-SX4 se třemi procesory a sdílenou pamětí byla provozována v letech 1998-2003. Teoretický výkon: 6 Gigaflops.

Dodávka superpočítače NEC-SX6. Tento typ se čtyřmi a později s osmi vektorovými procesory byl provozován od 2003 do 2009. Teoretický výkon: 64 Gigaflops.

Vektorový superpočítač v konfiguraci dvou uzlů s celkem 32 procesory o teoretickém výkonu 3,2 Teraflops. Každý uzel má 1 Terabyte sdílené paměti a navzájem je propojuje tzv. crossbar. V provozu sloužil v letech 2009-2017.

V ČHMÚ digitalizace zpracování meteorologických dat nabrala na intenzitě v 80. letech. Tehdy byl využit sálový počítač Robotron EC1055 a později EC1057 pro předchůdce modelu ALADIN, který byl vyvíjen ve spolupráci s Matematicko-fyzikální fakultou UK v Praze. První moderní superpočítač pro model ALADIN byl zprovozněn v roce 1998.

Model ALADIN

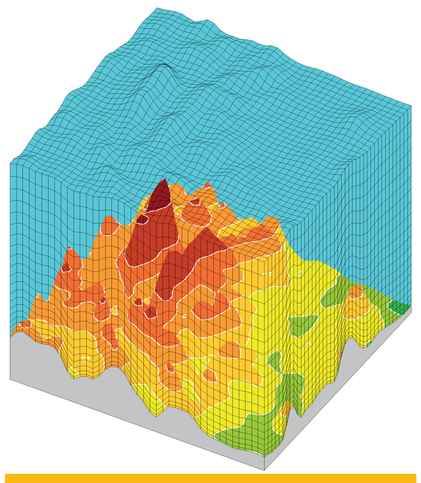
Model ALADIN (**A**ire **L**imitée **A**daptation dynamique **D**évéloppement **IN**ternational) je numerický předpovědní model počasí na omezené oblasti pro krátkodobou předpověď (tři dny) atmosférických procesů ve vysokém rozlišení. Model je vyvíjen od roku 1991 v mezinárodní spolupráci vedené francouzskou povětrnostní službou Météo-France. Dnes na modelu spolupracuje 16 zemí, včetně ČR. ALADIN je v ČHMÚ operativně počítán 4x za den na superpočítači NEC-LX.

NEC-LX má 320 výpočetních uzlů; každý z nich obsahuje dva procesory o 12 jádrech, tedy systém obsahuje celkem 7680 jader. Uzly jsou propojeny vysokorychlostní sítí Mellanox Infiniband EDR. Součástí systému je vysokorychlostní paralelní úložiště typu Lustre o kapacitě převyšující 1 Petabyte. Teoretický špičkový výkon je 270 Teraflops.

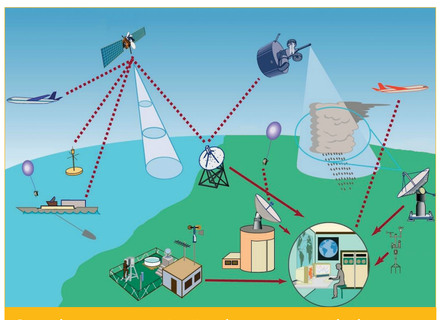
Model analyzuje stav atmosféry a předpovídá všechny její charakteristiky na 72 hodin. ALADIN má horizontální rozlišení početní mřížky 4,7 km (529x421 bodů). Ve vertikále je atmosféra popsána 87 hladinami, které u země kopírují terén a s výškou se „narovnávají“ do ploch se stejným tlakem.

Předpověď počasí má dvě podmínky. První z nich je znalost současného stavu. Na začátku předpovědi je vždy analýza všech dostupných pozorování v oblasti v uplynulých hodinách: ze stanic, balónových měření, letadel, lodí, meteorologických satelitů a radarů. Pozorování a jejich analýza také slouží ke zpětné verifikaci předpovědí a při vývoji nových verzí modelu atmosféry. Druhou podmínkou úspěchu předpovědi je realistický popis zákonů vývoje atmosféry, opírajících se o zachování hmoty, hybnosti, energie (a obtížnosti). Zákony jsou vyjádřeny rovnicemi, které řeší počítač. Řadu procesů v atmosféře je třeba parametrizovat – například nelze popsat dráhu každého fotonu nebo vznik jednotlivé dešťové kapky zvláštní rovnicí.

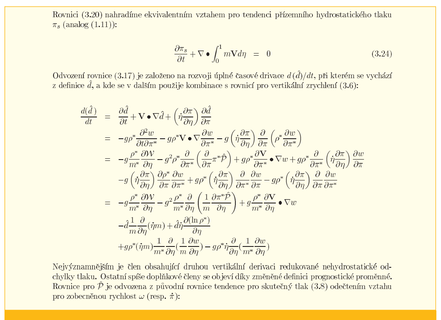
Předpověď je také závod s časem – ALADIN představuje 24 tisíc početních operací v každém bodě mřížky v jednom časovém kroku. Toto číslo odráží fyzikální komplexnost modelu. Díky pokroku výpočetní techniky a znalostí o atmosféře se objem početních operací zdvojnásobuje přibližně každých deset let.



Trojrozměrný pohled na výpočetní mřížku modelu – výřez v oblasti Tater.



Systém meteorologických pozorování.



Rovnici (3.20) nahradíme ekvivalentním vztahem pro tendenci přízemního hydrostatického tlaku π_s (analog (1.11)):

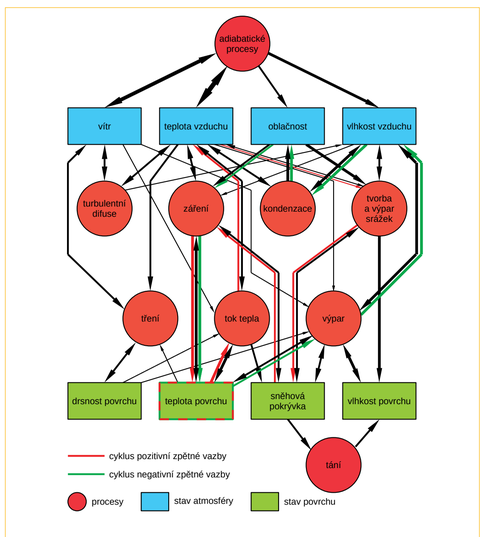
$$\frac{\partial \pi_s}{\partial t} + \nabla \cdot \int_0^1 m \mathbf{V} d\eta = 0 \qquad (3.21)$$

Odvození rovnice (3.17) je založeno na rozvoji úplné časové derivace $d(\hat{d})/dt$, při kterém se vychází z definice $\hat{d}$, a kde se v dalším použije kombinace s rovnicí pro vertikální zrychlení (3.6):

$$\begin{aligned}
\frac{d(\hat{d})}{dt} &= \frac{\partial \hat{d}}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla \hat{d} + \left(\dot{\eta}\frac{\partial \pi}{\partial \eta}\right)\frac{\partial \hat{d}}{\partial \pi} \\
&= -g\rho^* \frac{\partial^2 w}{\partial t \partial \pi^*} - g\rho^* \mathbf{V} \cdot \nabla \frac{\partial w}{\partial \pi^*} - g\left(\dot{\eta}\frac{\partial \pi}{\partial \eta}\right)\frac{\partial}{\partial \pi}\left(\rho^* \frac{\partial w}{\partial \pi^*}\right) \\
&= -g\frac{\rho^*}{m^*}\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial \eta} - g^2\rho^* \frac{\partial}{\partial \pi^*}\left(\frac{\partial}{\partial \pi^*}\pi^* \hat{P}\right) + g\rho^* \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial \pi^*} \cdot \nabla w + g\rho^* \frac{\partial}{\partial \pi^*}\left(\dot{\eta}\frac{\partial \pi}{\partial \eta}\right)\frac{\partial w}{\partial \pi} \\
&\quad -g\left(\dot{\eta}\frac{\partial \pi}{\partial \eta}\right)\frac{\partial \rho^*}{\partial \pi}\frac{\partial w}{\partial \pi^*} + g\rho^* \left(\dot{\eta}\frac{\partial \pi}{\partial \eta}\right)\frac{\partial}{\partial \pi^*}\frac{\partial w}{\partial \pi} - g\rho^* \left(\dot{\eta}\frac{\partial \pi}{\partial \eta}\right)\frac{\partial}{\partial \pi}\frac{\partial w}{\partial \pi^*} \\
&= -g\frac{\rho^*}{m^*}\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial \eta} - g^2\frac{\rho^*}{m^*}\frac{\partial}{\partial \eta}\left(\frac{1}{m}\frac{\partial \pi^* \hat{P}}{\partial \eta}\right) + g\frac{\rho^*}{m^*}\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial \eta} \cdot \nabla w \\
&\quad -\dot{\eta}\frac{\partial}{m\,\partial \eta}(\dot{\eta} m) + \dot{\eta}\frac{\partial (\ln \rho^*)}{\partial \eta} \\
&\quad +g\rho^* (\dot{\eta} m)\frac{1}{m^*}\frac{\partial}{\partial \eta}\left(\frac{1}{m}\frac{\partial w}{\partial \eta}\right) - g\rho^* \dot{\eta}\frac{\partial}{\partial \eta}\frac{1}{m^*}\frac{\partial w}{\partial \eta}
\end{aligned}$$

Nejvýznamnějším je člen obsahující druhou vertikální derivaci redukované nehydrostatické odchylky tlaku. Ostatní spíše doplňkové členy se objeví díky změněné definici prognostické proměnné. Rovnice pro $\hat{P}$ je odvozena z původní rovnice tendence pro skutečný tlak (3.8) odečtením vztahu pro zobecněnou rychlost ω (resp. $\dot{\pi}$):

Rovnice dynamického jádra modelu ALADIN.



Interakce veličin a procesů. Šipky představují dopad nebo kontrolu, intenzita je vyjádřena silou čáry. Každý uzavřený cyklus představuje zpětnou vazbu, kdy důsledek buď zesiluje příčinu (pozitivní vazba) nebo proti ní působí (negativní vazba). Na obrázku jsou barevně vyznačeny dva příklady

Výstupy z modelu ALADIN mají široké uplatnění nejenom v ČHMÚ. Důležitými odběrateli jsou Integrovaný záchranný systém, Armáda ČR, Státní úřad pro jadernou bezpečnost a další. Díky technologickému pokroku posledních let se produkty dostávají v reálném čase i široké veřejnosti prostřednictvím mobilních aplikací a webových stránek.

Dnešní vybavení – superpočítač NEC-LX.

Na Šabatce 2050/17
143 06 Praha 412-Komořany
ČHMÚ