
Základní informace o atmosféře

Mgr. Lukáš Dolák, Ph.D.

Jaro 2020

Složení atmosféry

- Atmosféra – vzdušný obal Země
- Tři kvalitativní složky:
 - suchá a čistá atmosféra
 - vodní pára, vodní kapičky, ledové částice
 - znečišťující příměsi



Složení atmosféry

- Suchá a čistá atmosféra
 - směs plynů (N – 78 %, O₂ – 21 %) neměnná do výšky 90–100 km
 - ideální plyny (stavová rovnice):

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

p ... tlak plynu, ρ ... hustota plynu, R ... měrná plynová konstanta, T ... teplota v K

Složení atmosféry

- Vodní pára, vodní kapičky, ledové částice
 - nenasycená vodní pára jako reálný plyn (platí stavová rovnice)
 - procesy kondenzace a sublimace
- Znečišťující příměsi
 - atmosférický aerosol (pevné a kapalné částice v zemském ovzduší)
 - přirozený a antropogenní atmosférický aerosol

Složení atmosféry

- Znečišťující příměsi
 - přirozený atmosférický aerosol:
 - půdní a prachové částice, krystalky mořských solí, vulkanický popel, kosmický prach, produkty hoření meteoritů, drobná semínka rostlin, pylová zrna, bakterie, výtrusy, spory aj.
 - antropogenní atmosférický aerosol (ne/přímý výsledek lidské činnosti):
 - těžba, průmysl, doprava, zemědělství, vytápění budov aj.
 - problematika odlišení (viz půdní částice a zemědělství)

Složení atmosféry

- Znečišťující příměsi
 - význam aerosolových částic jako kondenzačních (hygroskopické soli) a krystalizačních (ledových) jader
 - vliv na zeslabování slunečního záření, snižování dohlednosti, globální stmívání aj.

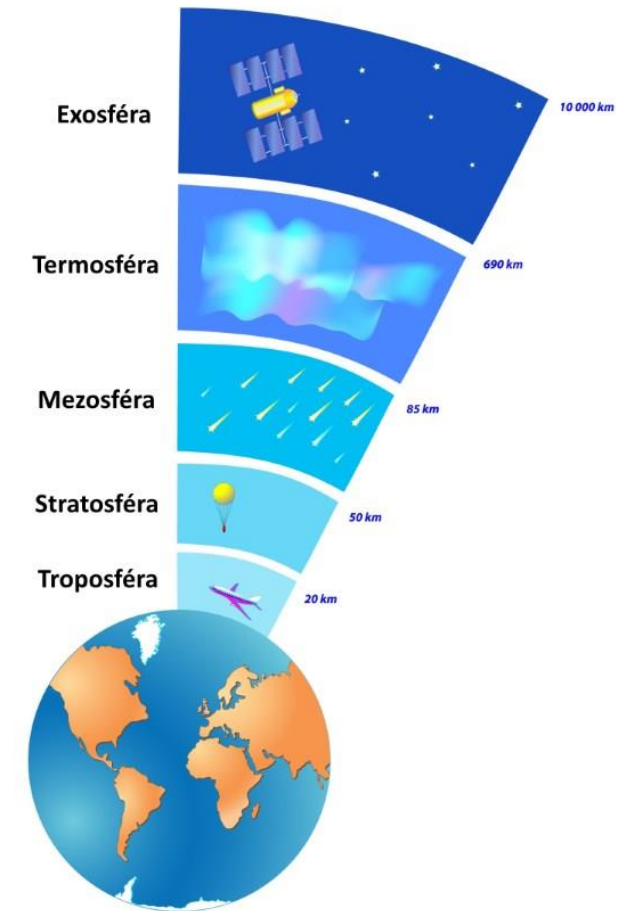


Vertikální složení atmosféry podle průběhu teploty s výškou

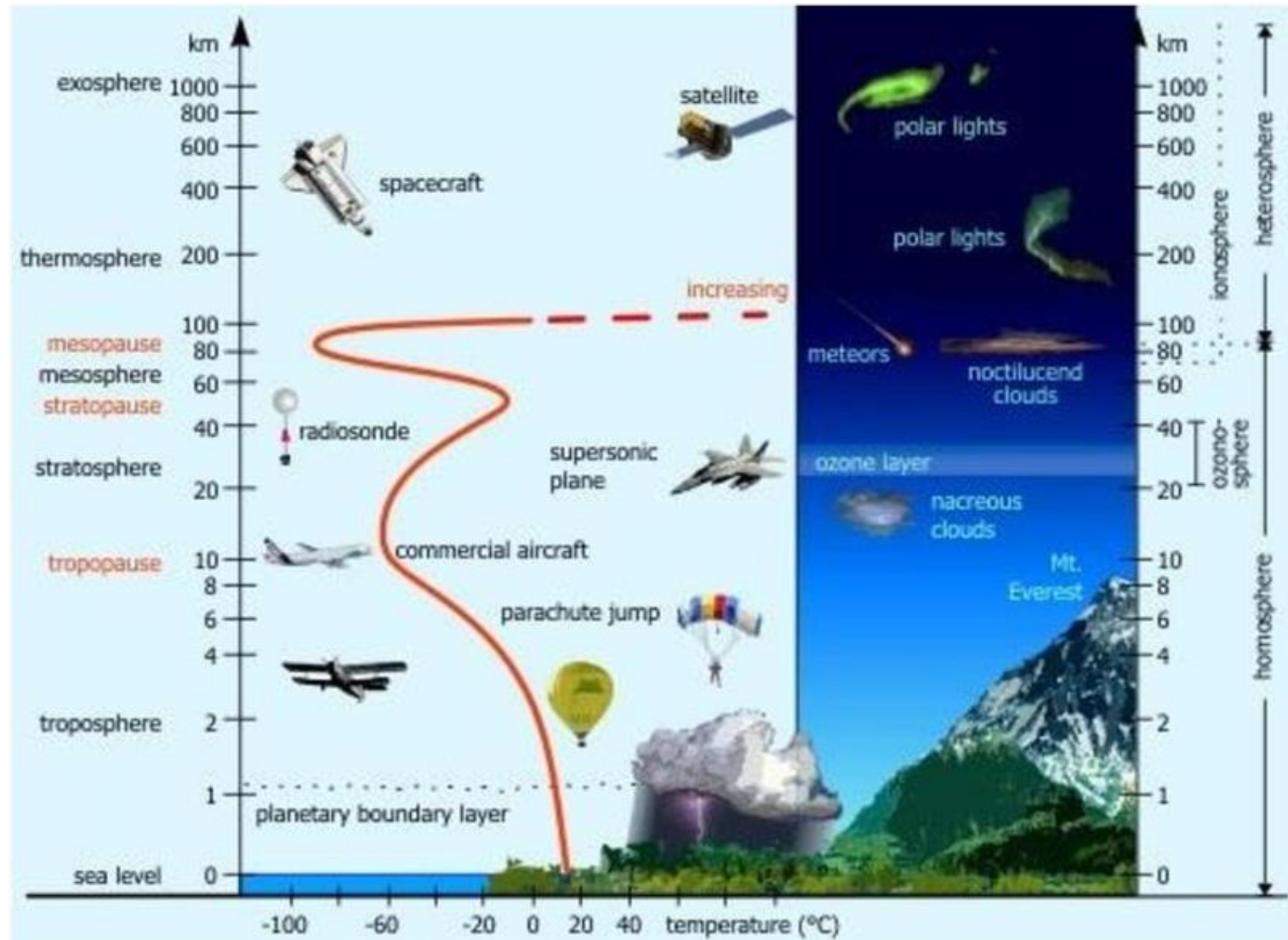
- Troposféra
 - nejspodnější část atmosféry, horní hranice 8–18 km (póly–rovník)
 - pokles teploty a tlaku vzduchu s výškou (horní hranice – rovník: - 80 °C, <100 hPa; ČR: - 55 °C, 200 hPa)
 - podstatné množství vodní páry, vznik oblak, srážek - „počasí“
- Stratosféra
 - horní hranice 50 km, izotermie (dolní hranice) a teplotní inverze (+ °C)
 - ozonoféra (nejvyšší koncentrace 22–25 km)

Vertikální složení atmosféry podle průběhu teploty s výškou

- Mezosféra
 - horní hranice 80 km, pokles teploty s výškou (horní hranice: - 80 až -100 °C)
- Termosféra
 - horní hranice 500–700 km, růst teploty s výškou
 - místo výskytu polární záře
- Exosféra
 - plynulý přechod do meziplanetárního přechodu

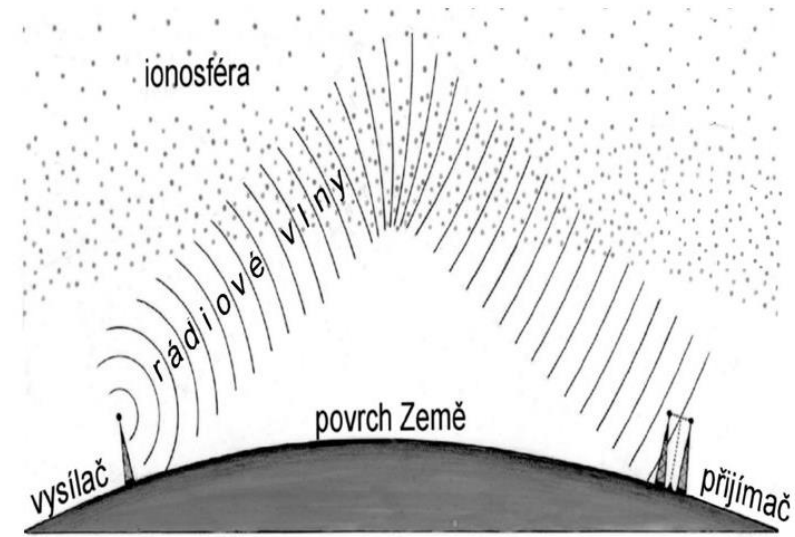


Vertikální složení atmosféry podle průběhu teploty s výškou



Vertikální složení atmosféry podle elektrických vlastností vzduchu

- Neutrosféra
 - horní hranice cca 60 km, nízká elektrická vodivost molekul vzduchu
- Ionosféra
 - dolní hranice cca 60 km, vysoká elektrická vodivost molekul vzduchu vlivem vyššího kosmického záření
 - odraz krátkých radiových vln



Vertikální složení atmosféry podle intenzity promíchávání vzduchu

- Homosféra
 - horní hranice 90–100 km
 - intenzivní turbulentní promíchávání vzduchu: neměnné složení hlavních složek atmosféry (vyjma H_2O – vodní pára, O_3 a CO_2)
- Heterosféra
 - slabé turbulentní proudění, vertikální rozložení plynů dáno difuzní rovnováhou (úbytek těžších plynů s výškou)

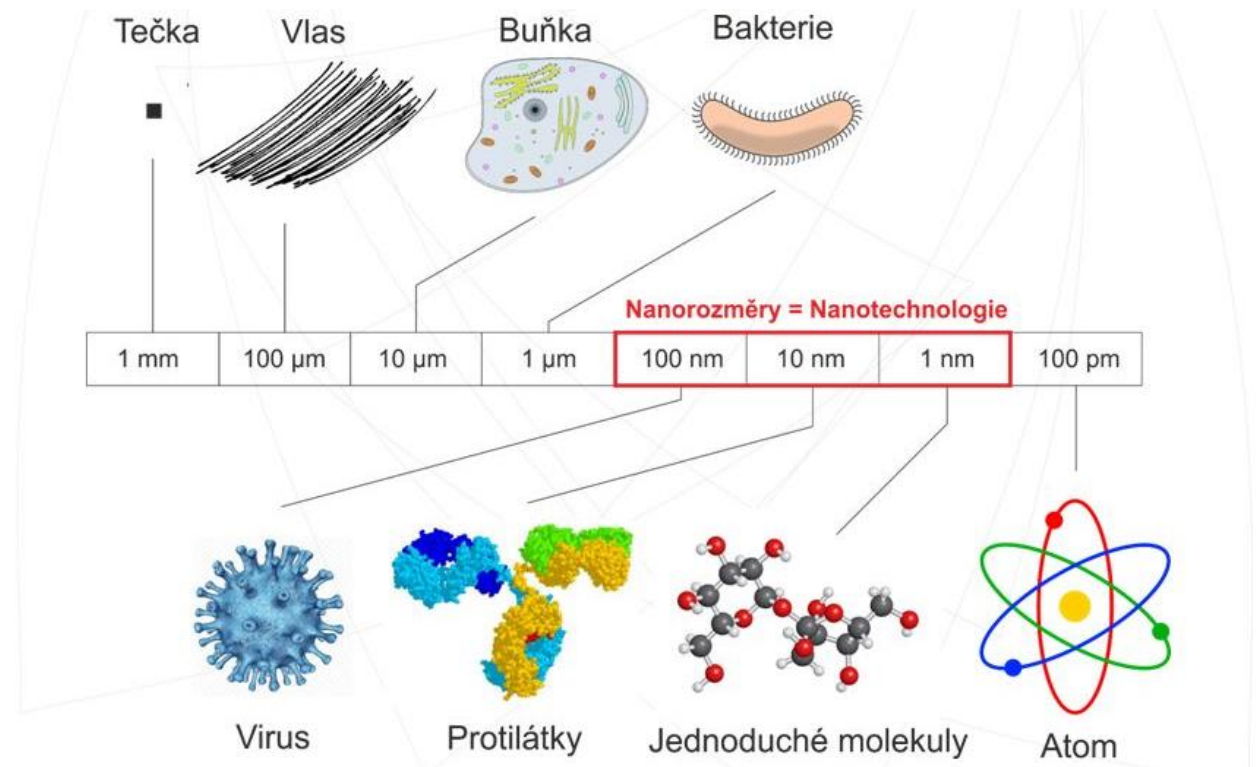
Vertikální složení atmosféry

- Mezní vrstva
 - vliv tření vzduchu o zemský povrch
 - změna výšky v závislosti na drsnosti povrchu, rychlosti proudění, intenzitě vertikálního promíchávání (1–2 km)
- Volná atmosféra
 - zanedbatelný vliv tření vzduchu
- Horní hranice atmosféry
 - relativní pojem, změna výšky dle parametrů (rozptyl slunečního záření – 80 km, vliv rotace Země na molekuly – 30 000 km)

Sluneční a dlouhovlnné záření

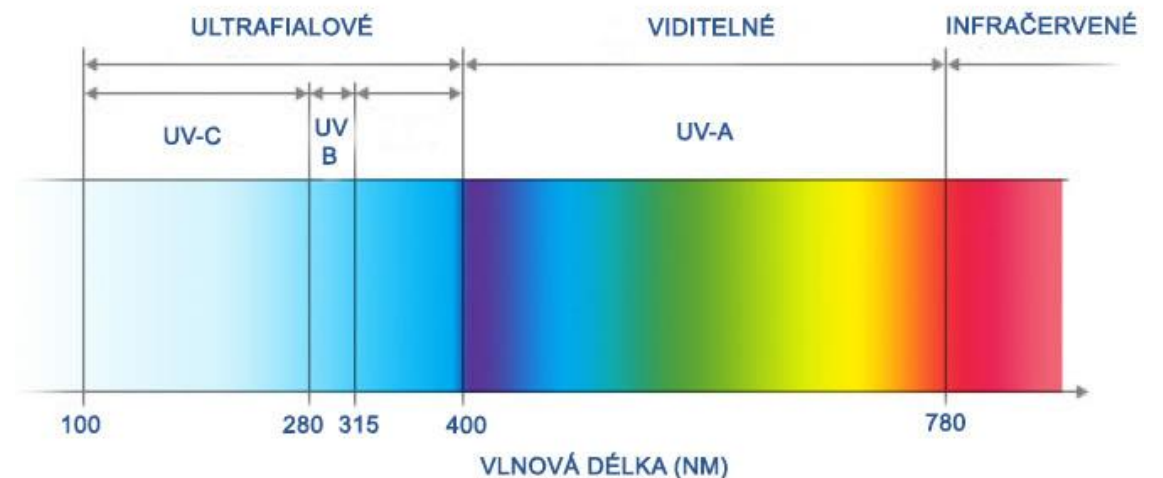
- Sluneční záření jako základní zdroj všech procesů probíhajících v atmosféře a na zemském povrchu

Vorsatz	Bezeichnung	Vergleich Meter
mm	Millimeter	0,001 m
μm	Mikrometer	0,000 001 m
nm	Nanometer	0,000 000 001 m



Sluneční a dlouhovlnné záření

- Sluneční záření jako základní zdroj všech procesů probíhajících v atmosféře a na zemském povrchu
 - ultrafialové (7 %), $\lambda < 400$ nm, záření $\lambda < 290$ nm pohlceno O_3
 - viditelné (48 %), $\lambda = 400\text{--}750$ nm, barevné spektrum, fotosynteticky aktivní záření (FAR, 400–700 nm)
 - infračervené (45 %), $\lambda > 750$ nm



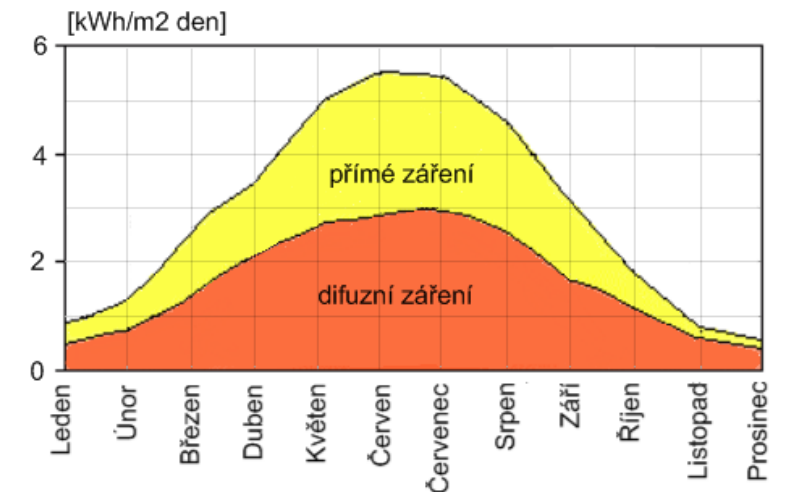
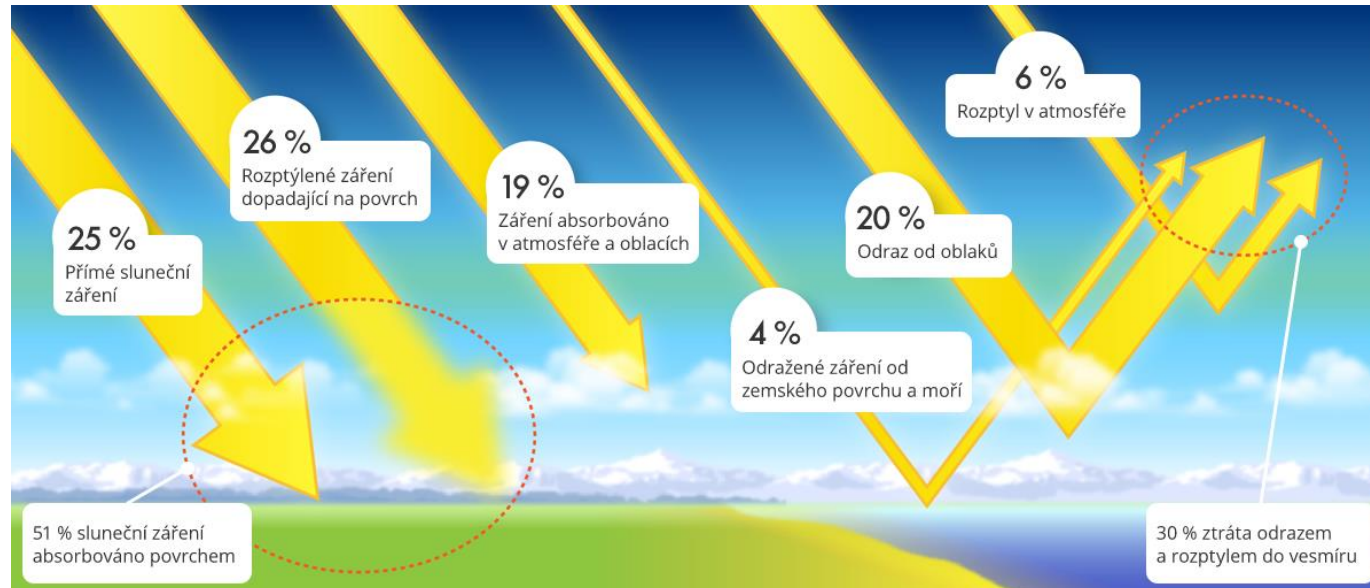
Sluneční a dlouhovlnné záření

Radiační toky v hlavních oblastech spektra slunečního záření před vstupem do zemské atmosféry (dle Holton et al. 2002)

spektrální oblast	tok radiace [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]	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	/

Sluneční a dlouhovlnné záření

- Přímé záření zeslabováno rozptylem a absorpcí
- Rozptýlené záření
 - projevující se jako záření oblohy
 - molekulární rozptyl a rozptyl na větších částicích



Sluneční a dlouhovlnné záření

- Molekulární rozptyl

$$i = \frac{1}{\lambda^4}$$

i ... účinnost molekulárního rozptylu

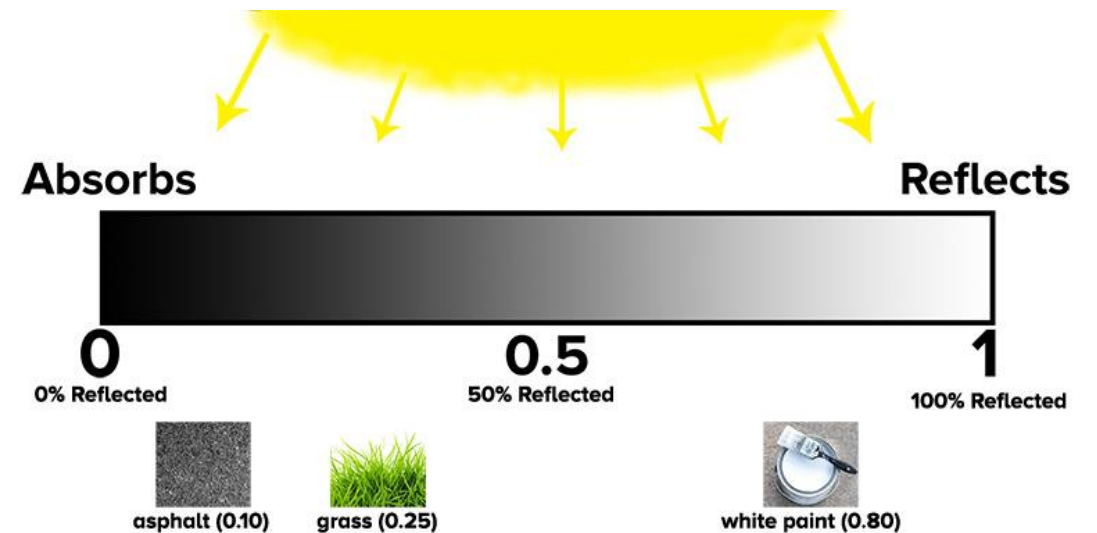
- převaha krátkých vlnových délek v rozptýleném záření viditelného spektra na molekulách vzduchu (modrá až fialová barva oblohy = velká průzračnost atmosféry)
- symetrický charakter rozptylu

Sluneční a dlouhovlnné záření

- Rozptyl na větších částicích
 - neutrální rozptyl u různých vlnových délek (bílá barva světla = bílá ozářená oblaka, světlá obloha při zakalené atmosféře)
 - asymetrický charakter rozptylu
- Absorpce
 - bezoblačná atmosféra: absorpce 15–20 % záření (O_2 , O_3 , CO_2)

Sluneční a dlouhovlnné záření

- Albedo
 - poměr množství slunečního záření odraženého a dopadlého
 - vliv úhlu dopadu slunečních paprsků (zrcadlení vodní hladiny)
 - planetární albedo: 30 % (oblaka, zpětný molekulární rozptyl)
- Zpětné záření atmosféry
 - dlouhovlnné (tepelné) záření atmosféry měřené při povrchu Země

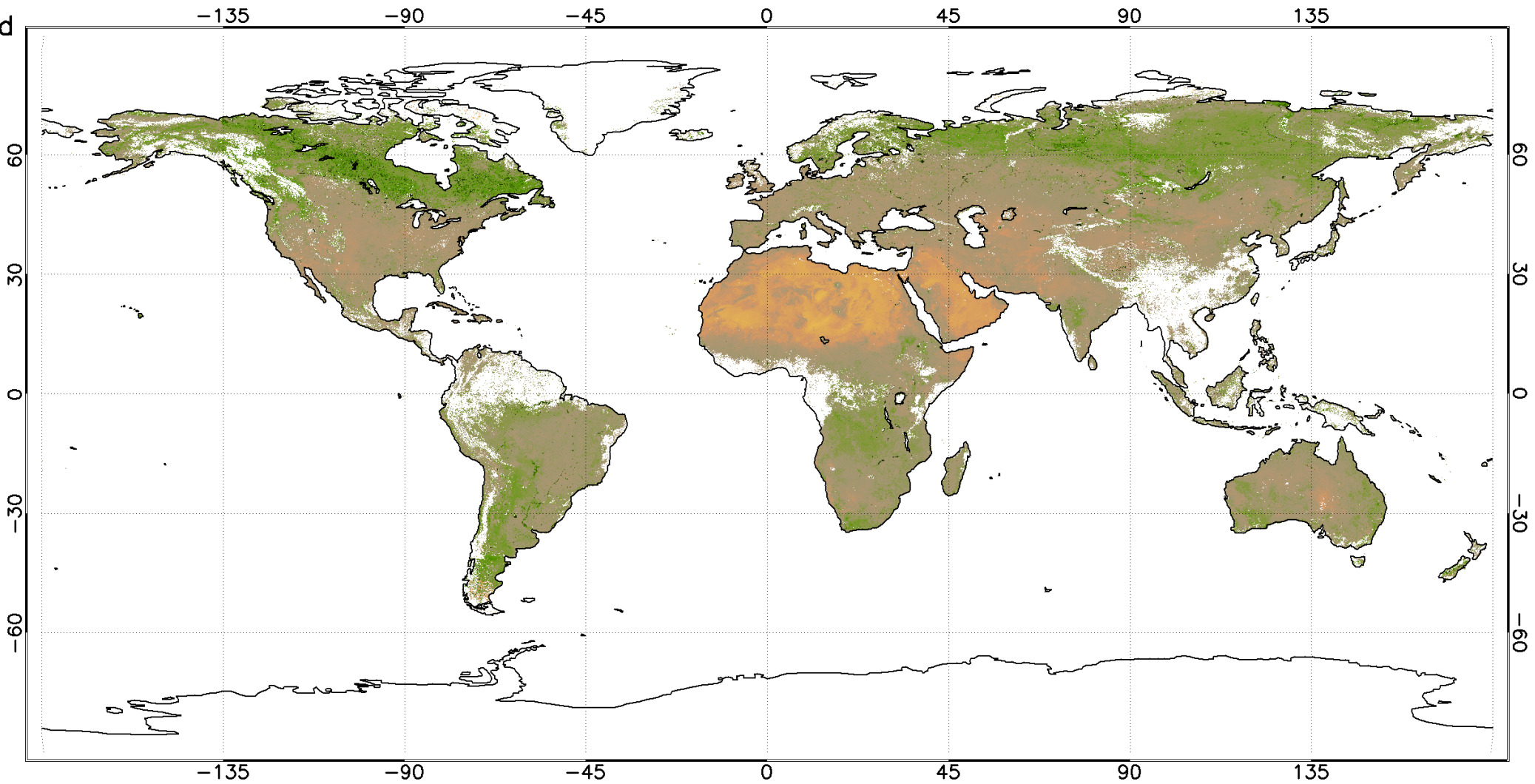


Sluneční a dlouhovlnné záření

Global Land

2014.7.5

Surface Albedo PROBA-V (BH-NI)



Radiační a tepelná bilance zemského povrchu

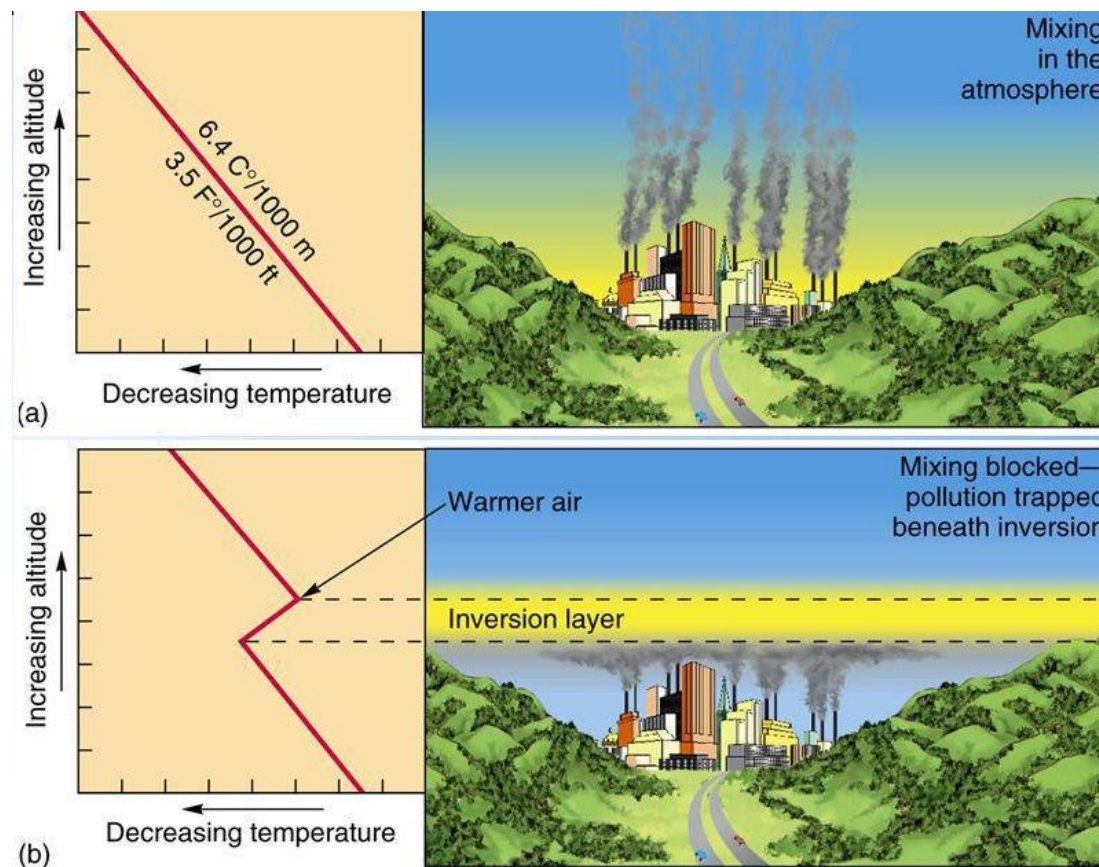
- **Radiační bilance**
 - rozdíl mezi absorbovaným slunečním zářením a efektivním vyzařováním povrchu Země
 - tepelné příjmy během kladné bilance:
 - turbulentní teplo, latentní teplo, akumulované teplo (půda, zástavba aj.)
 - tepelné ztráty během záporné bilance:
 - vyzařování povrchu x kompenzace akumulovaným, latentním a odpadním antropogenním teplem

Stabilní podmínky v atmosféře

- Vertikální přenos v ovzduší závislý na in/stabilitě atmosféry
- Stavy stabilní, instabilní (labilní), indiferentní
- S rostoucí instabilitou lepší podmínky pro vertikální přenos
- Adiabatické procesy:
 - suchoadiabatický gradient: $1\text{ °C} / 100\text{ m}$ výšky
 - vlhkoadiabatický gradient: $0,65\text{ °C} / 100\text{ m}$ výšky
- Vliv izotermie a teplotní inverze na stabilitu atmosféry

Teplotní inverze

- Růst teploty vzduchu s výškou v určité části atmosféry
- Nejstabilnější typ atmosféry (potlačení vertikálních pohybů, konvekce, rozptylu znečišťujících látek aj.)
- Přízemní a výšková teplotní inverze



Teplotní inverze

- **Radiační inverze**
 - ochlazení povrchu během záporné radiační bilance (noc, zimní sezona) a následné ochlazení přízemní vrstvy vzduchu
 - častý výskyt v údolích, kotlinách, pod svahy aj.
 - příznivý vliv sněhové pokrývky, jasné oblohy, bezvětří
 - výšková radiační inverze: vyzařování infračerveného záření vrstvou se zvýšeným obsahem vodní páry/oblak a ochlazování horní hranice této vrstvy ve vyšší hladině atmosféry

Teplotní inverze

- Advekční inverze
 - přízemní: proudění teplejšího vzduchu nad chladnějším a jeho ochlazování (sněhová inverze, příliv teplého oceánského vzduchu v zimní sezoně)
 - výšková: obdobný princip, bez přítomnosti frontálního rozhraní
- Frontální inverze
 - vznik na teplé i studené frontě

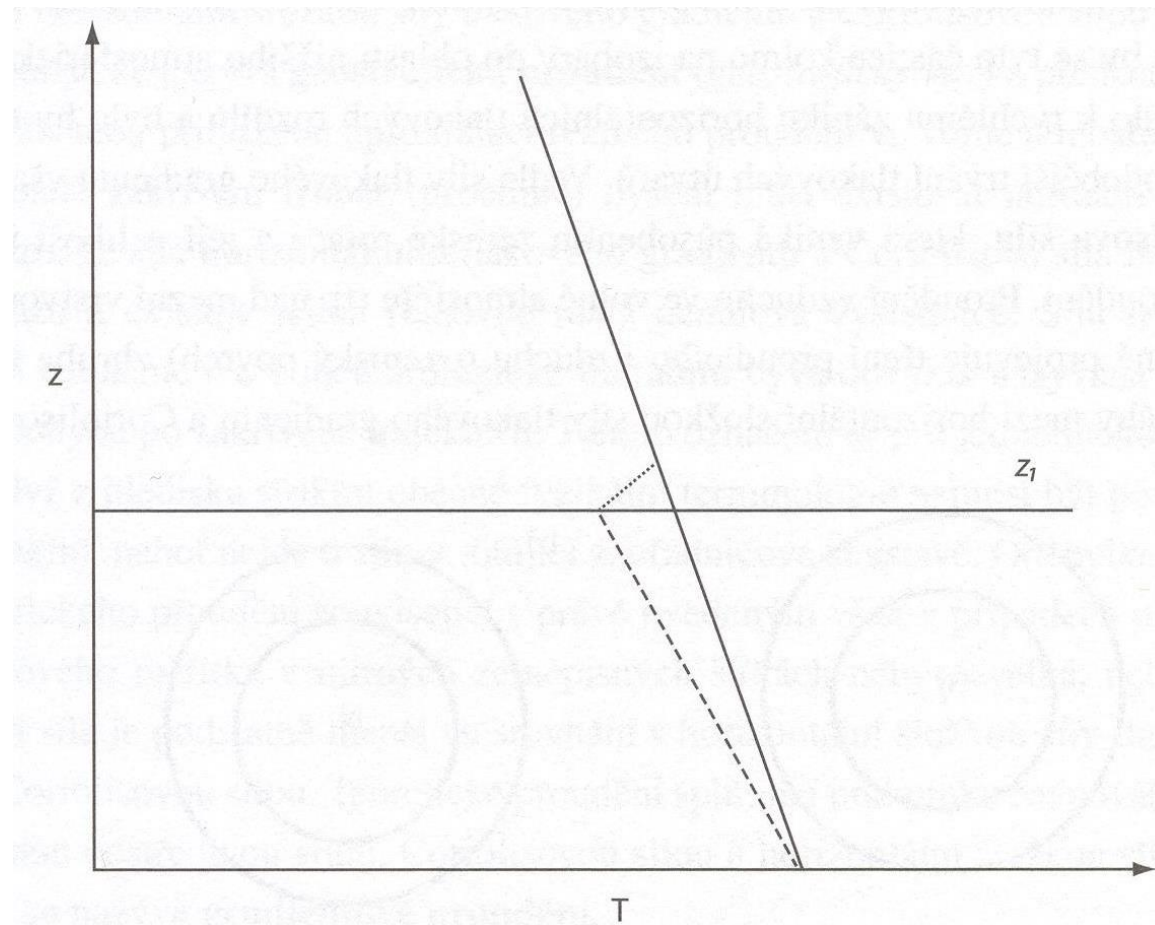


Teplotní inverze

- Subsidenční inverze
 - vznik sesedáním (subsidencí) stabilní vzduchové hmoty v oblasti tlakové výše
 - výškové, s poklesem k zemskému povrchu zanikají
- Turbulentní inverze
 - vertikálně nevyvinutá výšková inverze se základnou několika set metrů nad povrchem
 - vznik následkem turbulentního proudění a výškové teplotní inverze

Teplotní inverze

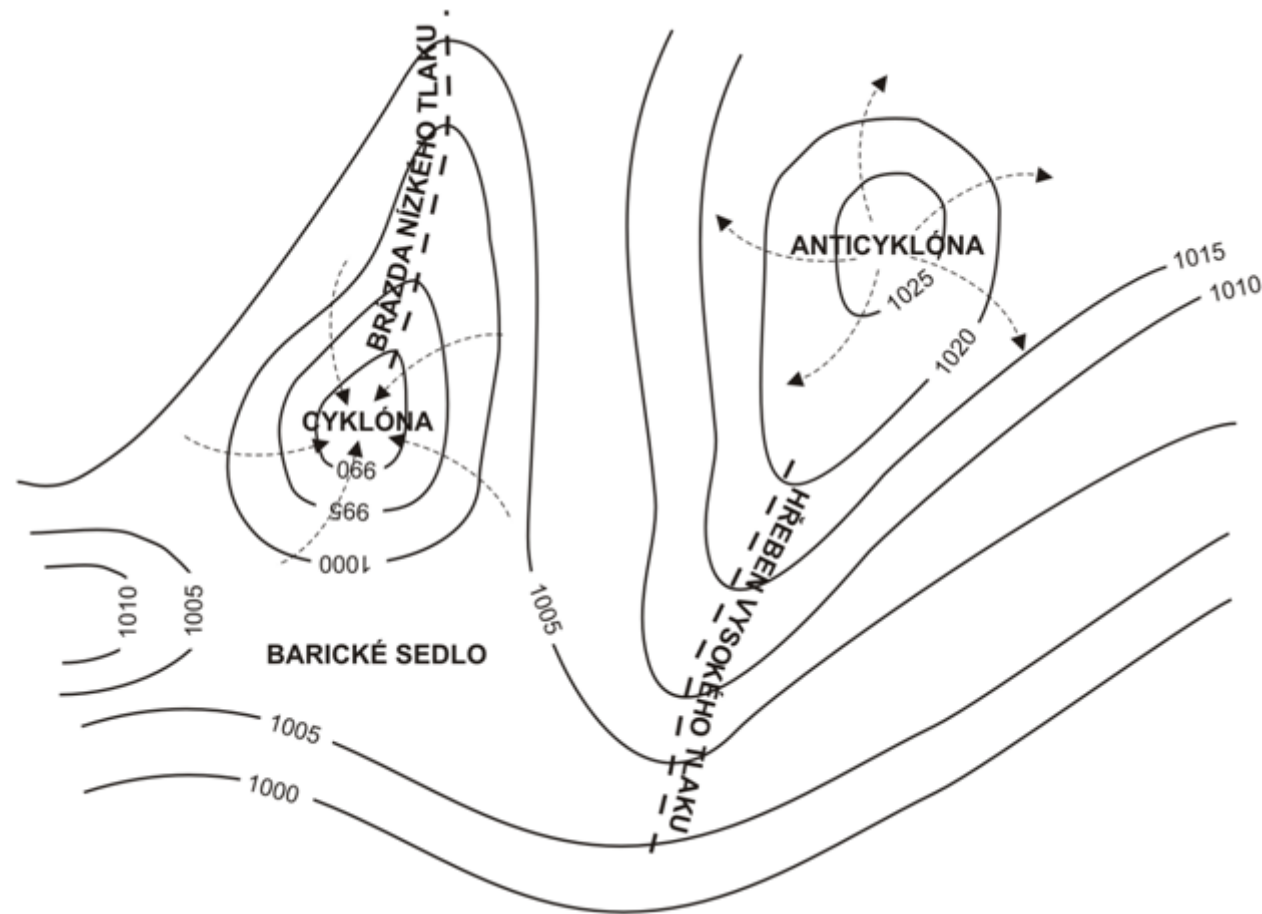
Vznik teplotní turbulentní inverze



Proudění vzduchu a tlaková pole

- Tlaková níže (TN, cyklony), tlaková výše (TV, anticyklony), brázda nízkého tlaku vzduchu, hřeben vysokého tlaku vzduchu
- Horizontální tlakový gradient (HTG)
- Coriolisova síla (CS)
- Geostrofické proudění
 - relativní rovnováha mezi HTG a CS nad mezní vrstvou atmosféry
- Gradientové proudění
 - teoretické rovnovážné proudění mezi HTG, CS a odstředivou silou

Proudění vzduchu a tlaková pole

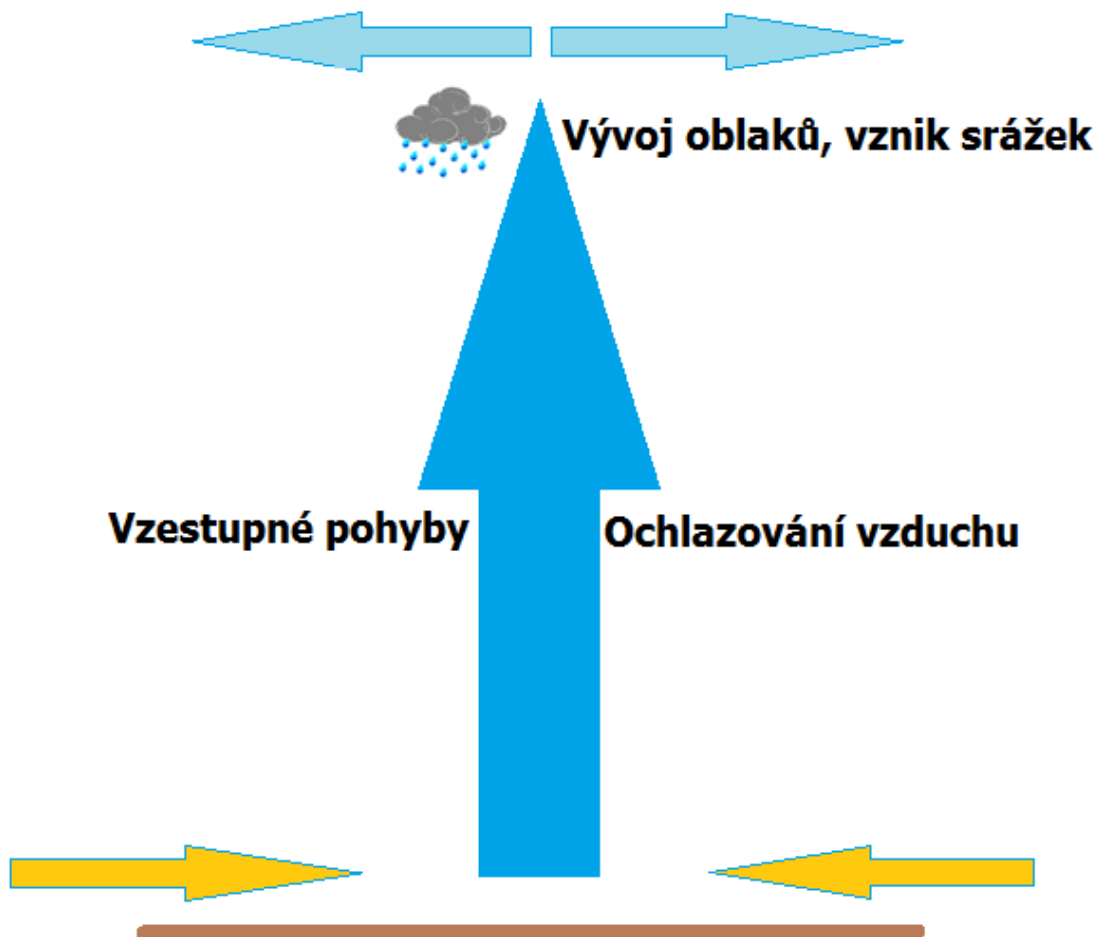


Proudění vzduchu a tlaková pole

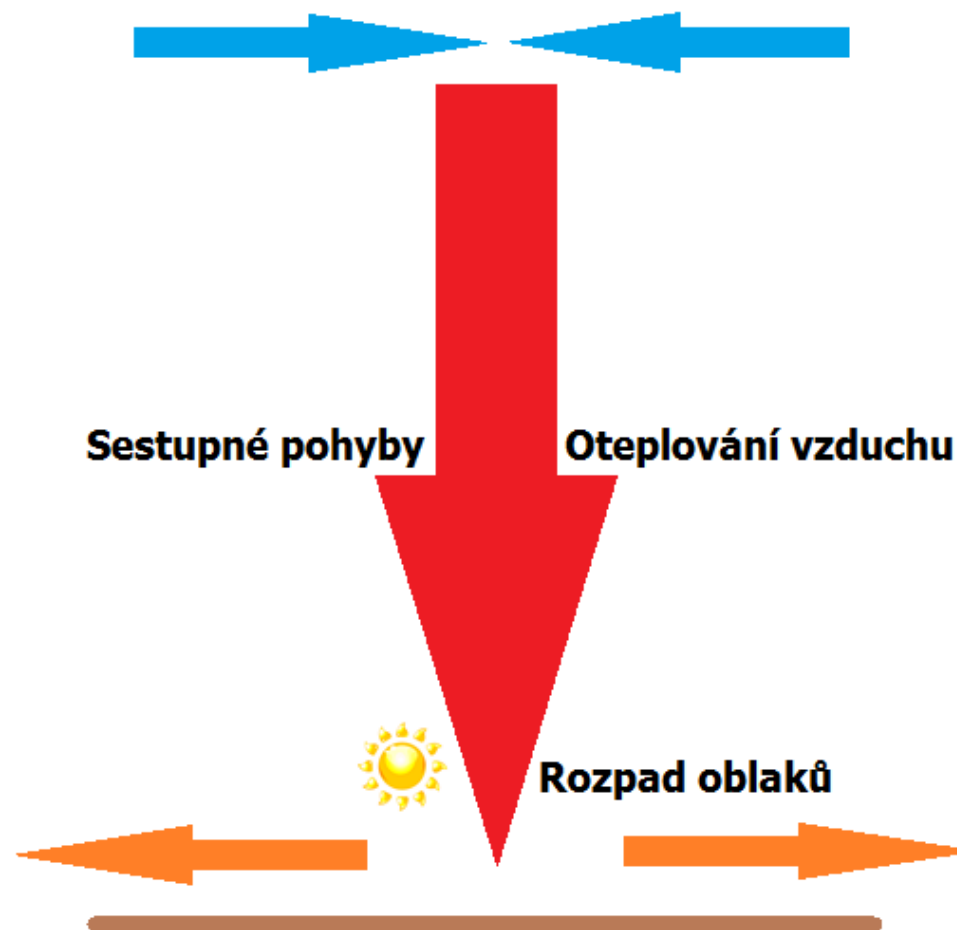
- Síla tření
 - pokles rychlosti větru v mezní vrstvě atmosféry
 - stáčení směru větru (až 30° v oblasti ČR)
- Tlaková níže
 - vzestupné pohyby ($v = x \text{ cm/s}$), vznik oblačnosti, srážky
 - zlepšení rozptylu znečišťujících látek, snižování přízemního znečištění
- Tlaková výše
 - sestupné pohyby, malá oblačnost, přízemní radiační inverze
 - nižší rychlosti horizontálního proudění: horší rozptylové podmínky

Proudění vzduchu a tlaková pole

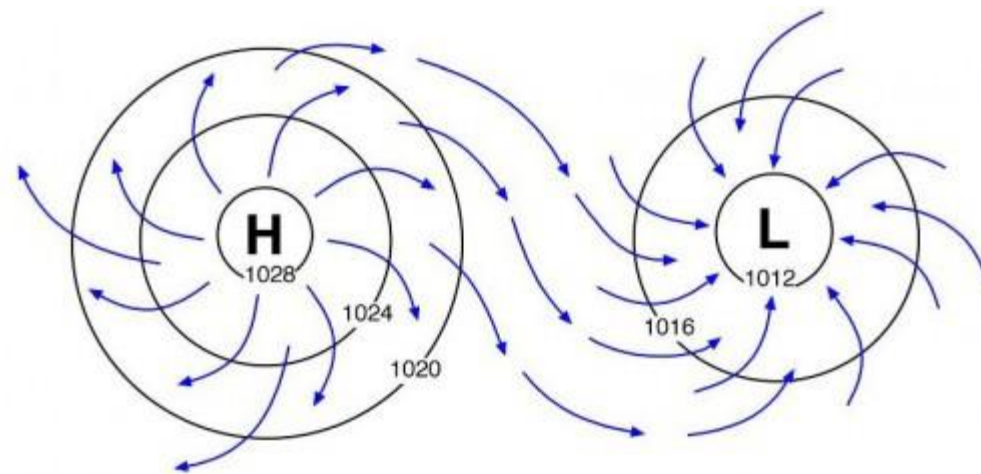
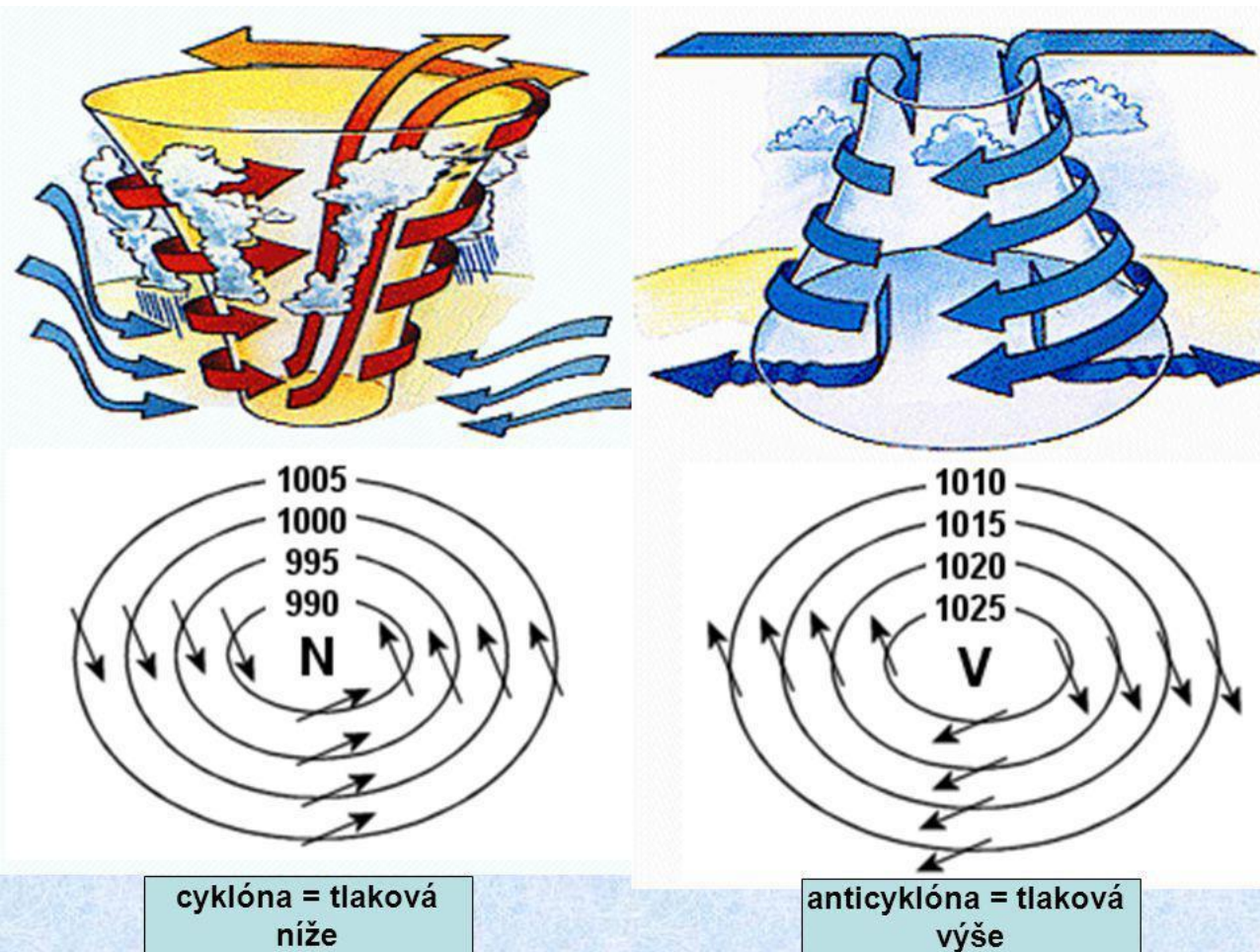
CIRKULACE V TLAKOVÉ NÍŽI



CIRKULACE V TLAKOVÉ VÝŠI

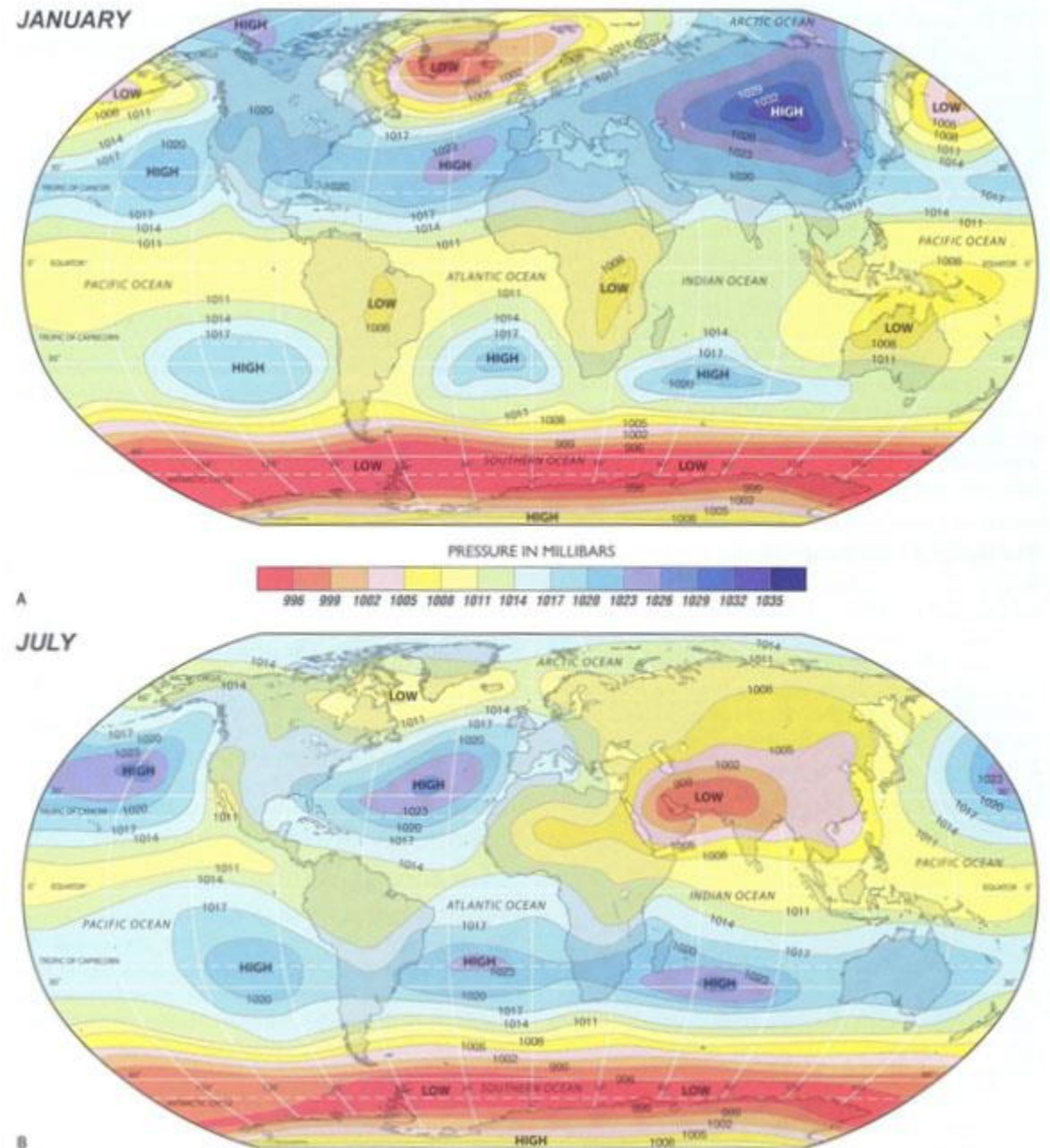


Proudění vzduchu a tlaková pole



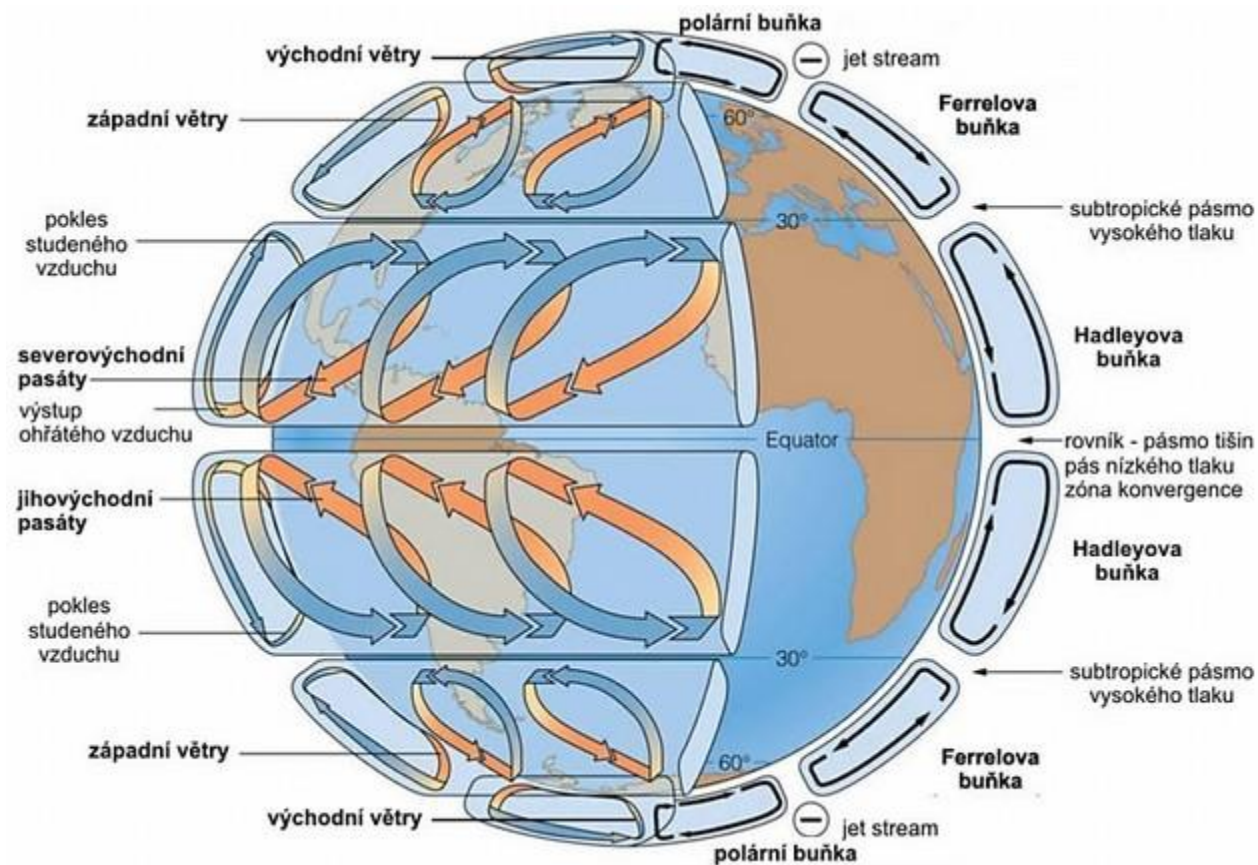
Proudění vzduchu a tlaková pole

- Akční centra atmosféry
 - ekvatoriální tlaková deprese, Islandská TN, Aleutská TN, Azorská TV, Havajská TV
- Sezonní tlakové útvary
 - Perská/Íránská TN, Sibiřská TV, Kanadská TV



Proudění vzduchu a tlaková pole

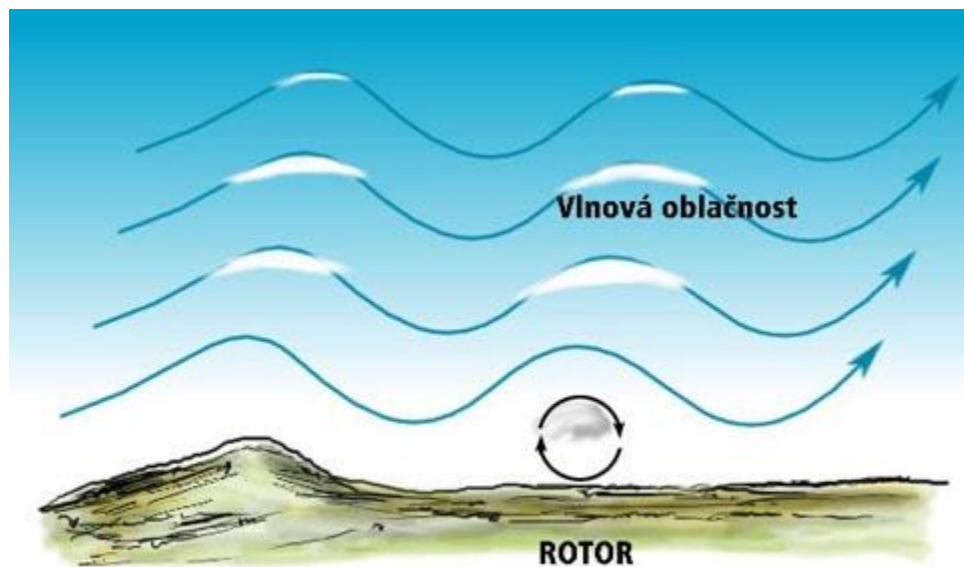
- Hadleyho, Ferrelova a polární buňka a jejich vliv na cirkulaci atmosféry



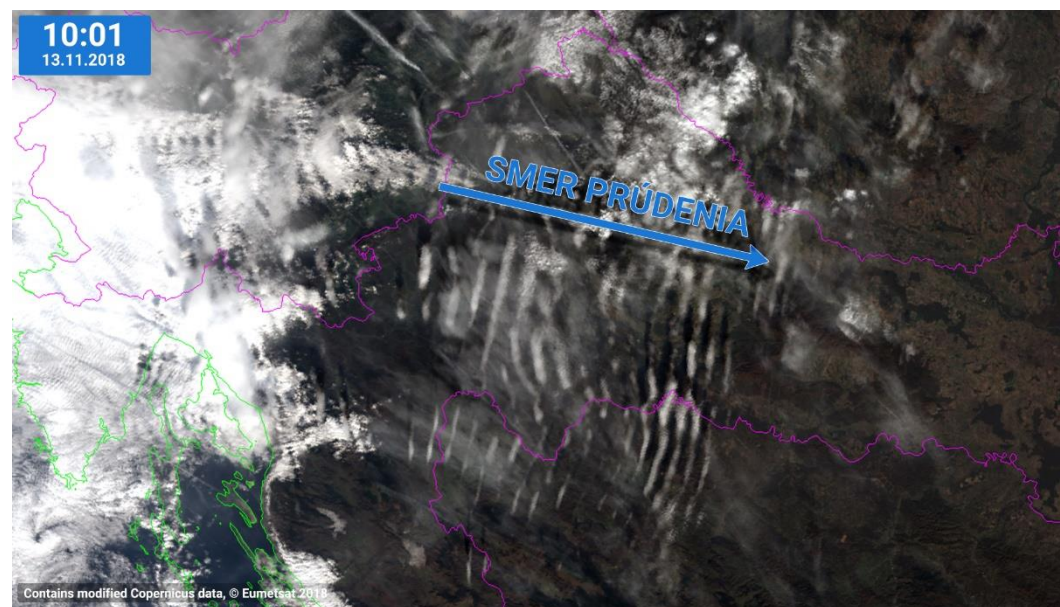
Oblaka

- Princip vzniku oblaků (nasycení a kondenzace vodní páry)
 - adiabatické ochlazování při překročení hladiny kondenzace
 - termická konvekce ($v = 1-10 \text{ km/s}$), konvekční a orografická oblačnost
 - maximum v odpoledních hodinách
 - izobarické ochlazování při překročení teploty rosného bodu
 - pod/inverzní oblačnost pod výškovými inverzemi (vertikálně nevyvinutá oblačnost – St)
 - maximum v dopoledních hodinách (letní půlrok) i během dnů (podzim, zima)
 - vlnový charakter oblačnosti

Oblaka



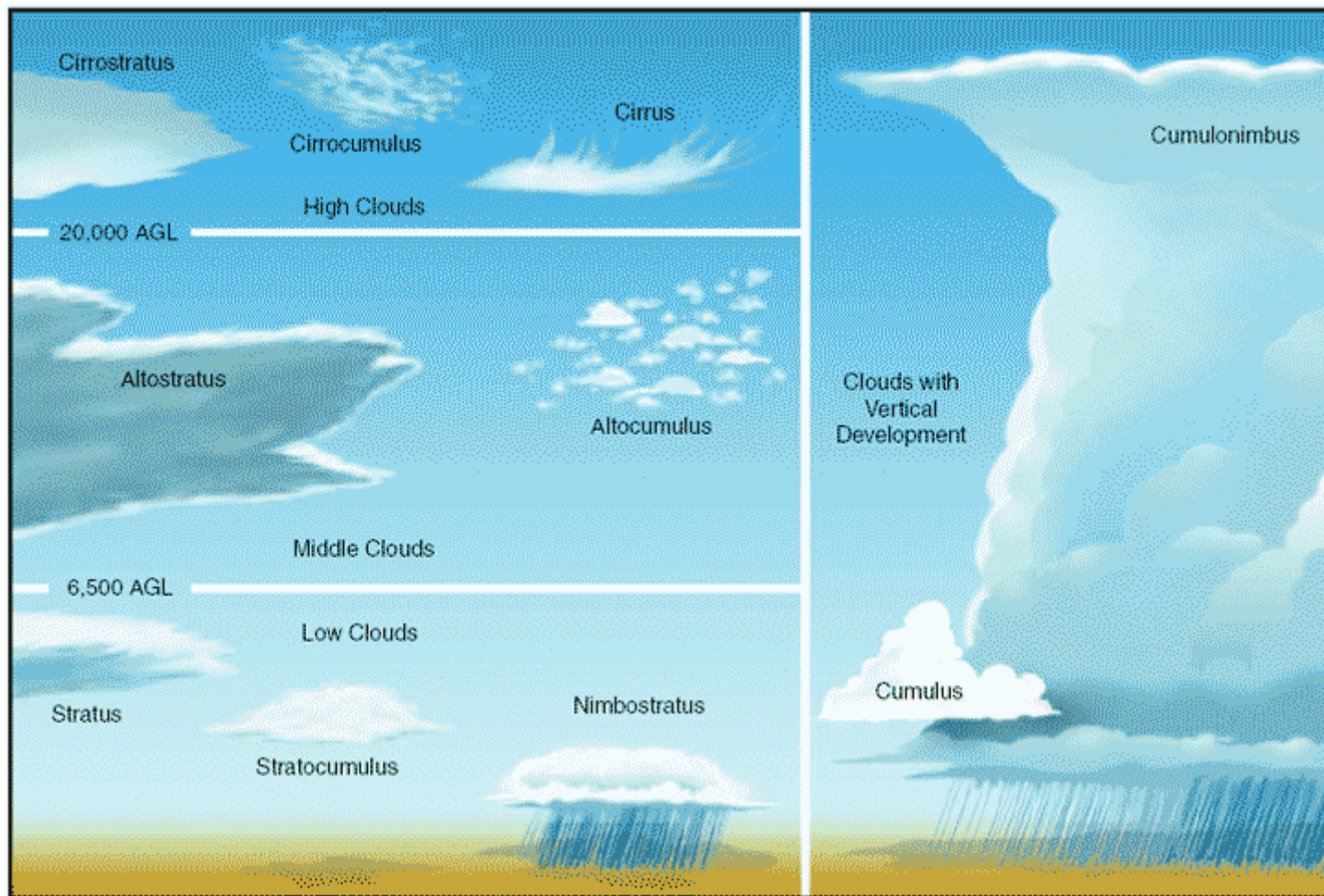
Vlnová oblaka



Druhy oblaků

- Podle výšky:
 - 6–9 km: cirrus (Ci), cirrocumulus (Cc), cirrosstratus (Cs)
 - 2–5 km: altostratus (As), altocumulus (Ac)
 - spodní základna do 2 km: stratus (St), stratocumulus (Sc), nimbostratus (Ns)
 - konvektivní oblaka: cumulus (Cu), cumulonimbus (Cb)
- Podle složení:
 - z vodních kapiček, smíšené, ledové oblaky
- Podle teploty:
 - teplé oblaky ($T > 0 \text{ °C}$) nulová izoterma, přechlazené oblaky ($T < 0 \text{ °C}$)

Druhy oblaků



Proces kondenzace

- Kondenzace vodní páry: základní proces pro vznik oblaků
- Nezbytná přítomnost aerosolových částic – kondenzačních jader ($r = 10^{-8} - 10^{-5}$ m, $r > 10^{-6}$ = obří jádra, minimum)
- Aerosolové částice mnohdy rozpustné ve vodě (např. mořské soli), formou roztoku součástí kapky
- Raoultův zákon: tlak vodní páry nad kapičkou roztoku (E') menší než tlak vodní páry nad kapičkou čisté vody (E) – rychlejší růst kapek roztoku formou kondenzace x stagnace růstu/vypaření kapky čisté vody

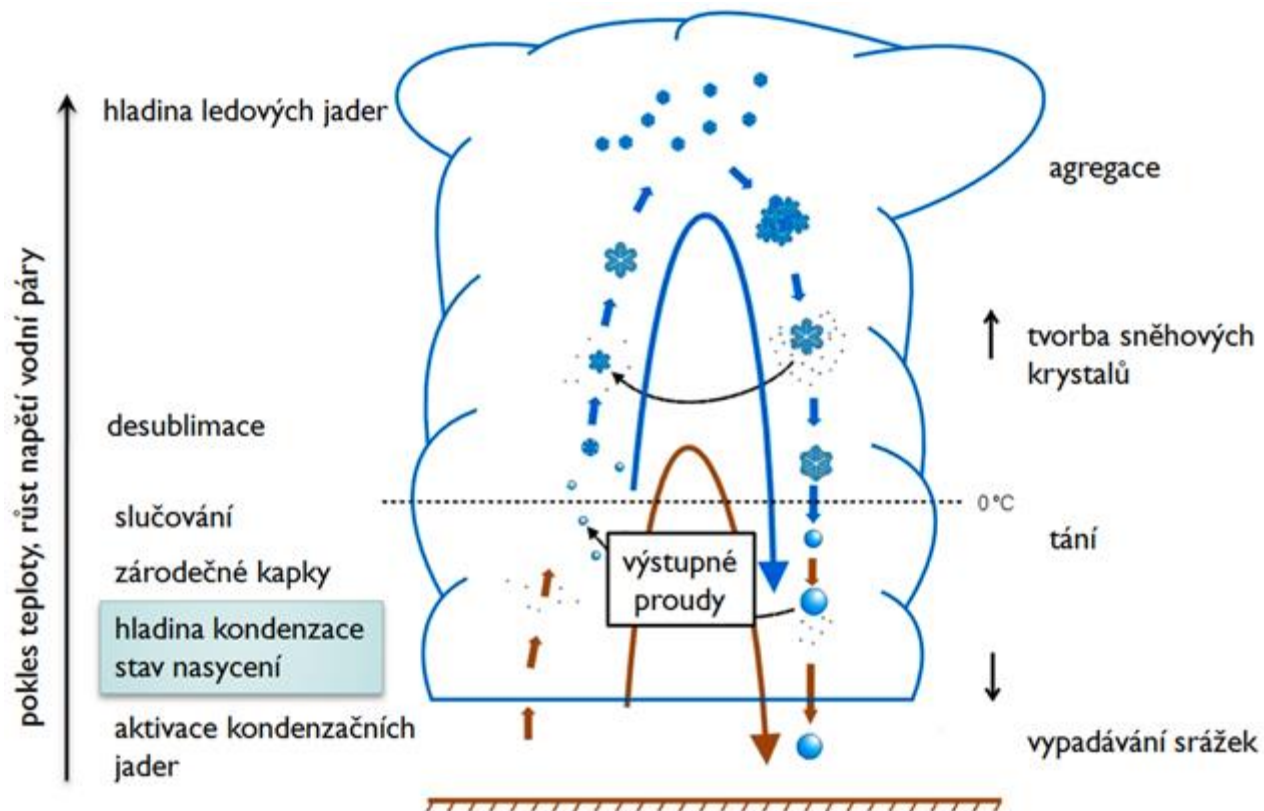
Proces kondenzace

- Přechlazená voda (až -42 °C) jako následek energeticky náročného a statisticky nepravděpodobného děje
- Pevná částice nezbytným zdrojem krystalizace při mrznutí kapičky(ledové/krystalizační jádro)

Teorie vzniku srážek

- Podstata jevu: nárůst mikroskopických kapiček (μm) na úkor jiných kapiček zapříčiněný spouštěcím mechanismem
- Mírné a vyšší zeměpisné šířky (přítomnost ledových částic):
 - při $T < 0\text{ °C}$ zmrznutí části přechlazených kapiček s krystalizačním jádrem v ledové částičky (menší tlak nasycené vodní páry)
 - vypařování přechlazených kapiček x růst ledových částiček ukládáním molekul H_2O a srážkami s přechlazenými kapičkami
 - překonání vzestupných proudů, vypadávání ledových částiček z oblaku a jejich rozpuštění pod hladinou nulové izotermy (0 °C)
 - ale: nedostatečná zásoba ledových částiček ve smíšených oblacích ($T = -10$ až -20 °C) k vydatným srážkám, vliv sekundární produkce ledu (rozpad ledových částiček)

Teorie vzniku srážek



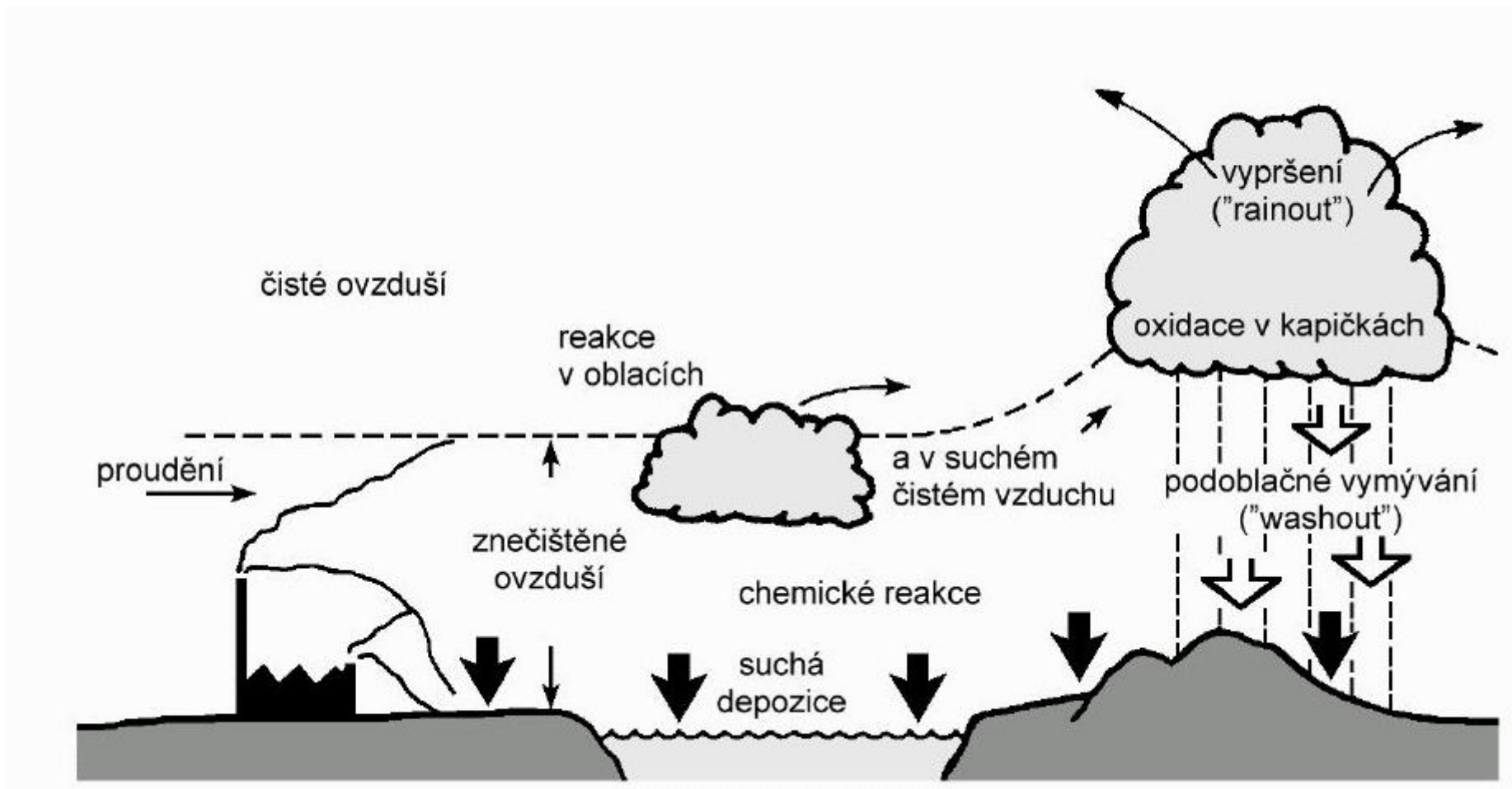
Teorie vzniku srážek

- Nízké zeměpisné šířky (koalescenční teorie):
 - převaha tropických lijáků z teplých oblaků (absence ledových částic)
 - vliv přítomnosti obřích kondenzačních jader (např. hygroskopické soli – Na^+ , Cl^-) a vzniku větších kapiček
 - koalescence: vzájemné splývání srážejících se kapek
 - překonání vzestupných proudů, pád kapky, koalescence, nárůst a rozpad ($p = 2\text{--}5 \text{ mm}$), opakování procesu až do vypadnutí srážek
 - podmínkou vysoký obsah vodní páry a kapalné vody v oblaku
 - *Lenardův efekt: velké kapky (+), mikroskopické kapičky (-) = elektrina*

Znečištění oblačné a srážkové vody

- Možnosti vniknutí znečišťujících látek do srážkové vody:
 - v době tvorby kapek (*rain out/vypršení*)
 - během vypadávání kapek skrz podoblačnou vrstvu (*wash out/vymytí*)
- Částečné znečištění srážek přirozeným a nutným jevem
- Detekce původu kondenzačních jader (Na^+ , Cl^- - hygroskopické mořské soli; K, Ca – kontinentální původ)
- Antropogenní znečištění: SO_2 , NO_x
 - nárůst kyselosti srážek (z pH 5,6 na pH 4,5–5,0)

Znečištění oblačné a srážkové vody



Znečištění oblačné a srážkové vody

- Proces wash out/vymytí
 - samočisticí mechanismus atmosféry (pevné i plynné látky) x negativní dopad ve spojitosti s antropogenním znečištěním na půdu, vegetaci, povrchovou/podzemní vodu, stavby
- Usazené srážky (rosa, jinovatka, námraza aj.)
 - vliv na sedimentaci znečišťujících látek na zemském povrchu, vegetaci aj.

Historie zemské atmosféry

- Stáří ca. 4,5 mld. let, řada proměn ve složení atmosféry
- První atmosféra: řídká, lehké a vzácné plyny (H_2 , CH_4 , NH_3 – únik)
 - odplyňování zemského pláště a kůry, geochemické procesy
- Druhá atmosféra: ca. 3,5 mld. let, těžší (úbytek CO_2 , nárůst N)
- Rozhodující vlivy pro vývoj současné atmosféry:
 - voda a vodní pára: zdroj atmosférického O_2
 - vznik a rozvoj primitivních forem života (prokaryotní org., 3 mld. let)
 - autotrofní org. (2 mld. let): produkce organických látek a energie díky fotosyntéze
 - využití slunečního záření, CO_2 a H_2O , odpadem O_2 (sinice)

Historie zemské atmosféry

- Rozhodující vlivy pro vývoj současné atmosféry:
 - kritická koncentrace O_2 v atmosféře: 0,2–2 % (respirace org.)
 - vznik heterotrofních org., ozónové vrstvy – život při hladině vody – život na souši – fotosyntéza na souši a růst O_2 (až 30 % před 300 mil. let)
- Relativně stabilní složení atmosféry posledních 500 mil. let (vliv tropopauzy a rozvoj života - produkce O_2)

Literatura

- Braniš, M., Hůnová, I. (2009): Atmosféra a klima: aktuální otázky ochrany ovzduší. Praha, Karolinum, 351 s.

Děkuji za pozornost