

# Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

---

Aleš Raidl

O (ne)předpověditelnosti počasí

*Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, Vol. 42 (1997), No. 6, 302--312

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/138099>

## Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1997

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



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

# O (ne)předpověditelnosti počasí

*Aleš Raidl, Praha*

## 1. Úvod

Předpověď počasí je jednou z nejdůležitějších a zároveň nejobtížnějších úloh synoptické a dynamické meteorologie. Metody předpovědi se pochopitelně v závislosti na rozvoji poznatků fyziky atmosféry a matematiky měnily, nicméně nepřehlížíme-li k neúspěšnému pokusu Richardsona [20] o výpočet budoucího fyzikálního stavu atmosféry, jejich principem byly do poloviny tohoto století v podstatě metody subjektivní, založené na časové extrapolaci polí meteorologických prvků a jevů. S pokrokem metod numerické matematiky a později i s prudkým rozvojem výpočetní techniky se začaly koncem čtyřicátých let uplatňovat „objektivní“ metody předpovědi termobarických polí založené na řešení rovnic dynamiky atmosféry.

Padesátá a šedesátá léta pak byla obdobím nereálného optimismu, pokud jde o možnosti numerické předpovědi počasí. Mezi veřejností a někdy i mezi samotnými meteorology vyvstala naděje, že díky stále výkonnějším počítačům budeme moci předpovídat počasí na dostatečně dlouhou dobu dopředu, a dokonce že budeme schopni počasí vhodně modifikovat a kontrolovat [9]. Tyto názory byly rovněž podporovány úspěšným vývojem v oblasti umělých družic.

Intelektuálním otcem zmíněného optimismu byl americký matematik maďarského původu John von Neumann, který správně rozpoznal, že předpověď počasí je úkol vhodný pro počítač. Von Neumann se v druhé polovině čtyřicátých let v Ústavu pro pokročilá studia v Princetonu obklopil skupinou meteorologů, jako byli Charney, Rossby či Wexler [7, 25], se zřejmým úmyslem využít počítač při předpovědi počasí. Vznik zmíněné skupiny kolem von Neumanna znamenal zásadní zlom v oblasti předpovídání počasí. Jejich snažení bylo korunováno úspěchem v roce 1949 [6], kdy se jim podařilo na prvním elektronickém počítači ENIAC předpovědět výšky izobarické hladiny 500 hPa pomocí barotropního modelu atmosféry.

Čtenáři, který není dostatečně seznámen s odbornou terminologií z oblasti fyziky atmosféry, dobře poslouží k orientaci v textu výkladový a terminologický meteorologický slovník [26].

---

Mgr. ALEŠ RAIDL, Dr. (1969), katedra meteorologie a ochrany prostředí MFF UK, V Holešovičkách 2, 180 00 Praha 8.

## 2. Numerické předpovědní modely počasí

První úspěšná experimentální počítačová předpověď počasí byla publikována v roce 1950 [6] a provozní numerické předpovědi počasí jsou prováděny od roku 1955 ve Spojených státech amerických.

Připomeňme, že prakticky všechny numerické předpovědní modely počasí jsou založeny na řešení následující soustavy základních (primitivních) rovnic:

pohybových rovnic

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} + 2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \mathbf{g} + \mathbf{F},$$

první hlavní věty termodynamické

$$c_p \frac{dT}{dt} - \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dt} = Q,$$

rovnice kontinuity

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \rho + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0,$$

stavové rovnice

$$p = \rho RT$$

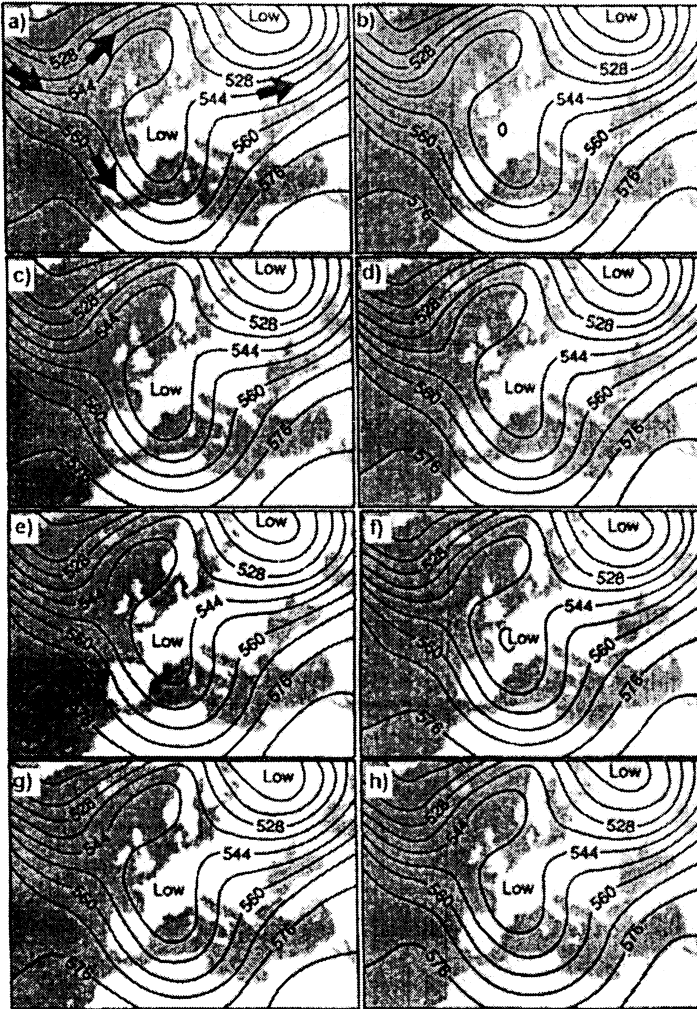
a rovnice bilance vodní páry

$$\frac{dw}{dt} = s(w) + D,$$

kde  $\mathbf{v}$  je vektor rychlosti proudění vzduchu,  $\boldsymbol{\Omega}$  vektor úhlové rychlosti rotace Země,  $\rho$  hustota vzduchu,  $\mathbf{g}$  vektor tíhového zrychlení Země,  $p$  tlak,  $t$  je čas,  $\mathbf{F}$  vektor síly tření,  $T$  teplota vzduchu,  $c_p$  měrné teplo vzduchu při stálém tlaku,  $Q$  představuje zdroj či propad tepla připadající na jednotku hmoty vzduchu,  $R$  je měrná plynová konstanta vzduchu,  $w$  měrná vlhkost vzduchu,  $s(w)$  reprezentuje zdroje či propady vodní páry v atmosféře a  $D$  představuje turbulentní a molekulární difuzi vodní páry.

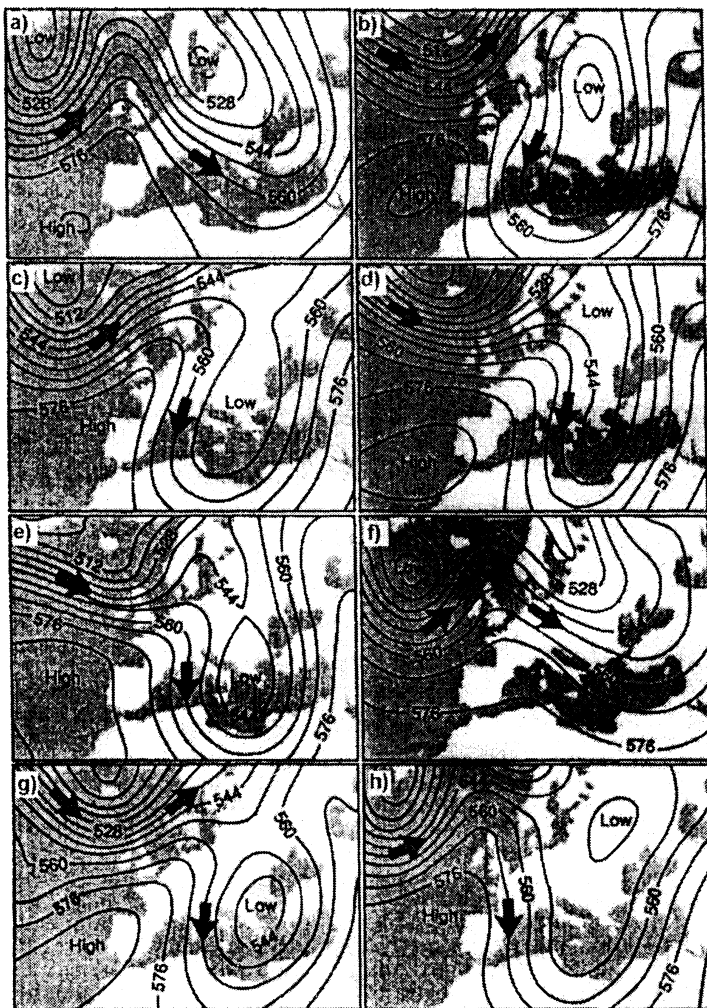
Na tomto místě považujeme za nutné čtenáře upozornit, že rovnice bilance vodní páry bývá v české meteorologické literatuře tradičně označována jako rovnice kontinuity vodní páry. Podobně jako rovnici bilance vodní páry lze v případě potřeby, obvykle v klimatických modelech, uvažovat i rovnice bilance různých příměsí v atmosféře, např.  $O_3$ ,  $CO_2$  atd. K uvedeným rovnicím dále přistupují parametrizace těch procesů v atmosféře, které jsou menšího prostorového i časového měřítka, než je rozlišení modelu; typicky se parametrizují síly tření, turbulentní výměna tepla, hybnosti či vodní páry, průchod slunečního záření atmosférou apod. Podrobnější informace o numerických předpovědních modelech počasí získá čtenář ze série článků M. Bažky [1, 2, 3, 4].

Praktická zkušenost meteorologů ukazuje, že uvedená soustava rovnic vykazuje citlivou závislost na volbě počátečních podmínek. Znamená to, že když zadáme do modelu vycházejícího z uvedených rovnic jen mírně pozměněná vstupní data, *můžeme* dostat zcela odlišné předpovědi počasí. Slovo „můžeme“ je zcela namístě, protože



Obr. 1. Počáteční stavy atmosféry znázorněné jako výšky tlakové hladiny 500 hPa [dam]. Část a) představuje neporušený stav, ostatní z něho vznikly přidáním vhodných perturbací. Šipky vyznačují směr proudění. Upraveno se souhlasem podle [19].

existují také meteorologické situace, které se vyznačují zvýšenou prediktabilitou, tzn. že předpovězený charakter počasí nedozná podstatné změny ani při úmyslném zavedení perturbací do počátečních dat. Těto skutečnosti si byl vědom již v polovině 50. let von Neumann, který rozdělil procesy v atmosféře do tří kategorií [25]. Do první patří jevy, jejichž vývoj je závislý na počátečních podmínkách, a lze je tedy předpovědět jen na velmi krátkou dobu dopředu. Jejich opakem jsou procesy, které jsou na počátečních podmínkách nezávislé a při jejichž předpovědi je vhodné soustředit se na zvláštnosti všeobecné cirkulace atmosféry. Mezi těmito extrémními případy leží ještě skupina procesů, u kterých nelze dost dobře předpovědět, v co se počáteční podmínky



Obr. 2. Výsledné stavy atmosféry, odpovídající počátečním stavům na obr. 1, po integraci prognostického modelu na sedm dní dopředu. Upraveno se souhlasem podle [19].

vyvinou, jsme-li od nich dostatečně vzdáleni. V souvislosti s tím rozčlenil předpověď počasí na krátkodobou, střednědobou a dlouhodobou. Není tedy pravda, jak se někdy mylně uvádí, že si von Neumann myslel, že pro předpověď počasí na libovolně dlouhý interval dopředu postačí po tuto dobu modelové rovnice integrovat. Přesto však byl větším optimistou, než zatím ukazuje naše zkušenost, neboť hranici mezi krátkodobou a střednědobou předpovědí situoval do 30 dnů [25], ačkoliv současná meteorologie klade tuto hranici mezi třetí a čtvrtý den.

Jak však rozpoznat, která z předpovědí má šanci být úspěšnější než jiné? K tomuto účelu se provádějí tzv. skupinové předpovědi počasí (ensemble prediction). Základní myšlenkou skupinové předpovědi počasí je několik opakovaných integrací modelů-

vých rovnic, které však vycházejí z různě perturbovaných počátečních podmínek. Ze struktury výsledného souboru předpovědí pak usuzujeme na věrohodnost samotné předpovědi [12]. Provoz a publikování skupinových předpovědí byly zahájeny koncem roku 1992 Evropským centrem pro střednědobou předpověď počasí v anglickém Readingu a Národním meteorologickým ústředím Spojených států amerických [17]. Protože jde o poměrně složitou problematiku, ať už co se týká volby perturbací nebo relevantnosti výsledků pro konečnou předpověď atd., přesahující rámec našeho příspěvku, odkazujeme čtenáře např. na práce [17, 18]. Pro zajímavost si ještě uvedeme, že podle [12] je při předpovědi na sedm dní dopředu zhruba 45 % předpovědí z perturbovaného počátečního stavu úspěšnějších než ze stavu neperturbovaného.

Příklad výsledku skupinové předpovědi počasí na jeden týden dopředu vidíme na obrázcích 1 a 2; obr. 1 znázorňuje počáteční stavy, přičemž část a) představuje neperturbovaný počáteční stav a ostatní z něho vznikly přidáním vhodných perturbací. Ačkoliv jsou si meteorologické situace na obr. 1 „velmi podobné“ a podstatné rozdíly mezi nimi jsou rozeznatelné patrně jen okem zkušeného meteorologa-synoptika, jim odpovídající stavy atmosféry na obr. 2 po integraci modelových rovnic na týden dopředu se evidentně vyznačují větší mírou vzájemné odlišnosti.

### 3. Hlavní zdroje chyb v numerických předpovědních modelech počasí

Jaké jsou zdroje chyb zavedené do počátečních podmínek ještě předtím, než začneme rovnice numericky integrovat? Chyby pochopitelně vznikají již při samotném měření meteorologických veličin na meteorologických stanicích, a to následkem konečné přesnosti měřících přístrojů.

Další chyby se objevují díky objektivní analýze. Meteorologické stanice jsou po zeměkouli rozmístěny nerovnoměrně, kdežto modelové rovnice jsou řešeny na pravidelné síti uzlových bodů. Převodu hodnot z nepravidelné na pravidelnou síť prostřednictvím vhodných interpolačních a statistických metod se říká objektivní analýza. Dnes se nejčastěji provádí asimilací dat [5].

Další úpravu vstupních dat představuje inicializace předpovědních modelů. Jde o souhrnný název pro metody úpravy meteorologických dat již po objektivní analýze tak, aby se mohly stát výchozími údaji při časové integraci modelových rovnic. Modelové rovnice totiž kromě pomalu se pohybujících poruch obsahují i rychlé gravitační a inerční vlny, a kdybychom zavedli do modelových rovnic hodnoty přímo po objektivní analýze bez inicializace, tak by při integraci došlo ke generování nereálných gravitačních a inerčních vln s velkou amplitudou, které by předpověď znehodnotily. Není sporu o tom, že správně provedená inicializace je nutnou podmínkou pro zdárnou předpověď. Ovšem názor na to, vnášeli-li inicializace do modelu „chybu“ ve smyslu odchylky od skutečných hodnot meteorologických prvků, které bychom získali v případě, že bychom opravdu prováděli měření v uzlových bodech (integrační) síť, se liší. Zastáváme stanovisko, že inicializací je do modelu opravdu chyba v již uvedeném smyslu vnesena. Stejného mínění je J. Smagorinsky [25], k opačnému názoru se přiklání M. Bařka [5].

Kromě tří uvedených zdrojů chyb, které jsou „okamžité“, objevují se další nepřesnosti, které však působí nepřetržitě. Patří mezi ně zaokrouhlovací chyby počítače. Dále pak nedostatky v matematické formulaci modelů, tzn. chyby v důsledku jen přibližného charakteru numerických integračních schémat. K tomu přistupují ještě nedostatky ve fyzikální formulaci modelů, tedy v parametrizacích. Navíc je nutné zdůraznit, že některým jevům odehrávajícím se v atmosféře zatím ještě dostatečně nerozumíme, nebo je neumíme matematicky popsat.

Pro ilustraci uveďme údaje shrnuté v [1] týkající se modelu s diferenční aproximací a horizontálním prostorovým krokem přibližně 380 km. Podle nich připadá 48 % celkové chyby při integraci modelu na dva dni dopředu na chybu numerické metody, 34 % na fyzikální formulaci modelu a 18 % na chybu způsobenou nepřesností počátečních dat. Při přechodu na jemnější síť a užitím spektrálních metod lze očekávat redukci chyby numerické metody a růst chyby připadající na počáteční data, zejména na objektivní analýzu [5].

#### 4. Zvětšování chyb v numerických předpovědních modelech počasí

Experimenty týkající se růstu chyb v numerických předpovědních modelech se provádějí již od šedesátých let. Jednotlivé skupiny autorů pochopitelně udávají poněkud odlišné kvantitativní výsledky. To je způsobeno odlišným rozlišením jednotlivých modelů a mírou věrnosti, s jakou postihují procesy v atmosféře. V následující části stručně shrneme některé charakteristické výsledky.

Jestliže se počáteční chyba volí dostatečně malá, v poli teploty menší než  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , můžeme ji považovat za lineární perturbaci superponovanou na základní stav atmosféry, a tedy popsat v rámci linearizovaných rovnic. Zavedeme-li takovou malou chybu jen např. do teplotního pole, rozvíjí se během zhruba prvního modelového dne přechodné stadium, během něhož se velikost chyby zmenšuje. Podle [25] se směrodatná odchylka průměrovaná přes celou atmosféru snížila během prvního dne z  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  na  $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . To je patrně způsobeno geostrofičným přízpůsobením<sup>1)</sup> mezi polem větru a polem tlakovým, kdy počáteční pokles chyby v teplotním poli představuje transformaci dostupné potenciální energie perturbací v kinetickou energii perturbací [7].

Po tomto přechodném stadiu nastává etapa přibližně exponenciálního růstu chyb trvající zhruba týden [25]. Poté se chyby zvětší natolik, že není možné opominout nelineární efekty; rychlost zvětšování chyby se zpomaluje.

Jestliže se počáteční chyba volí dostatečně velká, v teplotním poli přibližně větší než  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  [7], je téměř ihned vržena do nelineárního stadia; její okamžitá velikost osciluje a její průměrná hodnota se pozvolna zvětšuje. Lze očekávat, že v případě dostatečně dlouhé integrace by se i tento pozvolný růst zastavil, neboť se nelze domnívat, že by

---

<sup>1)</sup> Proudění v atmosféře středních z. š. je zhruba geostrofičké. Při takovém proudění je v přibližné rovnováze horizontální složka Coriolisovy síly a horizontální složka síly tlakového gradientu. Je-li tato rovnováha porušena, může dojít ke generování inerčně-gravitačních vln, které působí tak, aby byla uvedena rovnováha opět nastolena.

chyba byla v průměru větší, než představuje rozdíl mezi dvěma náhodně vybranými stavy atmosféry [5, 7].

Dále se ukazuje [25], že ztráta prediktability je největší ve spodních hladinách atmosféry, ovšem až po uplynutí přibližně jednoho týdne, tedy doby, kdy se chyby dostávají do nelineárního stadia.

Obrátíme-li pozornost na kvantitativní vyjádření rychlosti růstu počátečních chyb v modelech atmosféry, zjistíme, že se čas zdvojnásobení chyby snížil z pěti dnů v polovině 60. let [7] na dva a půl dne na konci 60. let [25], na přibližně dva dny v první polovině 80. let [15] a na 1,5 dne v polovině 90. let [24]. Pokles času zdvojnásobení chyby je tedy evidentní. To je ve zdánlivém rozporu s tím, co bude uvedeno v části 5, kde se zmiňujeme o pokroku v posouvání praktické meze prediktability. Znamená to snad, že novější modely jsou méně spolehlivé než ty starší? Nikoliv, jen reálněji popisují chování skutečné atmosféry.

Zjevná příčina poklesu času zdvojnásobení chyby není zcela jasná [16]. Možné vysvětlení spočívá v tom, že stále výkonnější výpočetní technika umožňuje snižovat prostorový i časový krok v modelech a zároveň zavádět dokonalejší parametrizace. Novější modely pak věrněji popisují jevy jemnějších měřítek, které nebyly obsaženy, nebo byly popsány velmi nedokonale, ve starších modelech. Chyby v zachycení jevů jemnějšího měřítka se zvětšují rychleji než chyby v popisu jevů např. synoptického měřítka. Následně pak tyto nepřesnosti způsobují chyby ve větším měřítku, které pak sílí tak, jako by byly přítomny od počátku [14, 16].

## 5. Meze předpověditelnosti počasí

Jistě je tedy na místě otázka: „Za jak dlouhou dobu se uvedené chyby zvětší natolik, že se stanou neúnosnými?“ Jinými slovy: „Na jak dlouhou dobu dopředu jsme schopni počasí předpovědět?“ Přitom nejde jen o akademickou otázku, neboť odpověď na ni má praktické dopady. Dokážeme-li se v provozní praxi dostatečně blízko přiblížit teoretické hranici prediktability, nebude třeba věnovat další úsilí na přesnější stanovení počátečních podmínek, vytváření realističtějších modelů atmosféry nebo konstruovat a kupovat výkonnější počítače. Dokonce hranice teoretické prediktability nemusíme zdaleka dosáhnout a můžeme si říci, že nám prostě *zatím* nestojí za to posouvat praktickou mez prediktability blíže k hranici teoretické. Jednoduše proto, že intelektuální a finanční náklady jsou příliš velké. Tato doba je nám však ještě příliš vzdálena.

Máme-li k dispozici numerický předpovědní model počasí, pak přirozeným způsobem, jak odhadovat prediktabilitu, je integrovat modelové rovnice několikrát, ovšem s poněkud pozměněnými počátečními podmínkami. Teoretická mez prediktability je pak dána dobou, za kterou se dvě integrace modelu začnou v průměru lišit o více než dva náhodně vybrané stavy atmosféry. Podobně praktická mez prediktability je určena dobou, kdy se předpovídaný a skutečný stav atmosféry začnou v průměru lišit o více než dva náhodně zvolené stavy atmosféry [7, 25].



Praktická mez prediktability výšky tlakové hladiny 500 hPa se zvýšila ze zhruba 3,5 dne na počátku sedmdesátých let na 5,5 dne na přelomu sedmdesátých a osmdesátých let a na více než 7 dní v první polovině devadesátých let [28]. Další zlepšení lze očekávat v souvislosti s pokrokem v oblasti asimilace dat [5]. Teoretická mez prediktability se v současnosti klade do období 3 až 4 týdnů [8, 28].

## 6. Přístup k prediktabilitě prostřednictvím teorie deterministického chaosu

Jinou možnost, jak odhadovat prediktabilitu atmosférických procesů, představují některé postupy vycházející z teorie deterministického chaosu a nelineární analýzy časových řad. Konkrétně jde o výpočet Kolmogorovy entropie, která udává průměrnou rychlost ztráty informace o chování studovaného systému.

Její odhad je možný buď prostřednictvím výpočtu Ljapunovových exponentů nebo korelačních integrálů. Na MFF UK jsme se zabývali druhým případem. Vycházeli jsme přitom z metody časových zpoždění [27], která umožňuje z časové řady jedné nebo několika proměnných rekonstruovat stavy dynamického systému v obecně  $m$ -rozměrném stavovém prostoru. Kolmogorovu entropii jsme odhadli pomocí  $K_2$  entropie, která tvoří její dolní mez a je nezáporná, podle postupu Grassbergera a Proccacia [10]. Tento postup je provázen řadou nástrah, které souvisejí s tím, že signál (časová řada) je diskretizován, autokorelován, má konečnou délku a obsahuje šum. Při jisté míře obezřetnosti však lze získat reprodukovatelné výsledky. Pokud jde o podrobnosti výpočtů, odkazujeme čtenáře v české odborné literatuře na práci [21]. Vstupními daty byly denní průměry přízemní teploty a tlaku vzduchu z devíti meteorologických stanic pokrývajících oblast Čech a Moravy. Některé výsledky jsou stručně shrnuty v tabulce 1, kde je uveden čas zdvojnásobení chyby

$$T_2 = \frac{\ln 2}{K_2}.$$

Tab. 1. Čas zdvojnásobení chyby odhadnutý z řad přízemní teploty a tlaku vzduchu.

teplotní řady	$T_2$ [den]
původní	3,1
filtrovaná	2,3
hlazená (5 MA)	5,2
hlazená (31 MA)	5,8
jaro	3,1
léto	4,4
podzim	3,7
zima	3,9
<b>tlakové řady</b>	1,5
<b>teplotní &amp; tlakové řady</b>	5,8

Původní a filtrovaná řada se vzájemně liší tím, že z filtrované řady byl odstraněn roční chod teploty vzduchu. Z tabulky je patrný růst prediktability po shlazení řad klouzavými průměry délky 5 a 31 dní (v tabulce značeno jako 5 MA a 31 MA). Přitom jsme si dobře vědomi toho, že použití lineárních filtrů na nelineární časové řady může vést k odstranění nejen náhodného šumu, ale i části deterministického (i když chaotického) signálu.

Dále je zřejmé, že se prediktabilita odvozená z teplotních řad liší v závislosti na sezoně. Během přechodných sezon, tzn. jara a podzimu, je poněkud menší. Zdá se, že se zde projevuje to, čemu říkáme „nestálé aprílové počasí“. Pokud jde o tlakové řady, nebyl rozdíl mezi sezonami pozorován.

Pro dané místo a časové období byl čas zdvojnásobení chyby větší pro teplotu než pro tlak. Prediktabilita se výrazně zvýšila, když jsme k rekonstrukci stavů ve stavovém prostoru použili teplotu i tlak zároveň. To vysvětlujeme tím, že souběžná měření několika veličin odrážejících různé aspekty dynamiky systému umožňuje o tomto systému vytěžit větší množství informací.

Připomeňme, že uvedená zjištění se týkají odhadů prediktability ve střední Evropě nebo spíše jen v Čechách a na Moravě a rovněž těch procesů v atmosféře, které jsou údaji představovanými denními průměry teploty a tlaku vůbec zachytitelné. Je zřejmé, že např. turbulence v mezní vrstvě atmosféry je v takovém signálu silně potlačena. Na druhé straně nejdelší, tzv. klementinská řada pokrývala období let 1775 až 1989. Naše údaje tedy dostatečně nepostihují ty klimatické faktory, které jsou dlouhodobějšího charakteru než našich 215 let. Máme na mysli např. dynamiku kryosféry nebo změny parametrů orbitální dráhy Země kolem Slunce apod.

Další aspekty týkající se vypovídací schopnosti použitých dat a možné interpretace získaných výsledků jsou podrobněji diskutovány v [21, 22, 23]. Na tomto místě ještě zdůrazňujeme, že při aplikaci teorie deterministického chaosu *a priori* předpokládáme existenci klimatického nebo počasového atraktoru a že chování atmosféry jako dynamického systému je na tomto atraktoru již soustředěno [11].

## 7. Které odhady jsou správné?

Viděli jsme, že odhady prediktability atmosférických dějů získané na jedné straně integrací numerických modelů atmosféry a na druhé straně nelineární analýzou časových řad meteorologických údajů se liší. Možné příčiny tohoto nesouladu lze spatřovat v následujícím výkladu. Především naše zjištění vypovídají o lokální prediktabilitě, kdežto experimenty s numerickými modely atmosféry poskytují globální hodnoty, obvykle pro celou polokouli, tzn. že dávají jistým způsobem průměrované hodnoty přes oblasti, které mohou vykazovat jak zvýšenou, tak i sníženou prediktabilitu. Také jsme již uvedli, že rychlost růstu chyb závisí na jejich počáteční velikosti. Máme za to, že při analýze časových řad pracujeme s fyzikálně reálnějšími chybami než v případě numerických modelů atmosféry, do nichž se velikost počáteční chyby zadává uměle. Dále v numerických předpovědních modelech počasí vystupovaly okamžité hodnoty meteorologických veličin, avšak naše časové řady představovaly denní průměry teploty

a tlaku. Mimoto jsme pracovali s přízemními hodnotami meteorologických veličin, ale do modelů byly chyby zadávány nad zemským povrchem ve volné atmosféře. A konečně si musíme položit i otázku: „Do jaké míry numerické předpovědní modely popisují chování skutečné atmosféry?“

## 8. Několik poznámek o předpovědi klimatu

Vedle předpovědi počasí z jednoho dne na druhý jsou meteorologové postaveni před úkol odhadovat vývoj klimatu. Velmi zjednodušeně řečeno, klima je představováno průměrným stavem atmosféry za dostatečně dlouhé období; obvykle za posledních 30 let (pro přesnější vymezení pojmu viz např. [13]). Klimatickou předpověď tedy můžeme rozumět předpověď statistických charakteristik atmosféry na dlouhou dobu dopředu. Někdo může chtít vědět, zda příští léto bude teplé či chladné nebo srážkově podnormální či nadnormální. Z hlediska teorie deterministického chaosu jde přinejmenším o velmi spornou záležitost.

Má tedy vůbec smysl provádět časově a finančně náročné integrace modelových rovnic atmosféry na desítky let dopředu a vydávat scénáře vývoje klimatu např. do roku 2050? Podle našeho soudu to smysl má, neboť nám může jít též o něco jiného. Naše snažení se může soustředit na odhalení dlouhodobých statistických vlastností klimatu, aniž by nás zajímal jeho chronologický vývoj v případě změny vnějšího působení na klimatický systém. Slovy teorie deterministického chaosu to znamená, že nás nezajímá individuální trajektorie atmosféry ve stavovém prostoru, ale jde nám o to, zda se změní např. tvar nebo pozice klimatického atraktoru, když např. zvýšíme koncentraci  $\text{CO}_2$  či jiných skleníkových plynů v atmosféře [19]. Zajímá nás tedy kvalitativní změna klimatu. V [11] je vyslovena hypotéza, že při změně vnějšího působení na klimatický systém by mohlo dojít ke krizi klimatického atraktoru, tzn. zániku původního klimatického atraktoru a současně objevení se nového atraktoru v jiné oblasti stavového prostoru. Tzn. že zanikne staré klima a na jeho místo nastoupí klima nové. Z tohoto hlediska není modelování klimatu a vytváření scénářů jeho případných změn mrháním časem, penězi a intelektem.

### L i t e r a t u r a

- [1] BAŤKA, M.: *Současný stav objektivní předpovědi počasí. Globální spektrální modely a jejich využití v meteorologii.* Meteorol. Zpr. 47 (1994), č. 5, s. 135–141.
- [2] BAŤKA, M.: *Současný stav objektivní předpovědi počasí. Regionální předpověď počasí I.* Meteorol. Zpr. 49 (1996), č. 1, s. 22–27.
- [3] BAŤKA, M.: *Současný stav objektivní předpovědi počasí. Regionální předpověď počasí II.* Meteorol. Zpr. 49 (1996), č. 2, s. 39–46.
- [4] BAŤKA, M.: *Současný stav objektivní předpovědi počasí. Regionální předpověď počasí III.* Meteorol. Zpr. 49 (1996), č. 3, s. 65–72.
- [5] BAŤKA, M.: *Osobní sdělení.*
- [6] CHARNEY, J. G., FJRTOFT, J., VON NEUMANN, J.: *Numerical integration of the barotropic vorticity equation.* Tellus 2 (1950), s. 237–254.

- [7] CHARNEY J. G.: *The feasibility of a global observation and analysis experiment*. Bull. Amer. Meteor. Soc. 47 (1966), s. 200–220.
- [8] DYMNIKOV V. P., FILATOV A. N.: *Stability of large-scale atmospheric processes*. Lenin-grad, Gidrometeoizdat (1990), 236 s.
- [9] GLEICK J.: *Chaos: Making a new science*. New York, Viking (1987), 352 s.
- [10] GRASSBERGER P., PROCACCIA I.: *Estimating of the Kolmogorov entropy from a chaotic signal*. Phys. Rev. A 28 (1983), s. 2591–2593.
- [11] HORÁK J., KRLÍN L.: *Deterministický chaos a matematické modely turbulence*. Praha, Academia (1996), 444 s.
- [12] JANOUŠEK M.: *Pravděpodobnostní předpovědi v Evropském centru pro střednědobou předpověď počasí*. Meteorol. Zpr. 47 (1994), č. 5, s. 154–156.
- [13] KALVOVÁ J., MOLDAN B.: *Klíma a jeho změna v důsledku emisí skleníkových plynů*. Praha, Karolinum (1996), 161 s.
- [14] LORENZ E. N.: *Three approaches to atmospheric predictability*. Bull. Amer. Meteor. Soc. 2 (1969), s. 345–349.
- [15] LORENZ E. N.: *Atmospheric predictability experiments with a large numerical model*. Tellus 34 (1982), s. 505–513.
- [16] LORENZ E. N.: *Irregularity: a fundamental property of the atmosphere*. Tellus 36 A (1984), s. 98–110.
- [17] MOLTENI F., BUIZZA R., PALMER T. N., PETROLIAGIS T.: *The ECMWF Ensemble Prediction System: Methodology and validation*. Q. J. R. Meteorol. Soc. 122 (1996), s. 73–119.
- [18] MUREAU R., MOLTENI F., PALMER T. N.: *Ensemble prediction using dynamically conditioned perturbations*. Q. J. R. Meteorol. Soc. 119 (1993), s. 299–323.
- [19] PALMER T.: *A weather eye on unpredictability*. New Scientist 11, November, (1989), s. 56–60.
- [20] RICHARDSON L. F.: *Weather prediction by numerical process*. University Press, Cambridge (1922), 236 s.
- [21] RAIDL A.: *Determinismus, nahodilost a prediktabilita atmosférických procesů*. Doktor-ská disertační práce. Praha, MFF UK (1995), 156 s.
- [22] RAIDL A.: *Estimating the fractal dimension, K2 entropy and the predictability of the atmosphere*. Czech. J. Phys. 46 (1996), s. 293–328.
- [23] RAIDL A.: *Search for chaos in atmospheric dynamics by means of non-linear time series analysis*. In: J. HORÁK, L. KRLÍN: *Deterministic chaos and turbulence: theory and application*. Připravováno pro Springer-Verlag.
- [24] SIMMONS A. J., MUREAU R., PETROLIAGIS T.: *Error growth and estimates of predictability from the ECMWF forecasting system*. Q. J. R. Meteorol. Soc. 121 (1995), s. 1739–1771.
- [25] SMAGORINSKY J.: *Problems and promises of deterministic extended range forecasting*. Bull. Amer. Meteor. Soc. 50 (1969), s. 286–311.
- [26] SOBÍŠEK A KOLEKTIV: *Meteorologický slovník výkladový a terminologický*. Praha, MŽP (1993), 594 s.
- [27] TAKENS F.: *Detecting strange attractor in turbulence*. In: *Lecture notes in mathematics*. 898, Berlin, Springer (1981), s. 366–381.
- [28] WIIN-NIELSEN A.: *Nonlinear studies of quasi-geostrophic systems*. Physica D 77 (1994), s. 33–59.