



Jaroslav Kopáček, Jan Bednář,
Michal Žák:
Jak vzniká počasí

ENVIRONMENÁLNÍ TEXTY 1



Jak vzniká počasí

Jaroslav Kopáček

Jan Bednář

Michal Žák

Recenzovali:

RNDr. Daniela Řezáčová, CSc. (1. vydání)

† doc. RNDr. Otakar Zikmunda, CSc. (1. vydání)

RNDr. Martin Setvák, CSc. (15. kapitola)

Vydala Univerzita Karlova, Nakladatelství Karolinum

Redakce Eva Flanderková

Grafická úprava Jakub Kovařík

Sazba DTP Nakladatelství Karolinum

Vydání druhé, rozšířené a upravené

© Jaroslav Kopáček, Jan Bednář, Michal Žák, 2019

© Univerzita Karlova, Nakladatelství Karolinum, 2019

ISBN 978-80-246-4423-3

ISBN 978-80-246-4424-0 (pdf)



Univerzita Karlova
Nakladatelství Karolinum 2020

www.karolinum.cz
ebooks@karolinum.cz

Obsah

Předmluva k prvnímu vydání z roku 2005	11
Předmluva ke druhému vydání	15
1. VZNIK A SLOŽENÍ ZEMSKÉ ATMOSFÉRY	17
1.1 Vznik zemské atmosféry	17
1.2 Dnešní složení atmosféry Země	20
1.3 Ozon a oxid uhličitý	22
1.3.1 Ozon	22
1.3.2 Oxid uhličitý	24
1.4 Vodní pára v zemské atmosféře	26
1.5 Pevné a kapalně částice v atmosféře	28
1.6 Vertikální členění atmosféry	31
1.7 Turbulence a konvekce v atmosféře	35
2. TLAK A HUSTOTA VZDUCHU	39
2.1 Tlak vzduchu a jeho jednotky	39
2.2 Hustota vzduchu	39
2.3 Virtuální teplota	41
2.4 Změna tlaku vzduchu s výškou	42
2.4.1 Základní hydrostatická rovnice	42
2.4.2 Výška homogenní atmosféry	43
2.4.3 Barometrická formule pro izotermní atmosféru	44
2.4.4 Vertikální barický gradient	48
2.5 Změna hustoty vzduchu s výškou	49
2.6 Aperiodické změny tlaku vzduchu	51
2.7 Periodické změny tlaku vzduchu	52
2.8 Síla tlakového gradientu, tlakové útvary	53
2.9 Horizontální rozložení atmosférického tlaku na zemi	55
2.10 Některé další pojmy týkající se tlaku vzduchu	57
2.11 Gravitace a zemská tíže, potenciální energie v atmosféře, geopotenciál	58

3. TEPELNÉ POMĚRY PŮDY A POVRCHU VODNÍCH NÁDRŽÍ	63
3.1 Záření v atmosféře, radiační bilance a tepelná bilance zemského povrchu.....	63
3.1.1 Sluneční záření.....	63
3.1.2 Dlouhovlnné záření, skleníkový efekt, globální oteplení	68
3.2 Oteplování a ochlazování zemského povrchu	71
3.3 Denní a roční chod teploty povrchu půdy	73
3.4 Noční a ranní mrazy na povrchu půdy.....	76
3.5 Šíření tepla do půdy a změny teploty v půdě	78
3.6 Tepelné poměry vodních nádrží.....	82
4. TEPLOTA SPODNÍCH VRSTEV VZDUCHU	87
4.1 Oteplování a ochlazování vzduchu.....	87
4.2 Denní chod teploty vzduchu.....	89
4.3 Roční chod teploty vzduchu	92
4.4 Aperiodické změny teploty vzduchu.....	93
4.5 Extrémní teploty	94
5. VERTIKÁLNÍ STABILITA VZDUCHOVÝCH HMOT	96
5.1 Individuální teplotní gradient v nenasyčeném vzduchu, potenciální teplota	96
5.2 Individuální teplotní gradient v nasyceném vzduchu.....	99
5.3 Aktuální vertikální gradient teploty.....	101
5.4 Vertikální stabilita nenasyčeného vzduchu.....	101
5.5 Potenciální teplota při vertikálních pohybech vzduchu.....	105
5.6 Vliv výměny na teplotní zvrstvení	106
5.7 Vertikální stabilita nasyceného vzduchu.....	108
5.8 Pseudoadiabatické děje	109
6. ROZDĚLENÍ TEPLoty V ATMOSFÉŘE S VÝŠKOU	112
6.1 Změna teploty s výškou v přízemní vrstvě vzduchu	112
6.2 Změna teploty s výškou ve vyšších vrstvách atmosféry	113
6.3 Inverze teploty.....	114
7. VÝPAR	119
7.1 Oběh vody v přírodě.....	119
7.2 Fyzikální podstata výparu	119
7.3 Napětí nasycení	120

7.4	Rychlost vypařování	121
7.5	Výpar za delší období	123
7.6	Denní a roční chod výparu	124
8.	VLHKOST VZDUCHU	126
8.1	Vlhkost vzduchu a příčiny jejích změn	126
8.2	Denní chod absolutní vlhkosti a tlaku vodní páry	126
8.3	Roční chod absolutní vlhkosti a tlaku vodní páry	127
8.4	Denní chod relativní vlhkosti	127
8.5	Roční chod relativní vlhkosti	128
8.6	Rozdělení vlhkosti vzduchu v atmosféře s výškou	128
9.	KONDENZACE A SUBLIMACE VODNÍ PÁRY V ATMOSFÉŘE	130
9.1	Podmínky kondenzace vody v atmosféře, kondenzační jádra	130
9.2	Zamrzání kapek, ledová jádra, vznik srážek v oblacích	132
9.3	Kondenzace a sublimace na zemském povrchu	136
9.4	Mlhy a jejich klasifikace	138
9.5	Oblaky a jejich druhy	141
9.6	Složení oblaků	144
9.7	Děje, jimiž vznikají oblaky	144
9.8	Oblaky nefrontální a frontální	147
9.9	Oblačnost	148
9.10	Denní chod oblačnosti	148
9.11	Roční chod oblačnosti	149
10.	ATMOSFÉRICKÉ SRÁŽKY	150
10.1	Význam pojmu srážky	150
10.2	Kvantitativní charakteristiky srážek	150
10.3	Trvalé srážky a přeháňky	151
10.4	Srážky nefrontální a frontální	152
10.5	Denní a roční chod srážek	152
10.6	Bližší popis hlavních druhů padajících srážek	153
10.7	Sněhová pokrývka	155
11.	PROUDĚNÍ V ZEMSKÉ ATMOSFÉŘE	156
11.1	Proudnic a trajektorie	156
11.2	Geostrofické proudění	156
11.3	Gradientové proudění	159

11.4 Vliv tření na proudění vzduchu, proudění v tlakových útvarech	165
11.5 Základní prvky celkového proudění v zemské atmosféře	167
11.6 Divergence a vorticitata proudění	171
12. VZDUCHOVÉ HMOTY	173
12.1 Podmínky tvoření vzduchových hmot	173
12.2 Klasifikace vzduchových hmot	175
12.3 Podmínky počasí ve stabilních vzduchových hmotách	178
12.3.1 Podmínky počasí v teplých stabilních vzduchových hmotách.....	178
12.3.2 Podmínky počasí ve studených stabilních vzduchových hmotách	180
12.4 Podmínky počasí v instabilních vzduchových hmotách.....	181
12.4.1 Podmínky počasí ve studených instabilních vzduchových hmotách	181
12.4.2 Podmínky počasí v teplých instabilních vzduchových hmotách....	184
12.5 Místní vzduchové hmoty	186
12.6 Charakteristiky zeměpisných typů vzduchových hmot severní polokoule	186
12.6.1 Arktický vzduch (AV).....	186
12.6.2 Vzduch mírných šířek (VMŠ), polární vzduch	187
12.6.3 Tropický vzduch (TV)	188
12.6.4 Ekvatoriální vzduch (EV).....	190
12.7 Transformace vzduchových hmot	190
13. ATMOSFÉRICKÉ FRONTY	194
13.1 Obecné vlastnosti atmosférických front	194
13.2 Klasifikace atmosférických front	194
13.3 Vzorec pro sklon frontální plochy	197
13.4 Barické a izalobarické pole fronty	200
13.5 Posun front.....	202
13.6 Tvoření a rozpadávání front	204
13.7 Přenosové pásy	208
13.8 Teplé fronty	211
13.8.1 Teplé fronty na přízemních povětrnostních mapách	211
13.8.2 Vertikální řezy teplých front	217
13.8.3 Příznaky přechodu teplé fronty přes místo pozorování	218
13.9 Studené fronty.....	220
13.9.1 Studené fronty na přízemních povětrnostních mapách	220

13.9.2	Aerologická analýza studených front	224
13.9.3	Příznaky přechodu studených front přes místo pozorování.	226
13.9.4	Podružné fronty.	228
13.10	Okluzní fronty.	230
13.10.1	Okluzní fronty na přízemních povětrnostních mapách	230
13.10.2	Aerologická analýza okluzních front	234
13.10.3	Příznaky přechodu okluzních front přes místo pozorování.	236
14.	CYKLONY A ANTICYKLONY.	238
14.1	Typy cyklon a anticyklon	238
14.2	Stadia ve vývoji cyklon a anticyklon	239
14.3	Velikost cyklon a anticyklon	243
14.4	Vertikální pohyby v cyklonách a anticyklonách	244
14.5	Přemísťování cyklon a anticyklon	245
14.6	Vznik mimotropických cyklon a podmínky počasí.	247
14.6.1	Místní nefrontální cyklony	247
14.6.2	Frontální cyklony	248
14.6.2.1	Teorie polární fronty	248
14.6.2.2	Detailnější pohled na tvoření frontálních cyklon	248
14.6.2.3	Stavba mladých cyklon	252
14.6.2.4	Stavba okludovaných cyklon	252
14.6.2.5	Regenerace cyklon.	253
14.6.3	Shapirův a Keyserův model cyklony	255
14.6.4	Podmínky počasí v cyklonách.	256
14.6.5	Explozivní cyklogeneze	259
14.7	Vývoj anticyklon.	260
14.8	Podmínky počasí v anticyklonách	261
14.9	Tropické cyklony	264
14.9.1	Základní charakteristika.	264
14.9.2	Vznik tropických cyklon a jejich vývojová stadia.	266
14.9.3	Lokální názvy tropických cyklon	266
14.9.4	Příklad klasifikace tropických cyklon dle jejich intenzity	267
14.10	Výškové cyklony a anticyklony.	268
15.	ATMOSFÉRICKÁ KONVEKCE, KONVEKTIVNÍ BOUŘE, BOUŘKY A DOPROVODNÉ JEVY.	271
15.1	Buněčná konvekce	271
15.2	Konvekční buňky a oblačné jevy	272

15.3	Jednoduchá konvekční cela	275
15.4	Multicely a supercely	277
15.5	Nebezpečné meteorologické jevy vyskytující se v souvislosti s konvektivními bouřemi: kroupy, tromby, tornáda.	279
15.6	Oblačná elektřina	282
15.7	Hrotové (bodové) výboje	289
15.8	Blesky	291
15.9	„Tajemství“ blesku, ubíhající elektrony	295
15.10	Přechodné světelné úkazy související s bouřkovou aktivitou	298
16.	PŘEDPOVĚĎ POČASÍ	301
16.1	Metody synoptické meteorologie	301
16.2	Objektivní předpovědní metody	305
16.3	Prediktabilita atmosférických dějů	312
16.4	Jaký je současný stav v problematice předpovědi počasí?	315
16.5	Předpověď počasí v médiích.	318
	Literatura.	322

Předmluva k prvnímu vydání z roku 2005

Počasí patří ke skutečnostem, které od pradávna doprovázejí člověka a velice silně ovlivňují jeho život a činnost. Je proto přirozené, že jevy počasí vždy upoutávaly lidskou mysl a brzy se staly předmětem zkoumání, které od dob starověku sledovalo všeobecný a postupný rozvoj přírodních věd a posléze dospělo k vytvoření dnešní meteorologie, jež představuje komplexní vědní obor shrnující znalosti o atmosféře Země. Právě ona totiž představuje fyzikální prostředí, v němž se počasí formuje jako výsledek složitých dynamických procesů, fázových změn vody a transformací energie, což vše probíhá v interakci se zemským povrchem.

Předkládaná knížka je určena všem, kdo se o děje formující počasí hlouběji zajímají a zároveň představuje všeobecný úvod do popisu základních atmosférických dějů. Je určena především třem okruhům čtenářů:

První, a asi nejrozsáhlejší skupinu by měli tvořit přirození zájemci o meteorologii, kteří chtějí problematiku poznat poněkud systematictěji a hlouběji, než umožňují běžné populárně-vědecké publikace, a mají základnu svého přírodovědného poznání alespoň na středoškolské úrovni přibližně odpovídající gymnaziálnímu studiu. Některé náročnější partie sice vyžadují znalosti vysokoškolské matematiky, ale bylo snahou autorů napsat je tak, aby čtenář i bez znalosti uváděných rovnic alespoň zhruba porozuměl hlavním myšlenkám obsahu. Matematický aparát ovšem umožňuje daleko hlubší vhled a aktivnější porozumění.

Druhou skupinu zřejmě budou vytvářet profesní zájemci, kteří sice nejsou meteorology, ale znalosti o atmosféře a o počasí potřebují ve svých profesích.

A konečně třetí skupinou by měli být začínající studenti meteorologie, pro něž má knížka představovat obsah úvodního kurzu, kladoucího si za cíl prvotní faktografické seznámení se strukturou zemské atmosféry a s ději v ní probíhajícími. Je ostatně skutečností, že základem pro text byl právě obsah úvodní přednášky ze všeobecné a synoptické meteorologie, kterou se zahajuje na Matematicko-fyzikální fakultě Univerzity Karlovy navazující magister-

ské studium oboru Meteorologie a klimatologie, když posluchači dříve prošli bakalářským kurzem fyziky zahrnujícím i nezbytnou matematickou přípravu. Zmíněný úvodní kurz meteorologie po dlouhá léta na MFF UK vedl právě jeden z autorů, a to doc. Jaroslav Kopáček.

Knížka je koncipována jako fenomenologický popis základních atmosférických dějů, vychází spíše z empirických poznatků než ze závěrů matematicko-fyzikálních teorií a v tomto smyslu bezprostředně navazuje na dědictví klasické synoptické meteorologie. Zde si zároveň klade za poněkud smělý cíl poskytnout čtenáři přehledný obrázek o vyústění této do značné míry se dnes historicky uzavírající meteorologické disciplíny, jejíž protějšek tvoří tzv. dynamická meteorologie usilující o exaktní matematický popis atmosférických dějů.

Pojem synoptická meteorologie se používá v několika významech, které se vzájemně sice poněkud překrývají, ale zdaleka nejsou totožné. Jako klasickou synoptickou meteorologii zde označujeme především meteorologickou empirii, která prostřednictvím soustavných měření atmosférických dějů a jevů historicky vytvořila pozoruhodnou soustavu poznatků a dat, a postupně tak položila základ pro formování a rozvíjení teoretického matematicko-fyzikálního poznání v meteorologii.

Ve vztahu k vlastní předpovědi počasí, a to ve shodě s původním řeckým významem slova „synopsis“, se jako synoptické rozumí metody, vycházející z analýzy a interpretace dat získaných měřeními a pozorováními současně v daném okamžiku na mnoha místech Země.

A konečně se adjektivum „synoptický“ někdy v odborné literatuře interpretuje ve vztahu k prostorovým měřítkům. V tomto případě jako synoptické měřítko označujeme měřítko odpovídající atmosférickým objektům o horizontálních rozměrech několik stovek až tisíců km, jako jsou např. hlavní tlakové útvary nebo atmosférické fronty. Mezosynoptické měřítko pak odpovídá rozměrům ca o řád menším a vztahuje se mj. např. ke vnitřní struktuře právě zmíněných atmosférických objektů.

V podtitulu této knihy se vyskytuje i název „všeobecná meteorologie“. Pod tímto označením se zpravidla skrývá obsah úvodních kurzů ve výuce meteorologie, tj. poučení o základních meteorologických prvcích (teplota, tlak a vlhkost vzduchu, výpar, oblačnost, srážky, mlhy apod.), jejich denních a ročních chodech a vztazích mezi nimi.

Snahou autorů bylo čtenáře blíže seznámit s bohatstvím postupně nahromaděných poznatků zejména o těch dějích v atmosféře Země, jež nejvíce ovlivňují formování počasí, a to především z pohledu meteorologických

prvků a klasické systematiky vzduchových hmot, atmosférických front a tlakových útvarů. Začíná se základním popisem složení a vertikálního členění atmosféry, navazuje kapitola o tlaku vzduchu, dále se pozornost věnuje slunečnímu záření jako primárnímu energetickému zdroji pro zemské ovzduší, radiační a tepelné bilanci a tepelnému režimu půdy i vodních nádrží jako podkladu pro atmosféru. Dále se čtenář seznámí s teplotním a vlhkostním režimem ovzduší v přízemních i vyšších hladinách, s výměnou tepla a vodní páry mezi zemským povrchem a vzduchem, se stabilitními podmínkami v atmosféře, které určují intenzitu promíchávání vzduchu i možnosti rozvoje vertikálních pohybů ve vzduchových hmotách, a posléze se základy fyziky oblaků a srážek včetně zajímavé problematiky mlh. Následující kapitoly dokládají již zmíněné vyústění klasické synoptické meteorologie. Potom, co se čtenář v nutném rozsahu seznámí s teorií atmosférického proudění, jsou mu prezentovány tři rozsáhlejší kapitoly o vzduchových hmotách a jejich vlastnostech, o atmosférických frontách a tlakových útvarech, zejména pak o jejich vývoji a příslušných jevech počasí. Právě tyto tři kapitoly jsou silně vzájemně provázány. Čtenáři se proto doporučuje číst je nadvakrát. Poprvé za účelem všeobecného základního porozumění a podruhé podrobněji se zřetelem k souvislostem. Závěrečná kapitola by měla poskytnout přehled o metodách předpovědi počasí, o jejich historickém vývoji, možnostech i objektivních limitech.

Naše knížka představuje, jak již bylo řečeno, úvod do studia meteorologie. Pokud jde o stránku klasické synoptické meteorologie, vycházíme především z učebnice Zvereva, která bude našemu čtenáři zřejmě nejlépe dostupná ve slovenském překladu z r. 1986. V případě potřeby upozornit na příslušné rovnice nebo další matematické vztahy využíváme – většinou prostřednictvím odvolávek – existence „Příručky dynamické meteorologie“ autorů Pechaly a Bednáře, která by z literatury o dynamické meteorologii opět měla být našemu čtenáři relativně nejlépe dostupná. Zájemce o intenzivní studium teorie atmosférických dějů lze dále odkázat na rozsáhlou monografickou literaturu, zejména v angličtině, ať již jde např. o klasické učebnice Haltinera a Martina (1957), Johnsona (1954) apod., nebo novější monografie, např. Holton (1992). Tuto a další doporučenou literaturu k navazujícímu a doplňujícímu studiu může čtenář nalézt v seznamu na konci knížky.

Ze současného pohledu představují vůči klasické synoptické meteorologii nový komplementární pohled metody tzv. družicové meteorologie založené na analýzách a interpretacích údajů (resp. snímků) o vertikální struktuře atmosféry a o oblačných systémech získaných pomocí meteorologických

družic. Tato problematika by si bezesporu zasloužila samostatnou knížku. Abychom však našemu čtenáři poskytli v tomto směru alespoň orientační informaci, zařadili jsme ke 13. a 14. kapitole několik družicových snímků frontálních systémů a tlakových útvarů s příslušnými vysvětlujícími texty. Ze světové odborné literatury učebnicového charakteru lze zde upozornit např. na publikaci Scorerovu (1986).

Předmluva ke druhému vydání

Výchozím impulzem k úvahám o druhém vydání byl nesporný a dlouhodobý čtenářský zájem, který nebylo možno uspokojit ani prostřednictvím dotisku, jenž se uskutečnil v r. 2009. Ukázalo se však rovněž, že se čtenáři intenzivně zajímají i o některé tematické okruhy nad rámec toho, co bylo do naší knížky zahrnuto v jejím prvním vydání. V neposlední řadě pak nutno počítat s tím, že meteorologie se stále rozvíjí, což se ve značné míře týká právě problematiky počasí, jeho chápání z hlediska společenských dopadů, metod jeho diagnózy a prognózy. Právě v souvislosti s tím je třeba provádět rozsáhlejší inovace i v základní literatuře širšího informačního charakteru a záběru.

Z inovativního pohledu byla poněkud přepracována, a zejména aktualizována závěrečná, nyní 16. kapitola přímo věnovaná předpovědím počasí. V této souvislosti lze upozornit především na pasáž konkrétně zaměřenou na praktické prezentace meteorologických předpovědí v našich informačních médiích. Zcela nově byla zařazena současná 15. kapitola vztahující se k atmosférické konvekci a k celé atraktivní problematice s ní spojených význačných počasových jevů. Konkrétně jde např. o bouřky, tzv. konvektivní bouře, silné srážky, krupobití, tromby, tornáda apod. Protože zejména v souvislosti s bouřkami zde existují přímé a hluboké vazby k význačným projevům atmosférické elektriny, jsou ve druhé části právě zmiňované kapitoly zařazeny pasáže, jež zřejmě budou pro většinu čtenářů velmi zajímavé a vítané. Zabývají se totiž bouřkovou elektřinou, elektrickými výboji v atmosféře, blesky, jejich strukturou a podmínkami vzniku, je zde informativně zmiňována i dnes atraktivně vnímaná problematika tzv. přechodných světelných úkazů (TLE) objevujících se ve vyšších atmosférických partiích nad oblastmi s právě probíhající intenzivní bouřkovou činností. Ve větším rozsahu byla rozšířena a inovována i 13. kapitola zaměřená na atmosférické fronty. Byla především obohacena o pozdější poznatky modifikující a doplňující teorii front klasicky formulovanou tzv. norskou meteorologickou školou. Zde jde zejména o problematiku tzv. přenosových pásů a o podstatné modifikace v souvislosti s pro-

cesy vztahujícími se k okluzním frontám. Atmosférické fronty úzce souvisejí s tlakovým polem v atmosféře a se strukturou i vývojem tlakových útvarů. V tomto ohledu bylo třeba doplnit i 14. kapitolu zabývající se právě vývojem tlakových útvarů v zemské atmosféře. Byla nově doplněna pasáž shrnující základní informace o tropických cyklonách, jež dnes budí značný zájem i u naší veřejnosti. Celkově možno konstatovat, že ve srovnání s prvním vydáním se dále výrazně prohloubila vzájemná provázanost mezi 13. a 14. kapitolou, mj. v souvislosti s teorií tzv. přenosových pásů. Zvyšuje se tak ještě naléhavost doporučení z předmluvy k prvnímu vydání, aby čtenář přistupoval ke studiu 12., 13. a 14. kapitoly komplexně jako k celku. Určitá rozšíření obsahu byla provedena i v 11. kapitole, zde např. šlo o bližší výklad pojmu cyklostrofické proudění, jež podstatně souvisí s reálným prouděním právě v tropických cyklonách. Řada dílčích doplnění se dále realizovala v 9. kapitole v souvislosti s rozvíjením poznání a vývojem odborné terminologie v tematické oblasti oblačné mikrofyziky a srážkotvorných procesů v oblacích. V ostatních kapitolách byly provedeny spíše jen drobnější úpravy inovačního, doplňujícího nebo upřesňujícího charakteru. Z obecnějšího terminologického pohledu např. omezuje již málo aktuální pojem tzv. všeobecné meteorologie.

V souvislosti s právě zmíněnými doplněními a inovacemi textu nad rámec prvního vydání byly nově se vyskytující pojmy a termíny doplněny do rejstříku a byl příslušně doplněn i seznam literatury.

Vznik a složení zemské atmosféry

1.1 Vznik zemské atmosféry

Atmosféra Země, na jejímž spodním okraji žijeme, je v této knize hlavním předmětem našeho zájmu. Děje, které v ní probíhají, podmiňují i to, čemu říkáme počasí. Kdyby byl fyzikální stav atmosféry v každém místě a ve všech časech stejný, nevyskytovalo by se v našem jazyce slovo „počasí“. Počasím rozumíme stav atmosféry charakterizovaný souhrnem hodnot všech meteorologických prvků a atmosférickými jevy v určitém místě a čase. Počasí se charakterizuje souborem okamžitých nebo krátkodobě průměrovaných hodnot především teploty vzduchu, tlaku vzduchu, atmosférických srážek, dále oblačností, směrem a rychlostí větru apod. Pro počasí je charakteristická velká časová a prostorová proměnlivost.

Naproti tomu jako klima (podnebí) označujeme dlouhodobý („zprůměrovaný“ charakteristický) režim počasí typický pro určitou oblast nebo místo.

Přes všechnu moderní techniku je lidská činnost na počasí silně závislá a počasím, případně jeho průběhem, může být např. ovlivněn i náš zdravotní stav. Živé organismy, lidé i zvířata, dnes potřebují ke svému životu atmosféru ve složení, jaké právě má, odhlédneme-li pochopitelně od antropogenního znečištění. Rostliny by však v řadě ohledů prospívaly lépe, kdyby obsah CO_2 byl vyšší. Musíme připustit, že kdyby zemská atmosféra prošla jiným vývojem, než tomu bylo ve skutečnosti, probíhal by pravděpodobně i vývoj života na Zemi jinak.

Dnes neznáme do všech podrobností dějiny naší zemské atmosféry od jejích nejranějších počátků. Geologie a paleobiologie však ukazují, že v poslední miliardě let došlo na Zemi k významným změnám klimatu, což zřejmě nezůstalo bez vlivu na vývoj života. Je stále předmětem zkoumání, zda a jak s těmito změnami klimatu souvisely i změny složení atmosféry. Stáří Země se odhaduje na 5 miliard let. Poněkud spolehlivější údaje o klimatu máme ale jen za poslední miliardu let. Můžeme se domnívat, že zemská atmosféra měla

v době svého vzniku podstatně jiné složení než dnes. Rozhodující pochody, které podmínily dnešní složení zemské atmosféry, se pravděpodobně odehrály během prvních 4/5 doby vývoje Země, o kterých toho však prostřednictvím geologických a paleontologických nálezů víme relativně nejméně.

Pro řešení naznačeného problému je nutné mít na zřeteli dvě důležité skutečnosti:

1. Výzkum stavby zemského tělesa ukázal, že jeho složky jsou usazeny podle své hustoty, tedy nejtěžší leží nejbliže zemskému středu. To je možné jen tehdy, když částice, které tvoří zemské těleso, byly kdysi tekuté nebo blízké stavu tekutosti, tzn. měly relativně vysokou teplotu.
2. Víme, že mnohé prvky schopné oxidace v průběhu vývoje Země neoxidovaly, i když teplota byla zřejmě vysoká, a jako neoxidované posléze zchladly. To bylo možné jen za předpokladu, že se v dané době nevyskytoval kyslík buď vůbec, nebo jen v nepatrné koncentraci. Odtud samozřejmě vzniká otázka, jak vznikl atmosférický kyslík, který je pro náš život tak důležitý a dnes tvoří přibližně jednu pětinu vzduchu v atmosféře. Ve srovnatelném množství nenalezneme kyslík u žádné další planety v naší sluneční soustavě.

Na problém vzniku Země se nabízely dva pohledy. Na základě prvního z nich měla naše Země s ostatními planetami vzniknout „horkou cestou“ z lůna praslunce, které existovalo již dříve. Praplanety potom kroužily kolem něj jako svítící nebeská tělesa. Během dlouhého období se ochlazovaly, na Zemi se vytvořila kůra a praoceány a nad nimi atmosféra. Dříve než teplota zemského povrchu dosáhla dostatečně nízkých hodnot, musela všechna voda na Zemi existovat ve formě vodní páry.

Ve čtyřicátých letech 20. století byla vypracována modernější teorie vzniku Země tzv. „studenou cestou“. Podle ní Země nevznikla z již existujícího Slunce, ale spolu s ním nahromaděním meteorických těles, prachových a plynných oblaků, tj. z původní studené hmoty. Gravitačním smršťováním se měnila potenciální energie na teplo, které spolu s teplem uvolňovaným při radioaktivních přeměnách ohřálo hmotu tvořící Zemi přinejmenším tak silně, že byla možná její sedimentace podle hustoty. Lehké plyny tvořily praplanetární atmosféru. Na rychlosti smršťování závisela hodnota teploty Země. Kdyby smršťování trvalo příliš dlouho, zůstala by Země chladná, protože vyzařování tepla z jejího povrchu by kompenzovalo pomalou produkci tepla smršťováním.

V minulosti se vysvětloval vznik kyslíku v zemské atmosféře jen činností rostlin. Zelené rostliny odebírají totiž fotosyntézou z atmosféry oxid uhličitý a odevzdávají zpět kyslík. Pro nejstarší období existence zemské atmosféry je však toto vysvětlení vzniku kyslíku v zemské atmosféře zřejmě neuspokojivé.

Koncem čtyřicátých let bylo v USA prokázáno analýzou světla noční oblohy, že ve výškách nad 50 km, především v okolí 80 km, probíhá rozklad atmosférické vodní páry ultrafialovým zářením Slunce. Lehký vodík stoupá vzhůru a kyslík difunduje k zemi. Pod výškou 50 km tento proces nemůže probíhat, protože zde se dostáváme pod horní hranici ozonoféry a ozon plně absorbuje právě ty vlnové délky záření, které vodní páru rozkládají.

Představu o procesech tvoření kyslíku během vývoje zemské atmosféry je možné vyjádřit následovně: v době, kdy ještě žádný kyslík nebyl v atmosféře obsažen, mohlo ultrafialové záření Slunce vcelku nerušeně pronikat až na zemský povrch. V jeho blízkosti existovala vysoká koncentrace vodní páry, která pak byla snadno rozkládána. Rovněž kyslík vzniklý ve větších výškách klesal k zemskému povrchu. Část kyslíku O_2 tvoří pod vlivem ultrafialového záření ozon O_3 . Bezprostředně nad povrchem Země tedy vznikla vrstva ozonu. Proces rozkladu vodní páry ultrafialovým zářením však mohl pokračovat jen nad touto vrstvou. Popsaný děj potom probíhal v poněkud větší výšce. Horní hranice ozonu se tak v průběhu vývoje Země posouvala stále výše, a posouval se tedy i sledovaný proces vzniku kyslíku. To, co bylo v současnosti zjištěno v oblasti výšek kolem 80 km, je pouze zbytek procesu, který kdysi probíhal u zemského povrchu a vedl ke vzniku prvotního atmosférického kyslíku.

Určité těžkosti této teorie vzniku kyslíku v zemské atmosféře nastanou při kvantitativních odhadech. Kdyby všechny kyslík obsažený v oxidech vznikl fotodisociací vodní páry, potom by muselo být rozloženo $3,8 \times 10^4 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ vody, tedy 38 kg vody nad každým čtverečním centimetrem zemského povrchu. Vzhledem k dnes zjištěné intenzitě rozkladu H_2O mohlo být disociováno během 4,5 miliardy let jen asi $20 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ vody. Z těchto číselných hodnot je jasné, že právě zmíněný děj nemohl být jediným zdrojem kyslíku v zemské atmosféře. Asimilace zelených rostlin a činnost chemicky redukujících bakterií, popř. další děje musely tedy hrát přinejmenším v určitém časovém období svou nepominutelnou, i když ne dominující roli.

Kdyby ve formující se Zemi nevznikla tak vysoká teplota, aby připouštěla v zemském jádru proces jaderných přeměn, musel by pramateriál Země obsahovat všechny prvky, které dnes nalézáme v pevném zemském tělese, ve vodě oceánů a v atmosféře. Chemické sloučeniny se však měnily. Vodíku bylo v pramateriálu dostatek, a proto dnes připouštíme, že sloučeniny vodíku nej-

častěji s kyslíkem, uhlíkem a dusíkem (vodní pára H_2O , metan CH_4 , amonium NH_3 atd.) dominovaly ve stavbě atmosféry. Tyto sloučeniny se fotochemickým působením ultrafialového slunečního záření během času přeměnily na CO_2 a na čistý N_2 . Oxid uhličitý je chemicky z největší části spojen s tvorbou hornin. Nelze zanedbat ani pozdější činnost rostlin, které ke své stavbě potřebují uhlík obsažený v CO_2 .

Velké planety, Jupiter, Saturn, Uran a Neptun, v jejichž atmosféře byl spektrální analýzou nalezen plynný čpavek a metan, jsou příliš vzdáleny od Slunce na to, aby zde nastala fotochemická přeměna těchto plynů. Atmosféry těchto planet zůstaly v raném stadiu vývoje. Na Venuši, která je Slunci blíže, mohla naproti tomu proběhnout přeměna čpavku a metanu rychleji než na Zemi.

Shora krátce naznačené pravděpodobné dějiny zemské atmosféry skrývají samozřejmě ještě mnoho otevřených otázek. Např. netečný plyn neon, který je dosti hmotný na to, aby neunikal od Země, existuje v atmosféře jen ve stopách, ačkoli jeho množství v kosmu je větší. To by mohlo svědčit o tom, že v nejrannějším stadiu byla atmosféra Země tak horká, že se neon odpařil do světového prostoru. Pak by byl dnes existující neon zbytkem, který procesy odpařování přežival, přičemž po zchladnutí Země se musela vytvořit nová atmosféra.

Nové znalosti o těchto dosud nedořešených otázkách by mohly přinést další poznatky získané kosmickými sondami při výzkumech chemického složení atmosfér planet naší sluneční soustavy a rovněž výzkum v oblasti problematiky tzv. exoplanet. Podrobnější poučení o vývoji atmosféry Země může čtenář nalézt např. v knize Faust (1968). Novější poznatky mají stále daleko do definitivní podoby, berou např. v úvahu i procesy související s dopady meteoritů a dalších kosmických těles na Zemi, roli období silné vulkanické činnosti apod. Skutečnost, že v historii vývoje Země byl obsah oxidu uhličitého v její atmosféře většinou výrazně větší, než je tomu dnes, se považuje za významnou mj. z hlediska vývoje biosféry a klimatických změn. Jako souhrnnou literaturu lze čtenáři doporučit příslušnou kapitolu ve druhém díle *Encyclopedia of Atmospheric Sciences* (2003).

1.2 Dnešní složení atmosféry Země

Uvedli jsme již, že složení toho, čemu říkáme vzduch, nebylo v průběhu geologických dob stálé a že současné složení zemské atmosféry je výsledkem četných pochodů, které dnes do všech podrobností ani neznáme. Definujme