



ATMOSFÉRA
A KLIMA
AKTUÁLNÍ
OTÁZKY
OCHRANY
OVZDUŠÍ

MARTIN BRANIŠ, IVA HŮNOVÁ (EDS.)

KAROLINUM

Atmosféra a klima

Aktuální otázky ochrany ovzduší

Martin Braniš

Iva Hůnová

a kolektiv autorů

Vydala Univerzita Karlova v Praze

Nakladatelství Karolinum

Redakce Lenka Ščerbaničová

Grafická úprava Jan Šerých

Sazba DTP Nakladatelství Karolinum

Vydání první

© Univerzita Karlova v Praze, 2009

© Martin Braniš, Iva Hůnová (za kolektiv autorů), 2009

ISBN 978-80-246-1598-1

ISBN 978-80-246-3118-9 (online : pdf)



Univerzita Karlova v Praze
Nakladatelství Karolinum 2016

www.karolinum.cz
ebooks@karolinum.cz

OBSAH

PŘEDMLUVA

11

Jan Bednář

1.	ZÁKLADNÍ INFORMACE O ATMOSFÉŘE ZEMĚ	13
1.1	Složení a vertikální členění atmosféry	13
1.2	Sluneční a dlouhovlnné záření	18
1.3	Radiační a tepelná bilance zemského povrchu	27
1.4	Stabilitní podmínky v atmosféře	28
1.5	Teplovní inverze	31
1.6	Proudění vzduchu a pole atmosférického tlaku	33
1.7	Oblaky	41
1.7.1	Podmínky vzniku oblaků	41
1.7.2	Druhy oblaků	42
1.7.3	Mikrostrukturální procesy v oblacích	44
1.7.4	Teorie vzniku srážek	46
1.7.5	Znečištění oblačné a srážkové vody	48
	Literatura	49

Rudolf Přibil

2.	PŘIROZENÉ SLOŽKY ATMOSFÉRY	50
	Úvod	50
2.1	Historie zemské atmosféry	50
2.2	Dynamika atmosféry	52
2.3	Přirozené zdroje a propady látek v atmosféře	55
2.3.1	Biologické zdroje a propady	56
2.3.2	Geochemické zdroje a propady	57
2.3.3	Atmosférické zdroje a propady	59
2.4	Pohyb vybraných prvků v atmosféře	60
2.4.1	Dusík	60
2.4.2	Kyslík	61
2.4.3	Uhlík	62
2.4.4	Síra	63
2.4.5	Vodík	64
2.5	Závěr	65
	Literatura	66

Václav Cílek, Jiří Filip

3.	INTERAKCE ATMOSFÉRY S DALŠÍMI ČÁSTMI ZEMSKÉHO SYSTÉMU A OKOLNÍM VESMÍREM	67
3.1	Úvod	67
Box 1:	Antropocén	68
3.2	Základní pojmy a koncepce	68
3.3	Interakce atmosféry se Sluncem a okolním vesmírem	70

Box 2: Sluneční cykly	76
3.4 Atmosféra a vnitřní síly Země	77
3.5 Sedimenty a půdy jako zdroje a propady atmosférických plynů	79
3.6 Vztah atmosféry a oceánu	83
3.7 Esence života: biogeochemické cykly	85
3.8 Tři klimatické úrovně	91
3.9 Závěr: klima je víc než jenom stav atmosféry	92
Box 3: Společnost, atmosféra a klimatické katastrofy	93
Literatura	94

Jana Moldanová

4. CHEMIE PLYNNÉ FÁZE	96
4.1 Důležité plyny absorbující záření v atmosféře a jejich fotolýza	96
4.1.1 Absorpce záření a fotochemické procesy v atmosféře	96
4.1.2 Důležité absorbující plyny a jejich fotolýza	101
4.2 Základy atmosférické chemie plyné fáze	103
4.2.1 Cyklus kyslíku (Ox)	105
4.2.2 Cyklus oxidů vodíku (HOx)	105
4.2.3 Cyklus oxidů dusíku (NOx)	107
4.2.4 Reakce CO a těkavých uhlovodíků (VOC)	109
4.2.5 Vznik troposférického ozonu	113
4.2.6 Cyklus halogenů	116
4.2.7 Stratosférický ozon	117
Literatura	119

Jan Hovorka

5. ATMOSFÉRICKÝ AEROSOL	121
5.1 Definice a formy atmosférického aerosolu	121
5.2 Velikostní distribuce částic aerosolu	124
5.3 Zdroje a propady atmosférického aerosolu, doba setrvání	131
5.4 Vertikální distribuce atmosférického aerosolu	135
5.5 Chemické složení atmosférického aerosolu	137
Literatura	139

Ivan Holoubek, Jan Hovorka

6. ORGANICKÉ LÁTKY V ATMOSFÉŘE	140
6.1 Organické sloučeniny v životním prostředí	140
6.2 Těkavé organické látky, úvod a definice	141
6.2.1 Zdroje VOCs	142
6.2.2 Základní chemické a fyzikální vlastnosti a reaktivita VOCs	143
6.2.3 Procesy odbourávání těkavých organických látek v troposféře	143
6.2.3.1 Alkany	144
6.2.3.2 Alkeny	145
6.2.3.3 Aromáty	145
6.2.3.4 Alkoholy	146
6.2.3.5 Karbonylové sloučeniny (aldehydy, ketony)	147

6.2.3.6	Monokarboxylové kyseliny	147
6.2.3.7	Halogenované uhlovodíky	148
6.2.4	Toxické a karcinogenní účinky VOCs	148
6.2.5	Negativní účinky VOCs v atmosféře	148
6.3	Semivolatilní, persistentní organické polutanty	150
6.3.1	Zdroje POPs	151
6.3.2	Osud POPs v prostředí	151
6.3.3	Těkání pesticidů a dalších POPs z půd	155
6.3.4	Trendy v environmentální chemii persistentních, bioakumulativních a toxických látek (PBTs)	157
6.3.5	Trendy a environmentální koloběh PBTs	158
	Literatura	159

Iva Hůnová

7.	ATMOSFÉRICKÁ DEPOZICE	160
7.1	Úvod	160
7.2	Historický pohled na atmosférickou depozici	163
7.3	Složky atmosférické depozice	165
7.3.1	Mokrú atmosférickú depozice	165
7.3.1.1	Vertikální	165
7.3.1.2	Horizontální	166
7.3.2	Suchá atmosférická depozice	167
7.4	Atmosférická depozice v Evropě	168
7.5	Atmosférická depozice v České republice	169
7.6	Kritické zátěže	172
7.7	Účinky	175
	Literatura	177

Martin Braniš

8.	ZNEČIŠŤOVÁNÍ OVZDUŠÍ	180
8.1	Proces znečišťování ovzduší	180
8.2	Emise a emisní zdroje	181
8.3	Imise	183
8.4	Primární a sekundární polutanty	184
8.5	Časová a prostorová variabilita	184
8.6	Venkovní prostředí lidských sídel	186
8.6.1	Redukční smog	187
8.6.2	Fotochemický smog	188
8.7	Vnitřní prostředí	191
8.7.1	Spalovací procesy	192
8.7.2	Pohyb osob a materiálů	192
8.7.3	Zdroje biogenní povahy	193
8.7.4	Zařízení, vybavení a prostředky údržby	193
8.7.5	Vliv vnějšího ovzduší	193
8.8	Znečištění ovzduší a ekonomický rozvoj	193
	Literatura	195

Jaroslav Fiala

9.	MONITORING A HODNOCENÍ KVALITY OVZDUŠÍ	198
9.1	Nástroje pro získávání objektivních podkladů pro hodnocení a řízení kvality ovzduší	198
9.2	Monitoring jako klíčový nástroj získávání objektivních podkladů	199
9.3	Imisní monitoring	200
9.3.1	Imisní monitorovací síť	203
9.3.2	Přehled metod měření imisí	208
9.3.3	Přehled základních metod měření v síti manuálních stanic	210
9.3.4	Metody v sítích automatizovaného monitoringu	213
9.3.5	Spektroskopické techniky měření na dálku	221
9.3.6	Zajištění a kontrola kvality (QA/QC) naměřených dat	222
9.4	Informační systém kvality ovzduší ČR – ISKO	223
9.4.1	Datové agendy ISKO	226
9.4.2	Zajišťování kvality a věrohodnosti dat v rámci ISKO	228
9.4.3	Výstupy a služby ISKO	229
9.5	Mezinárodní informační soustavy kvality ovzduší – výměna dat	230
9.6	Principy hodnocení kvality ovzduší plynoucí ze směrnic EU	232
9.6.1	Problematika klasifikace zón z hlediska kvality ovzduší	235
	Literatura	238

Josef Brechler

10.	MODELOVÁNÍ ZNEČIŠTĚNÍ OVZDUŠÍ	240
10.1	Úvod	240
10.2	Fyzikální modelování	241
10.3	Prostorová měřítka	241
10.4	Typizace emisních zdrojů	243
10.5	Matematické modely znečištění ovzduší	247
10.5.1	Typy modelů	247
10.5.2	Základní vztahy	251
10.5.3	Rovnice difúze	251
10.5.4	Gaussovské disperzní modely	252
10.5.5	Vlečkové modely	256
10.5.6	Puff modely	257
10.5.7	Dynamické modely	258
10.5.8	Některé používané parametrizace chemických procesů	259
10.5.9	Referenční modely	261
10.6	Závěr	262
	Literatura	262

Alena Bartoňová

11.	ÚČINKY ZNEČIŠTĚNÍ OVZDUŠÍ	264
11.1	Úvod	264
11.2	Klasifikace znečišťujících látek	264
11.3	Expozice	266
11.4	Modely expozice atmosférickým škodlivinám	266

11.5	Ovzduší a zdraví	270
11.6	Účinky na stavební materiály	274
11.7	Účinky znečištění ovzduší na ekosystémy	275
	Literatura	278

Jaroslava Kalvová, Jiří Mikšovský, Aleš Raidl

12. KLIMA A JEHO ZMĚNY		280
12.1	Počasí a klima	280
12.1.1	Rozdíl mezi počasím a klimatem	280
12.1.2	Co vytváří klima na naší planetě?	282
12.1.3	Změny klimatu v minulosti Země	284
12.1.4	Změna klimatu, možné příčiny klimatických změn	285
12.2	Pozorované změny v klimatickém systému	286
12.2.1	Pozorované změny teploty	286
12.2.2	Pozorované změny atmosférických srážek a vlhkosti vzduchu	287
12.2.3	Pozorované změny sněhové pokrývky, mořského ledu a změny hladiny oceánů	289
12.2.4	Pozorované změny atmosférické cirkulace a změny extrémů počasí	290
12.2.5	Změny teploty vzduchu a atmosférických srážek na území ČR	291
12.3	Zesilování skleníkového efektu atmosféry	292
12.3.1	Skleníkové plyny	292
12.3.2	Radiační účinek skleníkových plynů	295
12.4	Modelování klimatického systému a jeho změn	297
12.4.1	Klimatické modely	297
12.4.2	Výstupy klimatických modelů	301
12.4.3	Zvětšení rozlišení	302
12.4.4	Pokusy prováděné s klimatickými modely	304
12.5	Scénáře budoucího vývoje klimatu	306
12.5.1	Definice klimatického scénáře	306
12.5.2	Konstrukce scénářů změny klimatu	306
12.5.3	Emisní scénáře	308
12.5.4	Změny teploty vzduchu a atmosférických srážek	311
12.6	Změny klimatu v ČR	315
12.6.1	Variantní scénáře založené na výstupech modelů HadCM2 a ECHAM4	315
12.6.2	Scénáře založené na HadCM3	317
12.6.3	Využití regionálních klimatických modelů	318
12.7	Shrnutí	320
	Literatura	322

Bedřich Moldan

13. GLOBÁLNÍ ASPEKTY OCHRANY ATMOSFÉRY		325
13.1	Změna klimatu	325
13.2	Redukce stratosférické ozonové vrstvy	330
13.3	Změny chemického složení troposféry	333
Box:	Ženevská úmluva a její protokoly	335
	Literatura	336

Vladislav Bízek

14.	OTÁZKY SPOJENÉ SE SPRÁVOU OCHRANY OVZDUŠÍ	337
14.1	Úvod – nová právní úprava ochrany ovzduší v České republice	337
14.1.1	Imisní limity a posuzování kvality ovzduší	339
14.1.2	Národní a krajské emisní stropy	340
14.1.3	Plány snížení emisí u zdroje	340
14.1.4	Programování v ochraně ovzduší	341
14.1.4.1	Národní program snižování emisí	342
14.1.4.2	Krajské programy snižování emisí a krajské programy ke zlepšení kvality ovzduší	344
14.1.5	Úloha integrované prevence (IPPC) v ochraně ovzduší	347
14.2	Stav ovzduší v České republice	347
14.3	Závěr	350
	Literatura	351

PŘEDMLUVA

Bylo by velkým zjednodušením reality pokládat v dnešní době tematiku atmosféry, klimatu a znečištění ovzduší za módní. Stejně tak by bylo krátkozraké jí přisuzovat pouze rozměr přírodovědný. Děje, které se odehrávají v plynném obalu naší planety v lokálním regionálním i globálním měřítku, jsou předmětem diskusí nejen ve výzkumných laboratořích a za katedrami vysokoškolských poslucháren. K chemickým a fyzikálním charakteristikám ovzduší a k jejich dynamice promlouvají dnes nejen přírodovědci, ale i ekonomové, politici a dokonce i laická veřejnost. Proměny globálního klimatu na jedné straně a emise toxických znečišťujících látek do ovzduší měst a průmyslových aglomerací na straně druhé doslova hýbají světem. Pomíjení těchto skutečností může v dohledné budoucnosti vyústit ve velké ekonomické, sociální i zdravotní potíže lidstva.

Právě z těchto důvodů byl před pár lety sestaven tým odborníků, kteří se v širších souvislostech problematice atmosféry, klimatu a kvality ovzduší věnují, aby v rámci týdenního kurzu seznámili širokou odbornou veřejnost, zejména pak pracovníky státní správy, se základními poznatky týkajícími se uvedené tematiky. Po skriptech, která byla za účelem školení připravena a byla okamžitě rozebrána, ovšem zavládla velká poptávka v řadách vysokoškolských studentů i zájemců různých profesí mimo akademickou sféru. Aby bylo možno této poptávce vyhovět, nezbylo než získat nějaké finanční prostředky, znovu oslovit původní přednášející a vytvořit publikaci, která by měla delší trvanlivost a zároveň vyšší textovou i grafickou kvalitu nežli narychlo sestavené pracovní texty k jednorázovému kurzu.

Publikace, která se dostává do rukou čtenářů, si zachovává charakter díla, na kterém se podílejí autoři s různým odborným zázemím a různým pohledem na daná témata. Editoři cíleně nehledali cesty, jak jednotlivé oddíly – kapitoly – sjednotit a dát jim jakýsi jednotbarevný nádech, ani neomezili opakování některých pasáží. Překryv je naopak ponechán, a to zejména proto, že ambicí autorů a editorů není přinutit čtenáře prostudovat celé dílo, ale umožnit mu zaměřit se třeba jen na jednu kapitolu, která ho právě zajímá. Jednotlivé kapitoly jsou pak zpracovány takovým stylem, že umožňují i přírodovědecky (v oborech fyziky, chemie, matematiky) málo vyspělým zájemcům pochopit alespoň základní principy popisovaných jevů, dějů a mechanismů. I když je jistě pravděpodobné, že předkládaná publikace nepokrývá danou látku zcela vyčerpávajícím způsobem, jsou klíčová témata probrána v dostatečně šíři. Ti, kdo budou hledat další souvislosti, se pak mohou obrátit na literaturu, která je u každé kapitoly uvedena, a rozšířit si své znalosti samostudiem. Jelikož všichni autoři jsou aktivními odborníky v dané problematice, je jistě možné a v mnoha ohledech žádoucí navštívit v případě hlubšího zájmu též přednášky autorů publikace nebo jiných odborníků působících v daném oboru.

Nespornou výhodou je pak to, že v záplavě anglicky psaných monografií a původních vědeckých prací poskytuje tato publikace vše v jazyce mateřském a neklade tak na uživatele nároky na dobrou znalost jazyků cizích.

Kapitoly textu na sebe volně navazují a logicky tak připravují svým obsahem prostor pro témata probíraná v následujících oddílech. Úvodní kapitoly předkládají postupně základní principy dějů v atmosféře, její složení, interakci atmosféry s dalšími částmi planetárního systému a okolním vesmírem. Další skupina kapitol si všímá chemie plynné fáze, atmosférického aerosolu a organických látek. Následují komplexnější kapitoly věnované atmosférické depozici, znečišťování, monitoringu a hodnocení kvality ovzduší. Tato část je uzavřena náročnější, ale nezbytnou kapitolou, která se věnuje modelování znečištění ovzduší. Závěrečné trio kapitol se obrací k problematice klimatické změny a k otázkám, které souvisejí s ochranou atmosféry v globálním kontextu. Text logicky uzavírá stať, která se věnuje praktickým otázkám spojeným se státní správou v oblasti ochrany ovzduší.

Jistě by bylo možné nalézt další relevantní témata, která by vhodně doplnila soubor statí zařazených v této monografii. Jedná se například o emise nebo o další aspekty související s významnou problematikou vlivu znečištění ovzduší na zdraví člověka apod. Není vyloučeno, že pokud bude o publikaci zájem, lze o jejím rozšíření v budoucnu uvažovat. Zatím je předkládáno to, na co stačila pracovní kapacita všech zúčastněných autorů a síly editorů. Věříme, že každý zájemce o problematiku klimatu, atmosféry a kvality ovzduší najde na následujících stránkách to, co ho zajímá nebo to, co potřebuje.

Publikace textu by jistě nebyla možná bez příspěvku recenzentů, kteří pečlivě pracovní verzi textu prostudovali a pomohli tak odstranit celou řadu problémů i nedostatků od jednotlivých překlepů přes terminologickou nejednotnost textů, chyby v grafech a obrázcích až po některé drobné věcné nesrovnalosti. Autoři i editoři na tomto místě děkují Ing. Jaroslavu Šantrochovi, CSc. z Českého hydrometeorologického ústavu a RNDr. Jiřímu Kastnerovi z Katedry fyzické geografie a geoekologie Přírodovědecké fakulty UK v Praze za jejich cenné připomínky.

Publikace by nevznikla ani bez finanční podpory grantu norského ministerstva zahraničních věcí (DET KONGELIGE UTENRIKSDEPARTEMENT, No. 3022062).

editoři, jaro 2009

1. ZÁKLADNÍ INFORMACE O ATMOSFÉŘE ZEMĚ

JAN BEDNÁŘ

1.1 SLOŽENÍ A VERTIKÁLNÍ ČLENĚNÍ ATMOSFÉRY

Atmosféra představuje vzdušný obal Země a z hlediska složení ji lze dělit na tři kvalitativní složky:

1. Tzv. suchou a čistou atmosféru tvořenou směsí plynů, které při běžných teplotách a tlacích můžeme velmi dobře považovat za termodynamicky ideální plyny, tj. plyny řídící se přesně stavovou rovnicí

$$\frac{p}{\rho} = RT,$$

kde p značí tlak plynu, ρ jeho hustotu, T teplotu v kelvinech a R měrnou plynovou konstantu. Největší relativní zastoupení mezi těmito plyny v atmosféře má dusík (cca 78 obj. procent) a kyslík (cca 21 obj. procent). Složení suchého a čistého vzduchu se v podstatě nemění až do výšek 90–100 km nad zemským povrchem. Pro podrobnější informaci o složení suché a čisté atmosféry viz dále Tab. 2.1.

Pokud jde o právě uvedenou stavovou rovnici, může být čtenář zvyklý i na její další možné tvary zápisu, např.

$$p\alpha = RT,$$

kde $\alpha \equiv 1/\rho$ je měrný objem (tj. objem jednotky hmotnosti) plynu. Vynásobíme-li zde na obou stranách poměrnou molekulovou hmotností (molekulovou váhou) m , dostaneme

$$pm\alpha = mRT,$$

a zavedeme-li dále $V = m\alpha$, $R_a = RT$, můžeme okamžitě psát

$$pV = R_a \cdot T,$$

kde V představuje objem jednoho molu termodynamicky ideálního plynu a R_a univerzální plynovou konstantu.

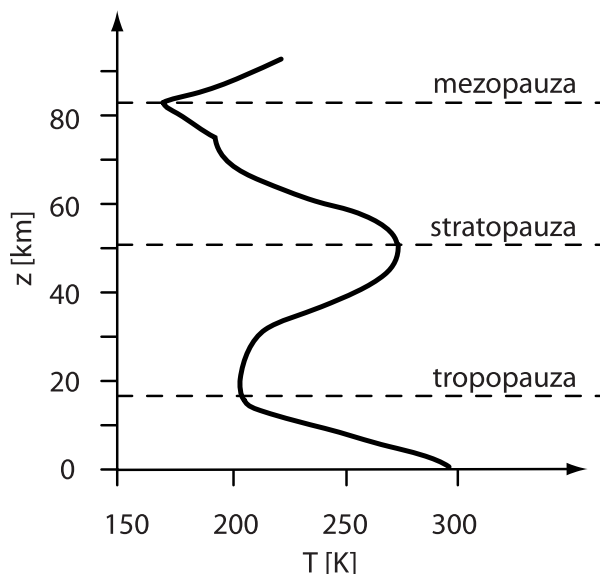
2. Vodní páru, vodní kapičky, popř. ledové částice, neboť voda se může za běžných meteorologických podmínek v atmosféře vyskytovat ve třech skupenstvích. Vodní pára se v ovzduší chová jako reálný plyn, tzn. že se přibližně řídí stavovou rovnicí, pokud ovšem nejde o páru nasycenou. Množství vodní páry i vody v ostatních dvou skupenstvích je ve vzduchu prostorově i časově velmi proměnlivé. V atmosférických podmínkách může vodní pára přecházet v kapalnou vodu kondenzací nebo přímo sublimovat v led.

3. Různé znečišťující příměsi, zejména příměsi aerosolové povahy (složky tzv. atmosférického aerosolu).

Definujeme-li obecně aerosol jako soustavu částic pevného nebo kapalného skupenství rozptýlených v plynném prostředí, potom atmosférickým aerosolem rozumíme všechny pevné a kapalné částičky vyskytující se v zemském ovzduší. Mezi znečišťující aerosolové příměsi v atmosféře počítáme půdní a prachové částice, jemné krystalky mořských solí, vulkanický popel, kosmický prach proniklý do zemského ovzduší, produkty hoření meteoritů, malá semínka rostlin, pylová zrna, bakterie, výtrusy, spory, produkty rozkladu organických látek apod. Právě uvedené příklady představují součásti přirozeného atmosférického aerosolu, avšak v poslední době se v souvislosti s ekologickou problematikou věnuje velká pozornost aerosolům antropogenního původu, které vznikají jako přímé nebo nepřímé produkty lidské aktivity (např. při důlní nebo průmyslové činnosti, v dopravě, zemědělství, v důsledku vytápění budov nebo chemickou cestou z plyných prekurzorů). Přesné odlišení přirozených a antropogenních aerosolů však není vždy možné, neboť nastávají i situace, kdy aerosolové částice stejných vlastností a téhož složení se do vzduchu dostávají jak přirozenou (přírodní), tak „umělou“ cestou. Jako běžný příklad lze v tomto směru uvést půdní částičky, které tvoří významnou součást přirozeného atmosférického aerosolu, ale dostávají se zvýšenou měrou do vzduchu i z antropogenních příčin tehdy, jestliže vlivem nevhodného hospodaření s půdou dojde k neúměrnému zesílení větrné eroze. Z aerosolových částic v atmosféře jsou meteorologicky významné především ty, jež mohou působit jako tzv. kondenzační jádra (např. částičky hygroskopických solí, některé typy kouřů apod.) nebo v roli krystalizačních (ledových) jader. Avšak i ty aerosolové částice, které se aktivně neúčastní kondenzace vodní páry nebo zamrzání přechlazených vodních kapek, mívají někdy značný význam, např. v souvislosti se zeslabováním průchodu slunečního záření zemským ovzduším, snižováním dohlednosti atd. Na základě právě uvedených skutečností můžeme tedy reálnou atmosféru považovat za koloidní systém charakteru řídkého aerosolu.

Vertikální členění zemské atmosféry není jednoznačně dáno objektivními přírodními kritérii, a proto při jeho zavádění lze uplatňovat různá hlediska a zde se zmíníme o třech nejvýznamnějších přístupech:

1. členění podle průběhu teploty s výškou (viz Obr. 1.1),
2. členění podle elektrických vlastností vzduchu,
3. členění podle intenzity promíchávání vzduchu.



Obr. 1.1 Průběh teploty vzduchu T (v Kelvinech) s výškou z v atmosféře.

V případě členění podle průběhu teploty s výškou nazýváme nejspodnější část zemské atmosféry **troposférou**. Tato atmosférická vrstva dosahuje v našich zeměpisných šířkách přibližně do výše 11 km nad úroveň moře, u pólů pouze 8–9 km a nad rovníkem asi 17–18 km. Příčinou tohoto zploštění v oblasti pólů je zemská rotace. Troposféru charakterizuje převládající pokles teploty s výškou, v našich zeměpisných šířkách se teplota na její horní hranici pohybuje kolem $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nad rovníkem klesá teplota na horní hranici troposféry až k $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$, což souvisí s větší tloušťkou této vrstvy v rovníkové atmosféře. Troposféra obsahuje podstatnou část celkového množství vodní páry v ovzduší, vytvářejí se v ní oblaky, vznikají zde atmosférické srážky atd. Tlak vzduchu dosahuje ve výškách kolem 11 km hodnot blízkých 200 hPa, nad rovníkem klesá v oblasti horní hranice troposféry pod 100 hPa (hPa – hektopascal, 100 pascalů).

Od horní hranice troposféry do výše přibližně 50 km nad úroveň moře se nalézá **stratosféra**. V její spodní polovině se teplota vzduchu s výškou výrazněji nemění (izotermie), ve vyšších hladinách dokonce s výškou roste (teplotní inverze) tak, že u horní hranice stratosféry může dosahovat i kladných hodnot ve $^{\circ}\text{C}$. Součástí stratosféry je tzv. **ozonoféra**, tj. vrstva s relativně vysokým obsahem ozonu, který silně absorbuje ultrafialové sluneční záření a umožňuje tím existenci života na Zemi. Hladina atmosféry s maximálním obsahem ozonu se ve středních zeměpisných šířkách nalézá ve výši 22–25 km nad úroveň moře, zvýšený obsah ozonu však začíná již ve výškách kolem 15 km, někdy i níže, a zasahuje do výšek nad 30 km. Kdybychom všechen ozon vyskytující se v ozonoféře přivedli k tlaku

1000 hPa, vytvořil by ve středních zeměpisných šířkách vrstvičku silnou cca 3 mm. O ozonoféře a v ní probíhajících fotochemických reakcích bude podrobněji pojednáno dále.

Vrstva atmosféry ve výškách zhruba od 50 do 80 km se nazývá **mezosféra** a vyznačuje se ostrým poklesem teploty s výškou, v oblasti její horní hranice dosahuje teplota -80 až -100 °C. Odtud směrem vzhůru se nalézá **termosféra**, jejíž horní hranice se většinou uvažuje ve výškách kolem 500 km, někteří autoři ji však kladou až do hladin kolem 700 km. Teplota v termosféře nejprve s výškou výrazně roste, potom zůstává přibližně konstantní a řádově dosahuje stovek °C. Vzhledem k relativně nepatrné hustotě vzduchu v těchto výškách však už zde nelze teplotu měřit běžnými termometrickými metodami, ale určujeme ji na základě střední velikosti kinetické energie pohybu jednotlivých molekul. Termosféra je mj. oblastí výskytu polárních září. Poslední vrstva zemské atmosféry, která plynule přechází v meziplanetární prostor, se nazývá **exosféra**. Přechody mezi zmíněnými vrstvami (sférami) se označují jako pauzy s připojeným označením příslušné níže ležící vrstvy. Tak např. přechod mezi troposférou a stratosférou nazýváme **tropopauza**, mezi stratosférou a mezosférou jde o **stratopauzu** atd.

Z hlediska elektrických vlastností se zemská atmosféra dělí na dvě základní vrstvy – **neutrosféru** a **ionosféru**. Elektrická vodivost vzduchu, způsobená ionizací molekul jednotlivých plynných složek ovzduší, je u zemského povrchu velmi malá, ale působením kosmického záření roste s výškou natolik, že v hladinách kolem 60 km se začíná projevovat charakteristickými jevy souvisejícími s odrazem krátkých rádiových vln. Odtud směrem vzhůru mluvíme o ionosféře a směrem dolů o neutrosféře.

Intenzita turbulentního promíchávání vzduchu je do výšek 90–100 km nad úroveň moře dostatečná k tomu, aby se procentuální zastoupení hlavních plynných složek ovzduší (kromě vodní páry, ozonu a oxidu uhličitého) s výškou prakticky neměnilo. Tuto část atmosféry proto nazýváme **homosférou**. Ve větších výškách již vliv turbulentního promíchávání slábne a vertikální rozložení složek vzduchu je převážně dáno difúzní rovnováhou, tzn. že s výškou ubývají rychleji relativně těžší plyny. Nejsvrchnější části zemské atmosféry jsou proto tvořeny převážně vodíkem. Vrstvy ovzduší nad homosférou se nazývají **heterosféra**. Obdobný význam jako termíny homosféra a heterosféra mají někdy užívané synonymické pojmy **turbosféra** a **difúzosféra**.

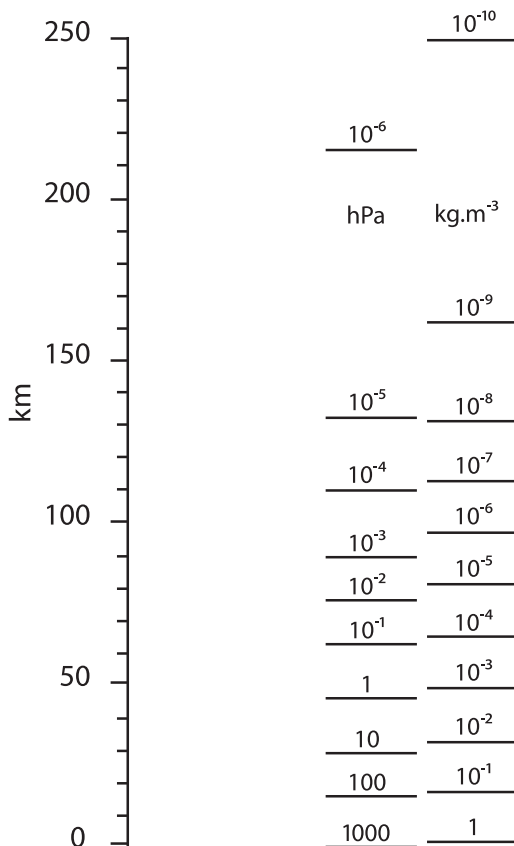
Odpověď na otázku, proč se vodní pára, ozon a oxid uhličitý vymykají z homogenního promíchání v rámci homosféry, je sice v zásadě velice jednoduchá, ale přesto ji stručně zmiňme:

Vodní pára při svém transportu atmosférou vzhůru (působením vzestupnými pohyby ve vzduchu a difúzí) rychle kondenzuje, a to z velké části již v troposféře. Existence ozonu je v přirozených atmosférických podmínkách silně vázána na specifické podmínky umožňující příslušné fotochemické reakce, které se mohou uplatnit jen v nepříliš velkém vertikálním rozsahu v rámci ozonoféry. Oxid uhličitý je relativně velmi těžký, jeho zdroje (např. dýchání živých organismů) jsou soustředěny na povrchu Země nebo v jeho blíz-

kosti a při své difúzi atmosférou vzhůru je tento plyn účinně vymýván vodou (padajícími srážkami, v oblačných vrstvách apod.).

Zemskou atmosféru je dále možno dělit např. na **mezní vrstvu**, v níž se uplatňuje vliv tření proudícího vzduchu o zemský povrch, a na tzv. **volnou atmosféru**, kde je toto tření již zanedbatelné. Tloušťka mezní vrstvy se mění v dosti širokých mezích, roste se zvětšující se drsností zemského povrchu, s rychlostí proudění a s intenzitou vertikálního promíchávání vzduchu. Orientačně dosahuje nejčastěji hodnot v rozmezí 1–2 km nad zemským povrchem, nad vysokými pohořími je atmosférické proudění samozřejmě deformováno do podstatně větších výšek.

Nakonec uvedme malou poznámku k často užívanému pojmu „horní hranice atmosféry“. Jak jsme již naznačili, přechází atmosféra Země v meziplanetární prostor v podstatě plynule, a objektivně tedy žádná její horní hranice v podobě diskontinuity neexistuje. Horní hranice atmosféry je proto relativní pojem a mluvíme-li o ní z praktických



Obř. 1.2 Průběh tlaku vzduchu v hPa (první škála) a hustoty vzduchu v kg.m⁻³ (druhá škála) s výškou (km) v zemské atmosféře.

důvodů, bývá to vždy vzhledem k nějaké konkrétní užší záležitosti. Kdyby nám např. šlo o měření toků rozptýleného slunečního záření, pak by nás zajímala zemská atmosféra do výšky cca 80 km a sem bychom pak mohli položit její horní hranici. Jestliže bychom však za horní hranici chtěli považovat výšku, kde jednotlivé molekuly nesmírně zředěných plynů (zejména vodíku) jsou ještě ve svém pohybu ovlivňovány rotací Země, museli bychom jít až do vzdáleností přes 30 000 km od zemského povrchu. V souvislosti s atmosférickým tlakem můžeme za horní hranici atmosféry považovat takovou výšku, kde je již zcela zanedbatelný hydrostatický tlak atmosférických plynů v tíhovém poli Země. Podobně bychom mohli pokračovat mnoha dalšími příklady.

Kromě Obr. 1.1, zobrazujícího průběh teploty vzduchu s výškou, uvádíme i Obr. 1.2, znázorňující vertikální změny tlaku a hustoty vzduchu v celém vertikálním rozsahu atmosféry.

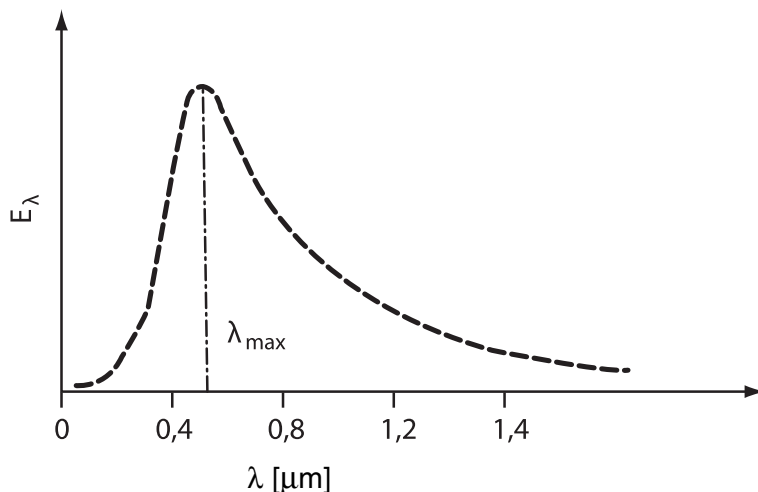
1.2 SLUNEČNÍ A DLOUHOVLNNÉ ZÁŘENÍ

Sluneční záření, jež představuje základní zdroj energie pro veškeré procesy probíhající v atmosféře a na zemském povrchu, lze rozdělit na dvě části, a to sluneční záření **přímé** a **rozptýlené** (difúzní). Přímé sluneční záření přichází do oka pozorovatele od slunečního disku a vzhledem k velké vzdálenosti Země od Slunce tvoří svazek prakticky rovnoběžných paprsků. Rozptýlené sluneční záření vzniká následkem rozptylu přímého slunečního záření na molekulách plynných složek vzduchu, na vodních kapičkách, ledových krystalech a na nejrůznějších aerosolových částicích vyskytujících se v zemském ovzduší. Rozptýlené sluneční záření pozorujeme jako záření oblohy, a kdyby ho nebylo, jevila by se nebeská klenba i během dne černá s ostře zářícím slunečním diskem a s hvězdami.

Sluneční záření je elektromagnetické záření o charakteristickém spektru vlnových délek, které před vstupem do zemské atmosféry přibližně odpovídá spektru vyzařování dokonale černého tělesa o povrchové teplotě 6000 K. Zastoupení jednotlivých vlnových délek λ v tomto spektru si můžeme znázornit spektrální funkcí E_λ , kterou vidíme na Obr. 1.3. Sluneční spektrum obvykle dělíme na tři základní oblasti a podle toho rozlišujeme:

1. ultrafialové sluneční záření s vlnovými délkami menšími než 400 nm, které energeticky tvoří před vstupem do zemské atmosféry asi 7 % celkového slunečního záření a jež je z velké části absorbováno atmosférickým ozonem ve stratosféře,
2. viditelné sluneční záření s vlnovými délkami od 400 do 750 nm (asi 48 % celkového slunečního záření před vstupem do atmosféry) vytvářející spektrum barev od modré po červenou,
3. infračervené záření, které má vlnové délky větší než 750 nm a před vstupem do atmosféry tvoří asi 45 % slunečního záření.

Vlnová délka $\lambda_{\max} \approx 475$ nm odpovídající před vstupem do atmosféry maximum spektrální funkce E_{λ} (viz Obr. 1.3) se nalézá ve viditelné oblasti spektra. Vzhledem k tomu, že propustnost atmosféry vůči slunečním paprskům zhruba roste se zvětšující se vlnovou délkou, je toto maximum u slunečního spektra pozorovaného u zemského povrchu posunuto k delším vlnovým délkám, a to cca do oblasti 550–600 nm. Tento posun se uplatňuje zejména při nižších výškách Slunce nad obzorem.



Obr. 1.3 Schematické znázornění spektra vyzařování černého tělesa o teplotě cca 6000 K.

Spektrum ultrafialového (UV) záření se podrobněji dělí na tzv. vzdálenou (dalekou) oblast s vlnovými délkami λ menšími než 200 nm, a dále na pásy A ($200 < \lambda < 280$ nm), B ($280 < \lambda < 320$ nm) a C ($320 < \lambda < 400$ nm). Tab. 1.1 potom ukazuje pro podrobnější představu průměrné energetické toky ve $W \cdot m^2$ před vstupem do zemské atmosféry odpovídající právě uvedeným spektrálním oblastem spolu s odpovídajícími veličinami pro přibližné oblasti viditelného a infračerveného (IF) záření. Součet těchto toků dává hodnotu solární konstanty (viz dále). V současné době se věnuje velká pozornost měření toků biologicky aktivního UV záření v oblasti pásu B, neboť v oblasti vlnových délek kolem 290 nm leží práh, od něž směrem dolů jsou vlnové délky slunečního záření již úplně absorbovány stratosférickým ozonem a k zemskému povrchu vůbec nepronikají.

Z hlediska procesů souvisejících s fotosyntézou je důležitá oblast vlnových délek tzv. fotosynteticky aktivního záření (angl. zkratka FAR), která se obvykle vymezuje v rozsahu 400–700 nm.

Tabulka 1.1 Radiační toky v hlavních oblastech spektra slunečního záření před vstupem do zemské atmosféry. Dle Holton et al., 2002.

spektrální oblast	tok radiace [W.m ⁻²]	časová proměnlivost
vzdálená UV oblast $\lambda < 200$ nm	<1	7–80 %
UV-C oblast $200 < \lambda < 280$ nm	6,4	1–2 %
UV-B oblast $280 < \lambda < 320$ nm	21,1	<1 %
UV-A oblast $320 < \lambda < 400$ nm	85,7	<1 %
viditelné záření $400 < \lambda < 700$ nm	532	$\leq 0,1$ %
blízká infračervená oblast $700 < \lambda < 3500$ nm	722	/

Pokles intenzity ultrafialového záření na zemském povrchu se zmenšující se vlnovou délkou v okolí prahových hodnot 290–295 nm je velmi prudký díky velkým absorpčním schopnostem O₃ pro vlnové délky $\lambda < 300$ nm. Intenzita biologicky aktivní UV-B radiace na zemském povrchu značně závisí na stavu ozonosféry. Protože destrukční biologický efekt (zhoubná bujení, poškozování tkání a buněčných jader atd.) UV radiace o vlnové délce 290 nm je asi 10 000krát větší ve srovnání s poškozováním živých organismů radiací o vlnové délce 320 nm, zasluhuje si každý úbytek stratosférického ozonu značnou pozornost, neboť v jeho důsledku zmíněný práh pro vstup slunečního záření do spodních hladin atmosféry klesá k nižším vlnovým délkám.

Základní veličinou při popisu přímého slunečního záření je jeho **intenzita I**, kterou definujeme jako množství zářivé energie, jež za jednotku času dopadá na jednotkovou plochu orientovanou kolmo ke slunečním paprskům. Množství přímého slunečního záření dopadajícího za jednotku času na jednotkovou plochu horizontálního zemského povrchu nazýváme insolací I' a z elementární geometrické úvahy okamžitě vyplývá vztah

$$I' = I \sin \alpha \text{ nebo } I' = I \cos \vartheta, \quad (1.1)$$

kde α značí úhlovou výšku Slunce nad ideálním (geometrickým) obzorem a ϑ úhlovou vzdálenost Slunce od zenitu (tzv. zenitový úhel Slunce). Ve vztazích (1.1) představuje I intenzitu přímého slunečního záření na zemském povrchu, kterou lze vyjádřit vzorcem

$$I = I^* \cdot \frac{R_{oz}^2}{R_z^2} \cdot P, \quad (1.2)$$

v němž I^* značí tzv. solární konstantu (solární konstanta – intenzita slunečního záření vně zemské atmosféry ve vzdálenosti od Slunce, jež se rovná střední vzdálenosti Země–Slunce, $I^* \div 1,36 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$), R_{oz} , resp. R_z střední, resp. okamžitou vzdálenost Země od Slunce a P propustnost zemské atmosféry pro přímé sluneční záření. Maximální vzdálenost Země od Slunce je přibližně 152 milionů km a minimální vzdálenost 147 milionů km. Hodnota faktoru R_{oz}^2 / R_z^2 v průběhu roku kolísá v rozmezí zhruba 0,035 kolem jedné, což znamená, že intenzita přímého slunečního záření při vstupu do zemské atmosféry I_o se může od solární konstanty I^* maximálně lišit asi o 3,5 % její hodnoty.