

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

ENVIRONMENTÁLNÍ 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

Praha 2025

Environmentální texty 1

Grafická úprava Jakub Kovařík

Redakce Eva Flanderková

Sazba DTP Nakladatelství Karolinum

Vydání druhé, odpovídá třetímu tištěnému

© Jaroslav Kopáček, Jan Bednář, Michal Žák, 2025

© Univerzita Karlova, Nakladatelství Karolinum, 2025

ISBN 978-80-246-6171-1

ISBN 978-80-246-6176-6 (pdf)



Univerzita Karlova
Nakladatelství Karolinum

www.karolinum.cz
ebooks@karolinum.cz

Obsah

Předmluva k prvnímu vydání z roku 2005	11
Předmluva ke druhému vydání z roku 2019	15
Předmluva ke třetímu vydání	17
1. VZNIK A SLOŽENÍ ZEMSKÉ ATMOSFÉRY	18
1.1 Vznik zemské atmosféry	18
1.2 Dnešní složení atmosféry Země	21
1.3 Ozon a oxid uhličitý	23
1.3.1 Ozon	23
1.3.2 Oxid uhličitý	25
1.4 Vodní pára v zemské atmosféře	27
1.5 Pevné a kapalně částice v atmosféře	29
1.6 Vertikální členění atmosféry	32
1.7 Turbulence a konvekce v atmosféře	36
2. TLAK A HUSTOTA VZDUCHU	40
2.1 Tlak vzduchu a jeho jednotky	40
2.2 Hustota vzduchu	40
2.3 Virtuální teplota	42
2.4 Změna tlaku vzduchu s výškou	43
2.4.1 Základní hydrostatická rovnice	43
2.4.2 Výška homogenní atmosféry	44
2.4.3 Barometrická formule pro izotermní atmosféru	45
2.4.4 Vertikální barický gradient	49
2.5 Změna hustoty vzduchu s výškou	50
2.6 Aperiodické změny tlaku vzduchu	52
2.7 Periodické změny tlaku vzduchu	53
2.8 Síla tlakového gradientu, tlakové útvary	54
2.9 Horizontální rozložení atmosférického tlaku na zemi	56
2.10 Některé další pojmy týkající se tlaku vzduchu	58
2.11 Gravitace a zemská tíže, potenciální energie v atmosféře, geopotenciál	59

3. TEPELNÉ POMĚRY PŮDY A POVRCHU VODNÍCH NÁDRŽÍ	64
3.1 Záření v atmosféře, radiační bilance a tepelná bilance zemského povrchu.....	64
3.1.1 Sluneční záření.....	64
3.1.2 Dlouhovlnné záření, skleníkový efekt, globální oteplení	69
3.2 Oteplování a ochlazování zemského povrchu	72
3.3 Denní a roční chod teploty povrchu půdy	74
3.4 Noční a ranní mrazy na povrchu půdy.....	77
3.5 Šíření tepla do půdy a změny teploty v půdě	79
3.6 Tepelné poměry vodních nádrží.....	83
 4. TEPLOTA SPODNÍCH VRSTEV VZDUCHU	88
4.1 Oteplování a ochlazování vzduchu.....	88
4.2 Denní chod teploty vzduchu.....	90
4.3 Roční chod teploty vzduchu	93
4.4 Aperiodické změny teploty vzduchu.....	94
4.5 Extrémní teploty	95
 5. VERTIKÁLNÍ STABILITA VZDUCHOVÝCH HMOT	97
5.1 Individuální teplotní gradient v nenasyčeném vzduchu, potenciální teplota	97
5.2 Individuální teplotní gradient v nasyceném vzduchu.....	100
5.3 Aktuální vertikální gradient teploty.....	102
5.4 Vertikální stabilita nenasyčeného vzduchu.....	102
5.5 Potenciální teplota při vertikálních pohybech vzduchu.....	106
5.6 Vliv výměny na teplotní zvrstvení	107
5.7 Vertikální stabilita nasyceného vzduchu.....	109
5.8 Pseudoadiabatické děje	110
 6. ROZDĚLENÍ TEPLoty V ATMOSFÉŘE S VÝŠKOU	113
6.1 Změna teploty s výškou v přízemní vrstvě vzduchu	113
6.2 Změna teploty s výškou ve vyšších vrstvách atmosféry	114
6.3 Inverze teploty.....	115
 7. VÝPAR	120
7.1 Oběh vody v přírodě.....	120
7.2 Fyzikální podstata výparu	120
7.3 Napětí nasycení	121

7.4	Rychlost vypařování	122
7.5	Výpar za delší období	124
7.6	Denní a roční chod výparu	125
8.	VLHKOST VZDUCHU	127
8.1	Vlhkost vzduchu a příčiny jejích změn	127
8.2	Denní chod absolutní vlhkosti a tlaku vodní páry	127
8.3	Roční chod absolutní vlhkosti a tlaku vodní páry	128
8.4	Denní chod relativní vlhkosti	128
8.5	Roční chod relativní vlhkosti	129
8.6	Rozdělení vlhkosti vzduchu v atmosféře s výškou.	129
9.	KONDENZACE A SUBLIMACE VODNÍ PÁRY V ATMOSFÉŘE	131
9.1	Podmínky kondenzace vody v atmosféře, kondenzační jádra	131
9.2	Zamrzání kapek, ledová jádra, vznik srážek v oblacích	133
9.3	Kondenzace a sublimace na zemském povrchu	137
9.4	Mlhy a jejich klasifikace	139
9.5	Oblaky a jejich druhy	142
9.6	Složení oblaků	145
9.7	Děje, jimiž vznikají oblaky	145
9.8	Oblaky nefrontální a frontální	148
9.9	Oblačnost	149
9.10	Denní chod oblačnosti	149
9.11	Roční chod oblačnosti	150
10.	ATMOSFÉRICKE SRÁŽKY	151
10.1	Význam pojmu srážky	151
10.2	Kvantitativní charakteristiky srážek	151
10.3	Trvalé srážky a přehánky	152
10.4	Srážky nefrontální a frontální	153
10.5	Denní a roční chod srážek	153
10.6	Bližší popis hlavních druhů padajících srážek	154
10.7	Sněhová pokrývka	156
11.	PROUDĚNÍ V ZEMSKÉ ATMOSFÉŘE	157
11.1	Proudnic a trajektorie	157
11.2	Geostrofické proudění	157
11.3	Gradientové proudění	160

11.4 Vliv tření na proudění vzduchu, proudění v tlakových útvarech	166
11.5 Základní prvky celkového proudění v zemské atmosféře	168
11.6 Divergence a vorticity proudění	172
12. VZDUCHOVÉ HMOTY	174
12.1 Podmínky tvoření vzduchových hmot	174
12.2 Klasifikace vzduchových hmot	176
12.3 Podmínky počasí ve stabilních vzduchových hmotách	179
12.3.1 Podmínky počasí v teplých stabilních vzduchových hmotách.....	179
12.3.2 Podmínky počasí ve studených stabilních vzduchových hmotách	181
12.4 Podmínky počasí v instabilních vzduchových hmotách.....	182
12.4.1 Podmínky počasí ve studených instabilních vzduchových hmotách.....	182
12.4.2 Podmínky počasí v teplých instabilních vzduchových hmotách	185
12.5 Místní vzduchové hmoty	187
12.6 Charakteristiky zeměpisných typů vzduchových hmot severní polokoule	187
12.6.1 Arktický vzduch (AV).....	187
12.6.2 Vzduch mírných šířek (VMŠ), polární vzduch	188
12.6.3 Tropický vzduch (TV)	189
12.6.4 Ekvatoriální vzduch (EV).....	191
12.7 Transformace vzduchových hmot	191
13. ATMOSFÉRICKÉ FRONTY	195
13.1 Obecné vlastnosti atmosférických front	195
13.2 Klasifikace atmosférických front	195
13.3 Vzorec pro sklon frontální plochy	198
13.4 Barické a izalobarické pole fronty	201
13.5 Posun front.....	203
13.6 Tvoření a rozpadávání front	205
13.7 Přenosové pásy	209
13.8 Teplé fronty	212
13.8.1 Teplé fronty na přízemních povětrnostních mapách	212
13.8.2 Vertikální řezy teplých front	218
13.8.3 Příznaky přechodu teplé fronty přes místo pozorování	219
13.9 Studené fronty	221
13.9.1 Studené fronty na přízemních povětrnostních mapách	221

13.9.2	Aerologická analýza studených front	225
13.9.3	Příznaky přechodu studených front přes místo pozorování	227
13.9.4	Podružné fronty	229
13.10	Okluzní fronty	231
13.10.1	Okluzní fronty na přízemních povětrnostních mapách	231
13.10.2	Aerologická analýza okluzních front	235
13.10.3	Příznaky přechodu okluzních front přes místo pozorování	237
14.	CYKLONY A ANTICYKLONY	239
14.1	Typy cyklon a anticyklon	239
14.2	Stadia ve vývoji cyklon a anticyklon	240
14.3	Velikost cyklon a anticyklon	244
14.4	Vertikální pohyby v cyklonách a anticyklonách	245
14.5	Přemísťování cyklon a anticyklon	246
14.6	Vznik mimotropických cyklon a podmínky počasí	248
14.6.1	Místní nefrontální cyklony	248
14.6.2	Frontální cyklony	249
14.6.2.1	Teorie polární fronty	249
14.6.2.2	Detailnější pohled na tvoření frontálních cyklon	250
14.6.2.3	Stavba mladých cyklon	253
14.6.2.4	Stavba okludovaných cyklon	254
14.6.2.5	Regenerace cyklon	255
14.6.3	Shapirův a Keyserův model cyklony	257
14.6.4	Podmínky počasí v cyklonách	258
14.6.5	Explozivní cyklogeneze	261
14.7	Vývoj anticyklon	262
14.8	Podmínky počasí v anticyklonách	263
14.9	Tropické cyklony	266
14.9.1	Základní charakteristika	266
14.9.2	Vznik tropických cyklon a jejich vývojová stadia	268
14.9.3	Lokální názvy tropických cyklon	269
14.9.4	Příklad klasifikace tropických cyklon dle jejich intenzity	269
14.10	Výškové cyklony a anticyklony	270
15.	ATMOSFÉRICKÁ KONVEKCE, KONVEKTIVNÍ BOUŘE, BOUŘKY A DOPROVODNÉ JEVY	274
15.1	Buněčná konvekce	274
15.2	Konvekční buňky a oblačné jevy	275

15.3	Jednoduchá konvekční cela	278
15.4	Multicely a supercely	280
15.5	Nebezpečné meteorologické jevy vyskytující se v souvislosti s konvektivními bouřemi: kroupy, tromby, tornáda	282
15.6	Obláčná elektřina	285
15.7	Hrotové (bodové) výboje	292
15.8	Blesky	294
15.9	„Tajemství“ blesku, ubíhající elektrony	298
15.10	Přechodné světelné úkazy související s bouřkovou aktivitou	301
16.	PŘEDPOVĚĎ POČASÍ	305
16.1	Metody synoptické meteorologie	305
16.2	Objektivní předpovědní metody	309
16.3	Prediktabilita atmosférických dějů	316
16.4	Jaký je současný stav v problematice předpovědi počasí?	319
16.5	Předpověď počasí v médiích	323
	Literatura	328
	Rejstřík	331

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, kladoucím 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 měřením a pozorováním 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 z roku 2019

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. omezujeme 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.

Předmluva ke třetímu vydání

Nechceme-li opakovat řadu informací obsažených v předmluvách k prvnímu a ke druhému vydání této knížky, může být nynější předmluva dosti stručná. Jistě je vhodné vyslovit potěšení nad skutečností, že knížka si stále udržuje značný a trvalý čtenářský zájem, přičemž plní jak roli základní učebnice pro studenty meteorologie a s ní souvisejících vědních a studijních oborů, tak roli populárnějšího zdroje informací pro široký okruh zájemců o meteorologickou a počasovou problematiku obecně i na různých speciálních úrovních.

Druhé vydání z r. 2019 bylo proti prvnímu vydání v r. 2005 značně rozšířeno, což je podrobněji zachyceno v příslušné předmluvě. Nynější vydání bychom ve srovnání s vydáním bezprostředně předcházejícím mohli charakterizovat jako přiměřeně aktualizací, odpovídající relativně kratšímu časovému odstupu. V největší míře byla aktualizována poslední kapitola bezprostředně věnovaná vlastní předpovědi počasí a prezentaci meteorologických informací ve sdělovacích prostředcích, mj. a dnes zejména na internetu a sociálních sítích, kde v současnosti průběžně dochází ke značnému vývoji a rozvoji. Pokud jde o věcné záležitosti týkající se vlastních dějů v zemské atmosféře, byly na několika místech doplněny a poněkud rozšířeny stávající texty. Jde především o pojem polární cirkulační buňky (kap. 11.5), jež ve schématu všeobecné cirkulace atmosféry doplňuje Hadleyovu a Ferrellovu cirkulační buňku, dále v kap. 14.6.1 byl aktualizován výklad pojmu polární cyklona a doplněn pojem tzv. medikánu. Konečně v kap. 15.8 upozorňujeme na tzv. Schumannovu rezonanci jako na významný indikátor bouřkové činnosti a konkrétně intenzity bleskových elektrických výbojů.

Rádi bychom vyslovili naději, že i třetí vydání splní svůj očekávaný účel, plně vyhoví čtenářskému zájmu a bude svému čtenářskému okruhu opravdu přínosné.

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 nejbližze 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 praatmosféru. 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 posunovala stále výše, a posunoval 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 všechn 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 redukcujících 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 nejranějším stadiu byla atmosféra Země tak horká, že se neon odpařil do světového prostoru. Pak by byl dnes existující neon zbytkem, který procesy odpařování přežval, 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

suchý a čistý vzduch jako směs plynů, jejichž zastoupení vyjádřené v objemových procentech uvádíme v tab. 1.1 (Faust 1968; Hartmann 1994).

Tab 1.1: Složení vzdušné směsi (zastoupení jednotlivých složek v objemových procentech) odpovídající suché a čisté atmosféře

PLYN	CHEMICKÁ ZNAČKA	% OBJEMU	POMĚRNÁ MOLEKULOVÁ HMOTNOST $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$
Dusík	N_2	78,084	28,0134
Kyslík	O_2	20,9476	31,9988
Argon	Ar	0,934	39,948
Oxid uhličitý	CO_2	0,0314	44,00995
Neon	Ne	0,001818	20,183
Helium	He	0,000524	4,0026
Metan	CH_4	0,0002	16,04303
Krypton	Kr	0,000114	83,80
Vodík	H_2	0,00005	2,01594
Oxid dusný	N_2O	0,00005	44,0128
Xenon	Xe	0,0000087	131,30
Oxid siřičitý	SO_2	0–0,0001	64,0628
Ozon	O_3	0–0,00007	47,9982
Oxid dusičitý	NO_2	stopy	46,0055
Čpavek	NH_3	stopy	17,03061

V minulosti budila intenzivní zájem otázka, jak se mění chemické složení vzduchu se vzrůstající výškou nad zemským povrchem. Kdyby totiž působila jen síla tíže, musely by být plyny uspořádány podle molární hmotnosti, tzn. nejtěžší plyn dole, zatímco nejlehčí vodík v největších výškách atmosféry. Avšak turbulence spojená se všeobecným pohybem vzduchu, vertikální pohyby velkého i malého měřítka a další efekty způsobují vertikální promíchávání vzduchu. Máme-li na mysli suchou a čistou atmosféru, ukázala měření na nejvyšších horách, že neexistují žádné podstatnější změny v chemickém složení vzduchu ve srovnání se vzduchem v nížinných oblastech. Také vzorky vzduchu odebrané při balonových výstupech nevykázaly žádné změny s výškou. V pozdější době byly prováděny experimenty pomocí raket, které ukázaly, že ani ve stratosféře (výšky ca 11 až 50 km), ani ve větší části mezosféry (výšky ca 50 až 80 km) se nevyskytují žádné podstatné odlišnosti v chemickém složení atmosféry. Určitou výjimku z právě uvedeného však v reálné at-

mosféře představuje ozon, oxid uhličitý a vodní pára. Blíže o tom pojednáme v části 1.6.

V horních partiích mezoféry, nalézající se ve výškách ca mezi 50–80 km (viz 1.6), začíná působit proces, který má podstatný význam pro složení vyšších vrstev atmosféry. Působením krátkovlnného slunečního záření dochází k disociaci molekul i ionizaci molekul a atomů. Zmíněný proces působí v horních vrstvách mezoféry rozklad molekul O_2 na atomární kyslík. V ionosféře, tj. ve výškách nad ca 60 km (viz 1.6), je také disociován N_2 . S přibývajícím výškou jsou součástí vzduchu stále častěji ionizovány. V horních vrstvách ionosféry potom začínají převládat lehčí plyny a jejich ionty. Belgický geofyzik Nicolet dospěl k závěru, že ve výškách nad 600 km musí nastoupit vrstva helia. Dospěl k tomu v 60. letech minulého století prostřednictvím pozorování zpomalování pohybu balonového satelitu ECHO. Existence těžších plynů, jako je dusík a kyslík, by dávaly větší, vodík pak menší pokles hustoty vzduchu s výškou. Nad vrstvou helia se potom zemská atmosféra skládá z ionizovaných atomů vodíku a plynule přechází v meziplanetární prostor.

1.3 Ozon a oxid uhličitý

Při sledování chemického složení atmosféry se setkáváme s plyny, které jsou tam ve srovnání např. s dusíkem a kyslíkem obsaženy jen menšinově. Mohli bychom tedy předpokládat, že vzhledem ke své relativně malé koncentraci nemají na vlastnosti atmosférického vzduchu podstatný vliv. Takový předpoklad by však byl zcela chybný, neboť i tyto plyny dalekosáhle ovlivňují pochody v atmosféře a do značné míry určují její chování. Především je to proto, že některé z nich mají schopnost pohlcovat a emitovat záření. Pro děje v zemské atmosféře mají v tomto směru význam především ozon a oxid uhličitý. Neznamená to ovšem, že to jsou jediné plyny, jejichž vlastnosti je nutné studovat. Existuje celá řada dalších, o nichž pojednává obor atmosférické chemie. Na tomto místě se však stručně zmíníme jen o právě uvedených nejvýznamnějších dvou plynech.

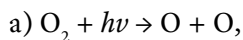
1.3.1 OZON

Ozon představuje formu molekuly kyslíku, která je složena ze tří kyslíkových atomů. Kondenzuje při teplotě $-111,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ v tmavomodrou kapalinu a při

$-192,7^{\circ}\text{C}$ krystalizuje na tmavě fialové krystalky. Ozon je chemicky poměrně nestabilní. V čistém prostředí (vzduchu) a při malých koncentracích se rozkládá poměrně pomalu, ale při teplotách kolem 100°C nebo za přítomnosti oxidu dusičitého (NO_2), chloru nebo oxidů těžkých kovů se rychle rozkládá na molekulární (O_2) a excitovaný atomární (O) kyslík. Největší množství atmosférického ozonu se nachází ve stratosféře, ve výškách 20–50 km nad úrovní moře. Pro oblast těchto výšek se v odborné literatuře obvykle používá název ozonoféra. V našich mírných zeměpisných šířkách se atmosférické hladiny nejbohatší ozonem nalézají ve výškách ca 22–25 km, nad rovníkem je to však až ve výškách přes 30 km.

Význam stratosférického ozonu spočívá především v jeho schopnosti pohlcovat ultrafialové sluneční záření, které obsahuje vlnové délky do 400 nm a schematicky se rozděluje do tří pásů: UV-C (vlnové délky menší než 280 nm), UV-B (280–320 nm) a UV-A (320–400 nm). V pásu UV-C je ultrafialové záření prakticky úplně absorbováno již ve vyšších hladinách atmosféry před vstupem shora do ozonoféry, a to fotochemickými reakcemi a excitacemi atomů a molekul zde přítomných řídkých plynů. Pokud jde o absorpci ozonem ve vrstvách ozonoféry, je velmi významná v oblasti pásu UV-B, kde dosahuje v globálním pohledu účinnosti ca 77 %. V pásu UV-A je absorpční účinnost již slabší a orientačně dosahuje ca 28 %. Kromě toho ozon ještě slaběji pohlcuje ve viditelné části spektra a několik významnějších absorpčních čar můžeme nalézt i v infračervené části spektra. Silná absorpční schopnost ozonu v pásu UV-B se zejména týká tzv. „biologicky aktivního“ záření, které narušuje některé biologicky zásadně důležité látky (bílkoviny, nukleové kyseliny apod.). Z tohoto hlediska plní tedy ozon funkci filtru, bez jehož existence by současné formy života byly bezpochyby narušeny nebo dokonce zničeny. Kromě toho absorpce záření vede k ohřívání těch vrstev atmosféry, které obsahují ozon a v podstatě vytváří lokální maximum ve vertikálním průběhu teploty vzduchu v oblasti horní části stratosféry.

Ozon vzniká ve stratosféře pod vlivem ultrafialového záření Slunce z molekulárního kyslíku prostřednictvím následujících reakcí:



zatímco jeho rozklad probíhá podle schématu

