

---

# Základní informace o atmosféře

Mgr. Lukáš Dolák, Ph.D.

Jaro 2022

# 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. (2,5 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  $O_2$ )

# 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 %, O<sub>2</sub> – 21 %) neměnná do výšky 90–100 km
  - ideální plyny (stavová rovnice):

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

$p$  ... tlak plynu,  $\rho$  ... 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

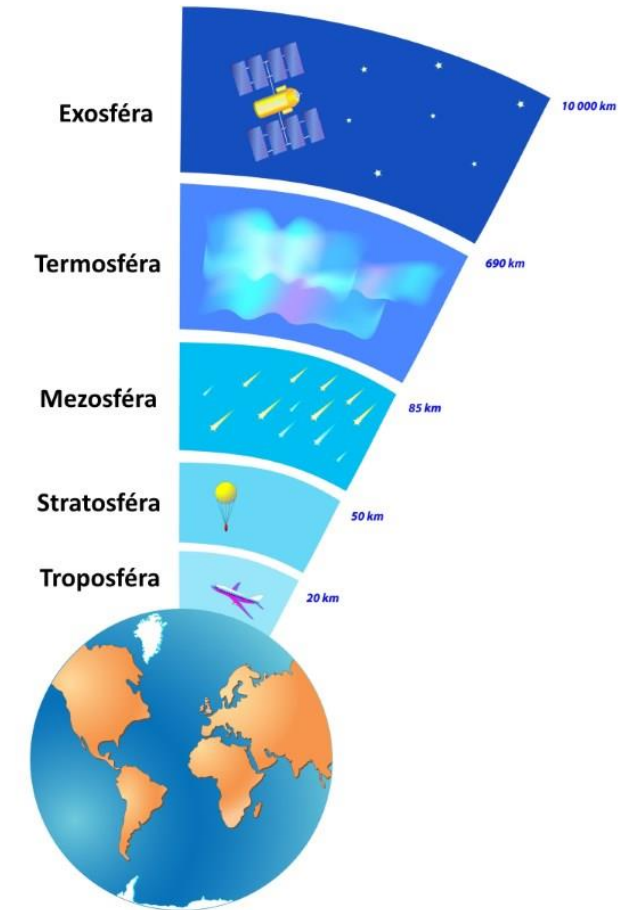
- nejspodnější část atmosféry, horní hranice 8–18 km (póly–rovník)
- pokles teploty a tlaku vzduchu s výškou (horní hranice – rovník: - 80 °C, <100 hPa; ČR: - 55 °C, 200 hPa)
- podstatné množství vodní páry, vznik oblak, srážek - „počasí“

- Stratosféra

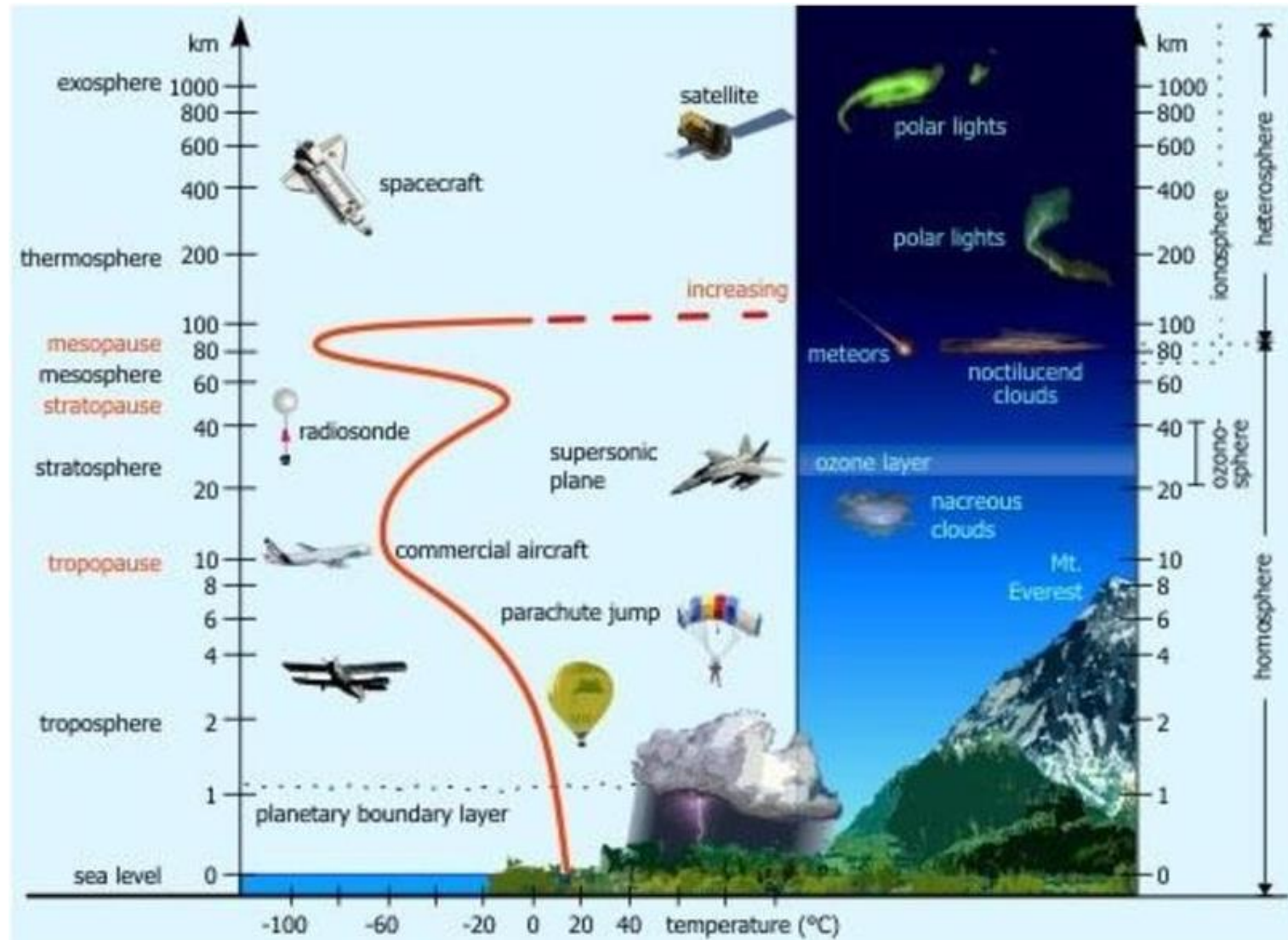
- horní hranice 50 km, izotermie (dolní hranice) a teplotní inverze (+ °C)
- ozonoféra (nejvyšší koncentrace 22–25 km)

# 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

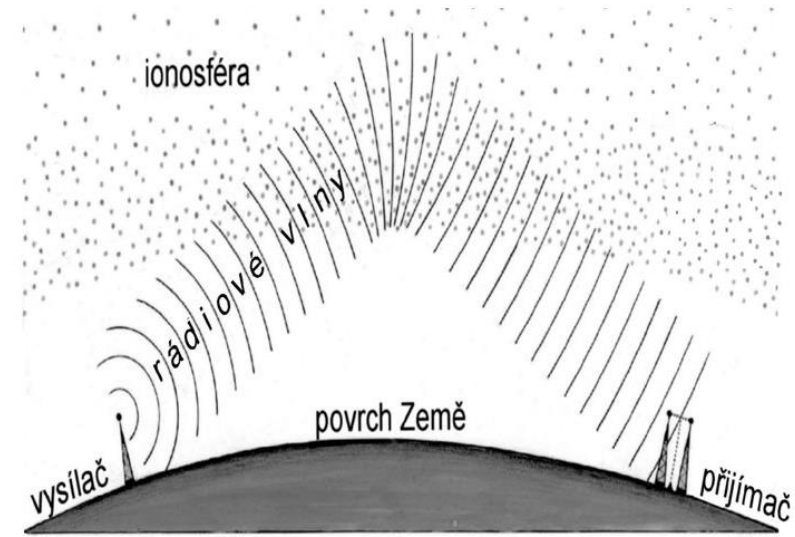


# Vertikální složení atmosféry podle průběhu teploty s výškou



# 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  $\text{H}_2\text{O}$  – vodní pára,  $\text{O}_3$  a  $\text{CO}_2$ )
- Heterosféra
  - slabé turbulentní proudění, vertikální rozložení plynů dáno difuzní rovnováhou (úbytek těžších plynů s výškou)

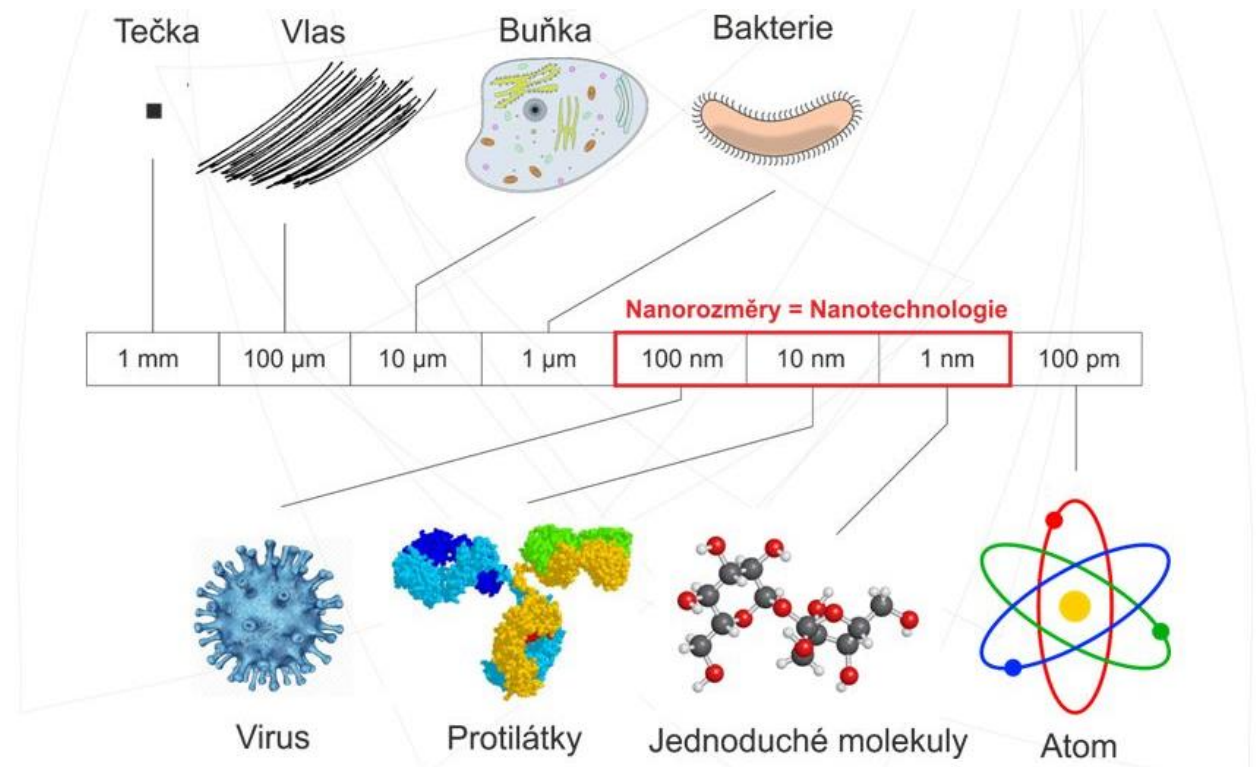
# Vertikální složení atmosféry

- 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

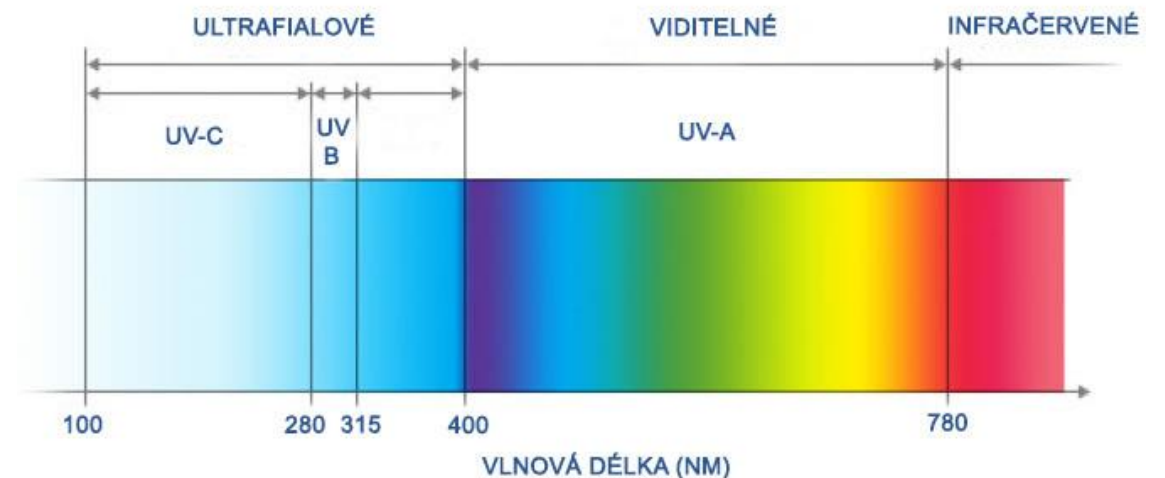
Vorsatz	Bezeichnung	Vergleich Meter
mm	Millimeter	0,001 m
$\mu\text{m}$	Mikrometer	0,000 001 m
nm	Nanometer	0,000 000 001 m





# 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





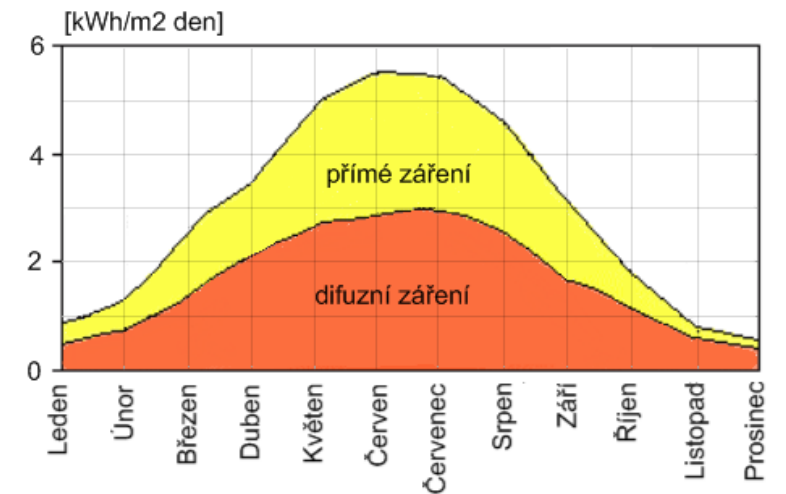
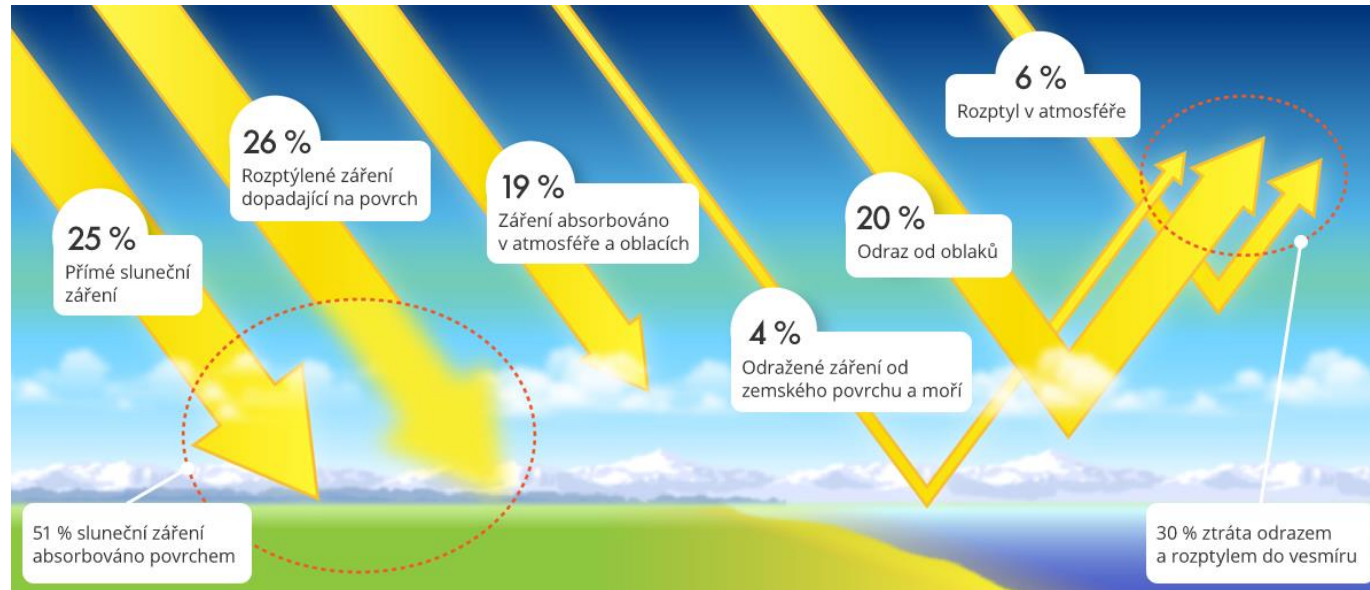
# Sluneční a dlouhovlnné záření

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

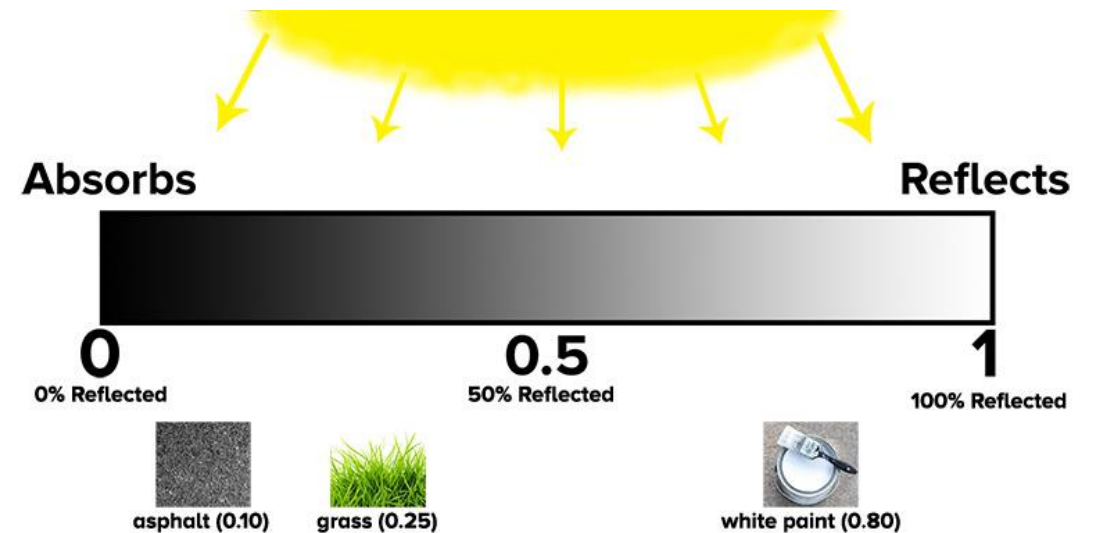
- převaha krátkých vlnových délek v rozptýleném záření viditelného spektra na molekulách vzduchu (modrá až fialová barva oblohy = velká průzračnost atmosféry)
- symetrický charakter rozptylu

# 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



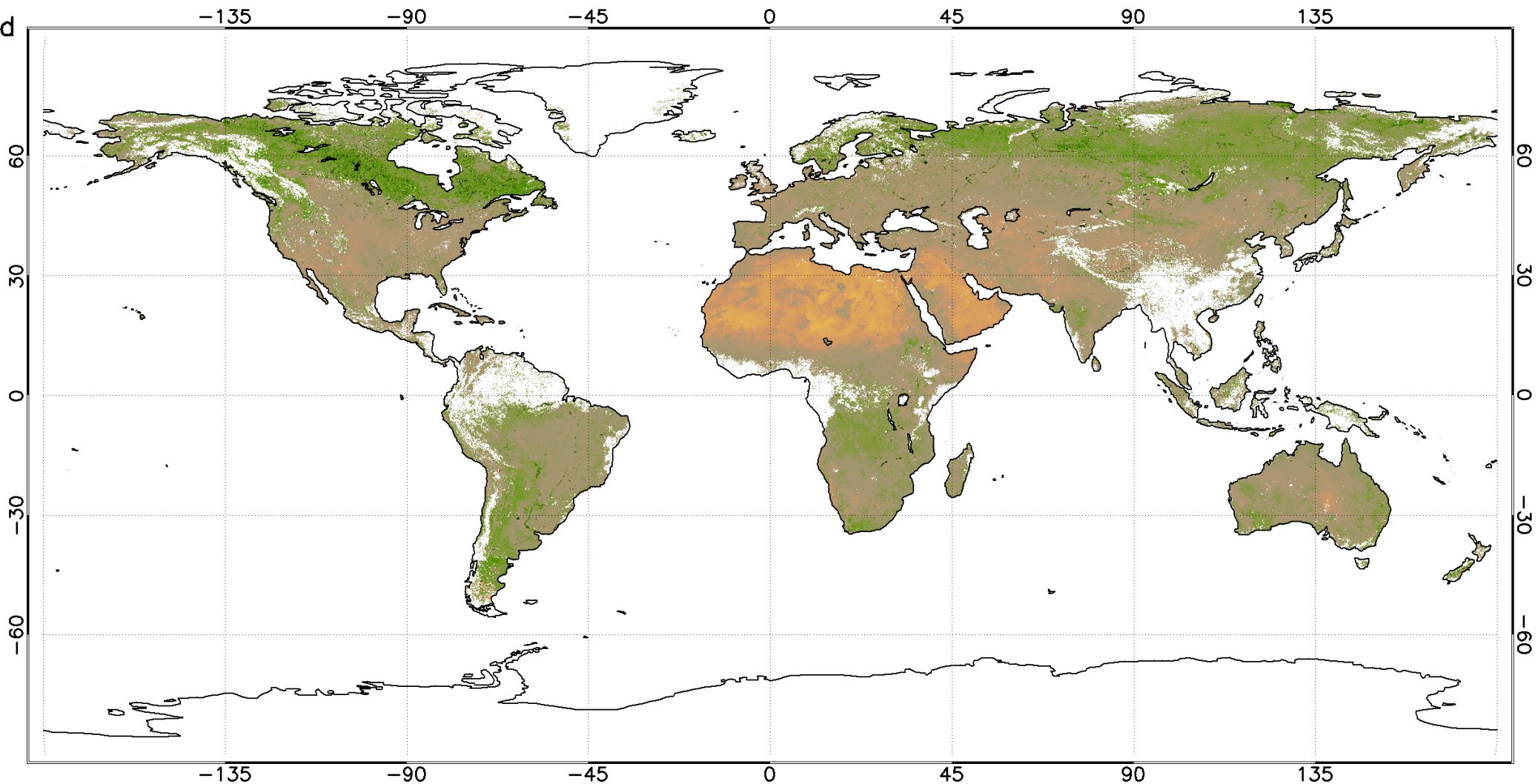
# Sluneční a dlouhovlnné záření

Global Land  
2014.7.5

Surface Albedo PROBA-V (BH-NI)



1  
0.8  
0.6  
0.4  
0.2  
0





# 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

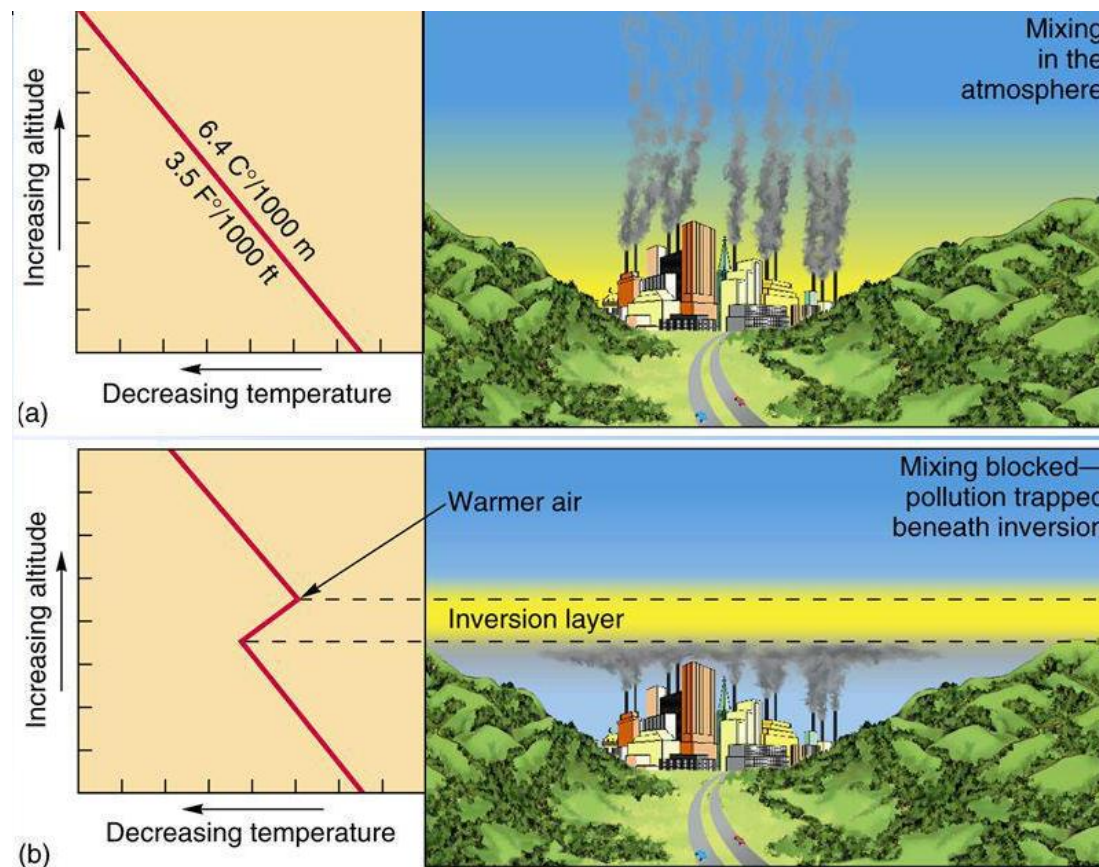
# Stabilní podmínky v atmosféře

- 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), následné ochlazení přízemní vrstvy vzduchu, výstup teplejšího vzduchu výše a omezení rozptylu znečišťujících látek v přízemní vrstvě atmosféry
  - příznivý vliv sněhové pokrývky, jasné oblohy, bezvětří
  - častý výskyt v údolích, kotlinách, pod svahy aj.
  - 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



# 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

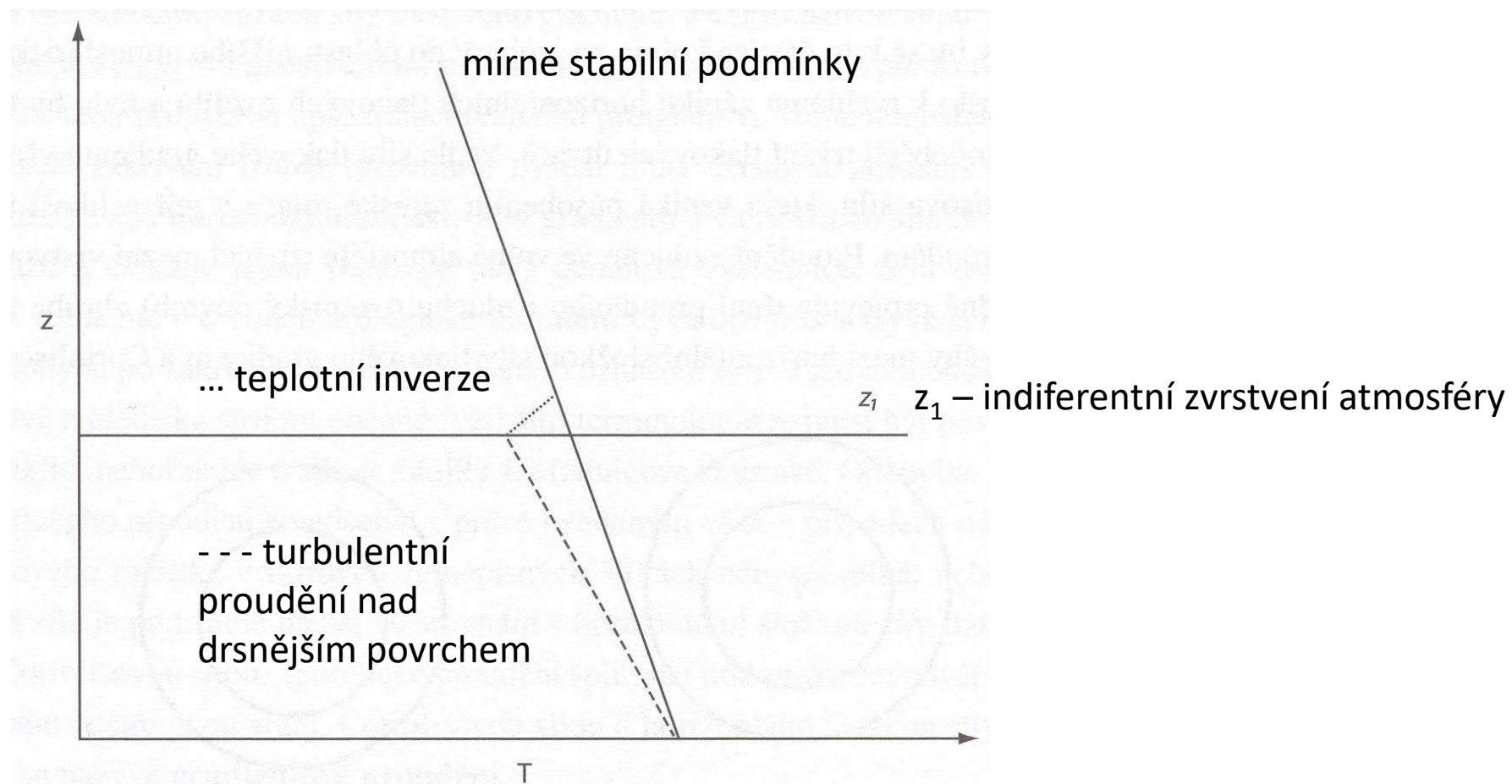


# Teplotní inverze

- 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

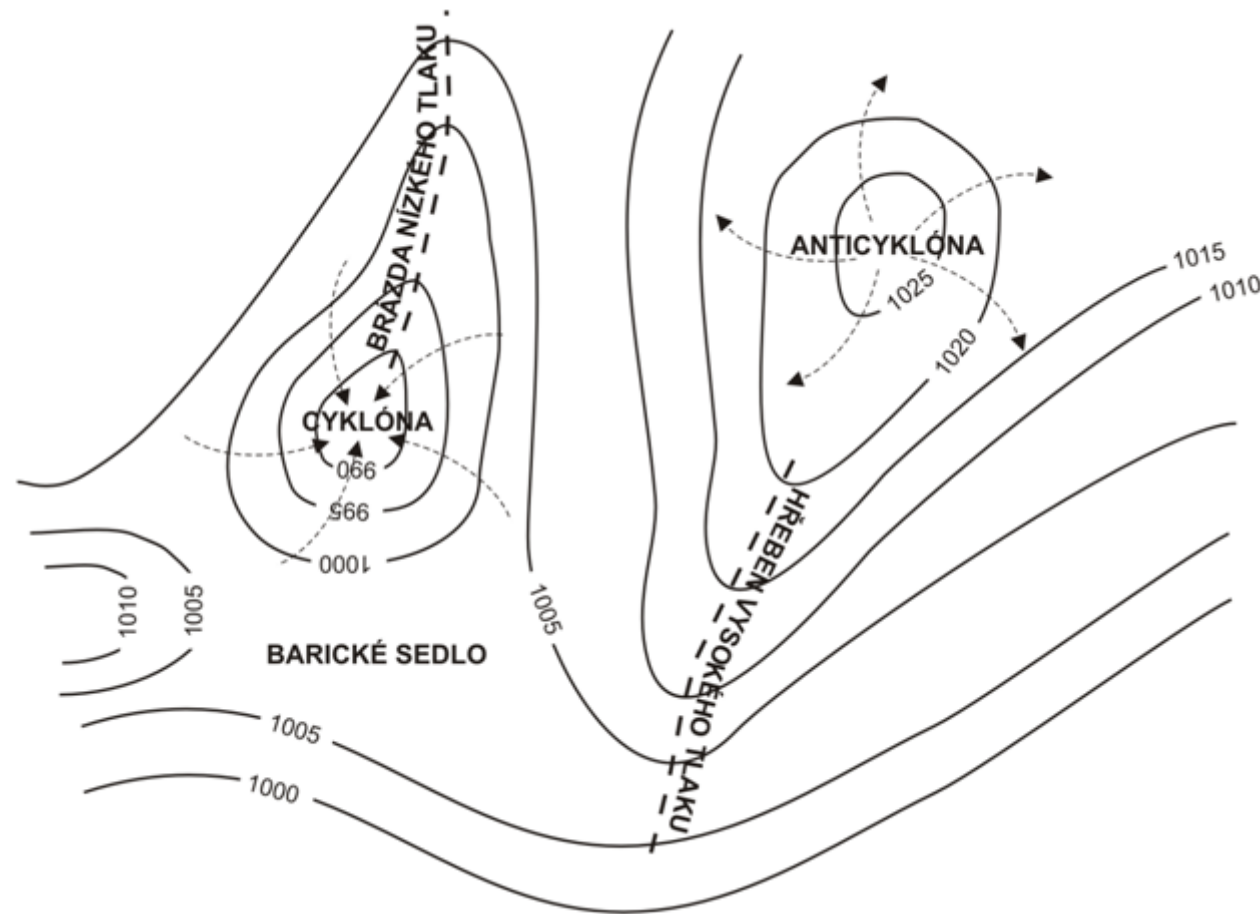
## Vznik teplotní turbulentní inverze



# 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



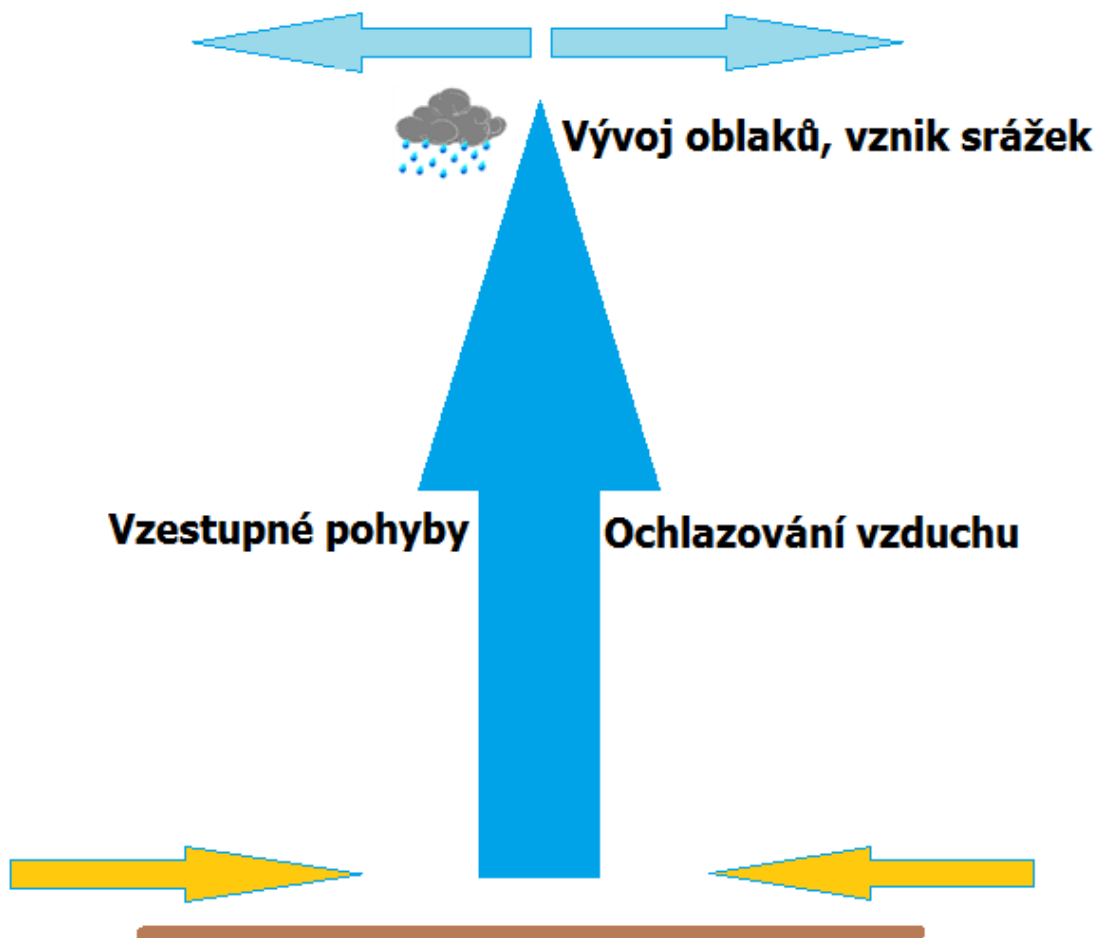


# Proudění vzduchu a tlaková pole

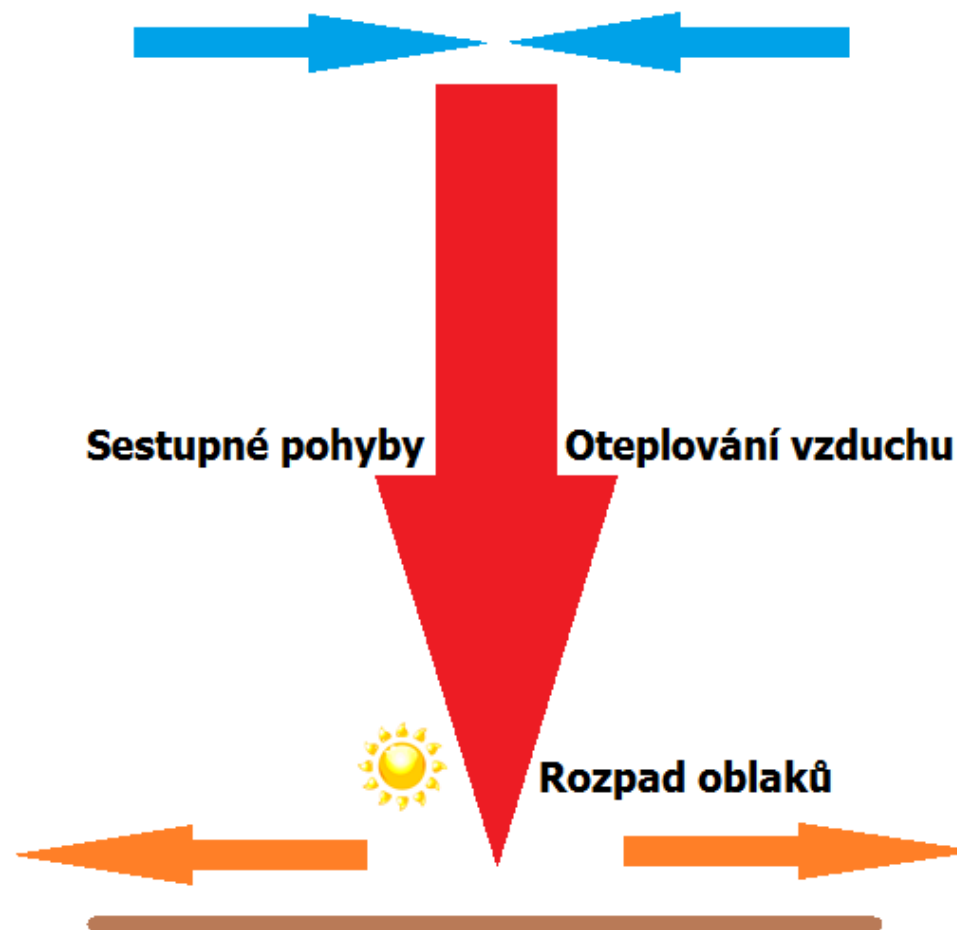
- Síla tření
  - pokles rychlosti větru v mezní vrstvě atmosféry
  - stáčení směru větru (až 30° v oblasti ČR)
- Tlaková níže
  - vzestupné pohyby ( $v = x \text{ cm/s}$ ), vznik oblačnosti, srážky
  - zlepšení rozptylu znečišťujících látek, snižování přízemního znečištění
- Tlaková výše
  - sestupné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

# Proudění vzduchu a tlaková pole

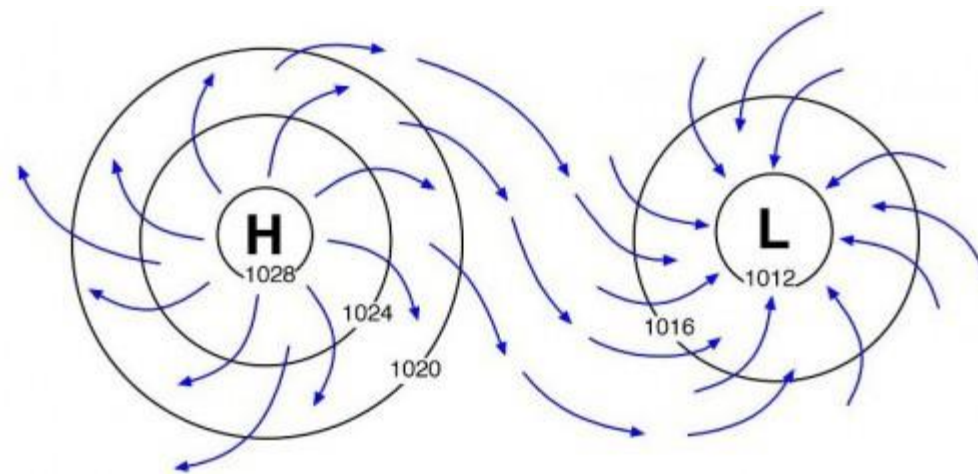
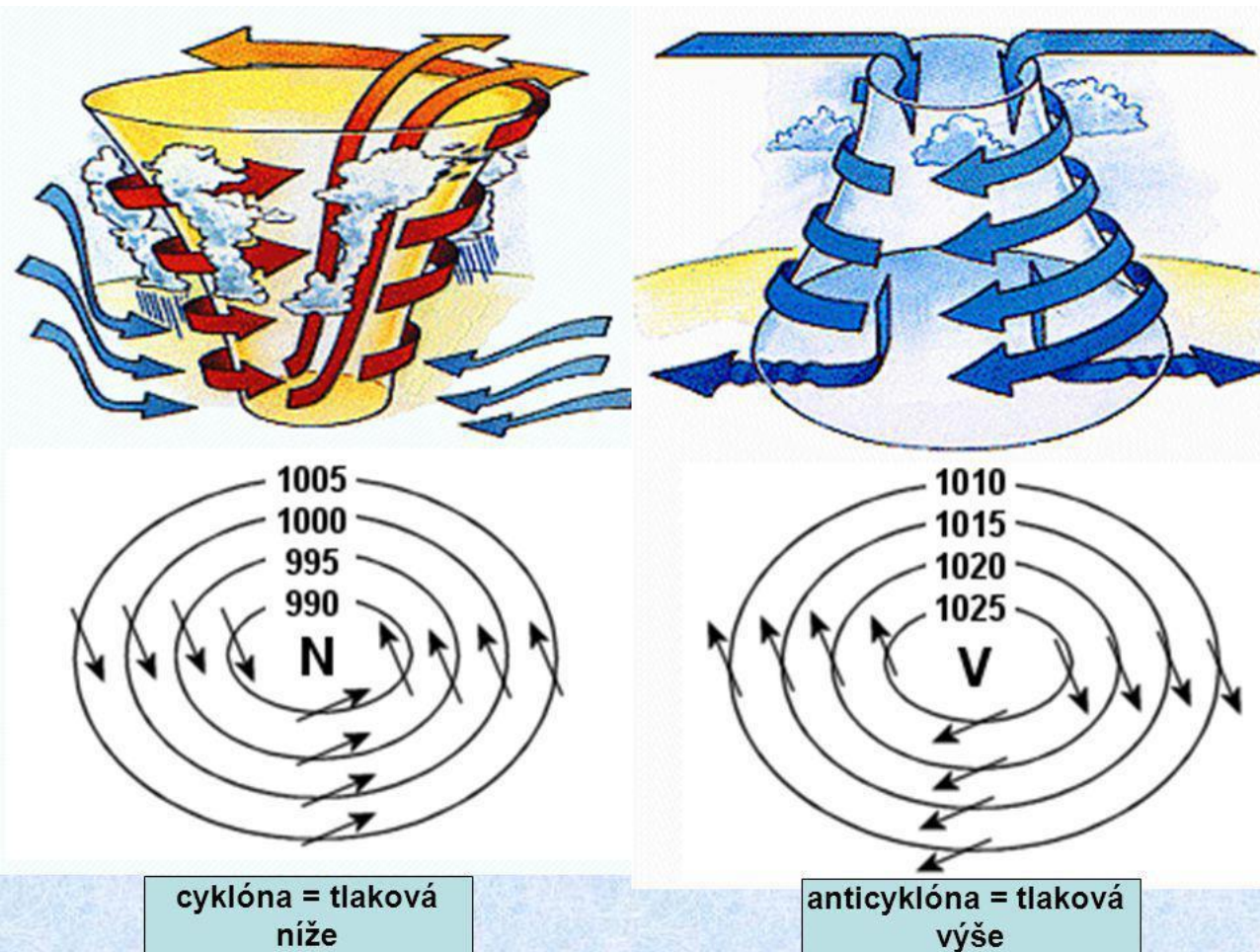
## CIRKULACE V TLAKOVÉ NÍŽI



## CIRKULACE V TLAKOVÉ VÝŠI

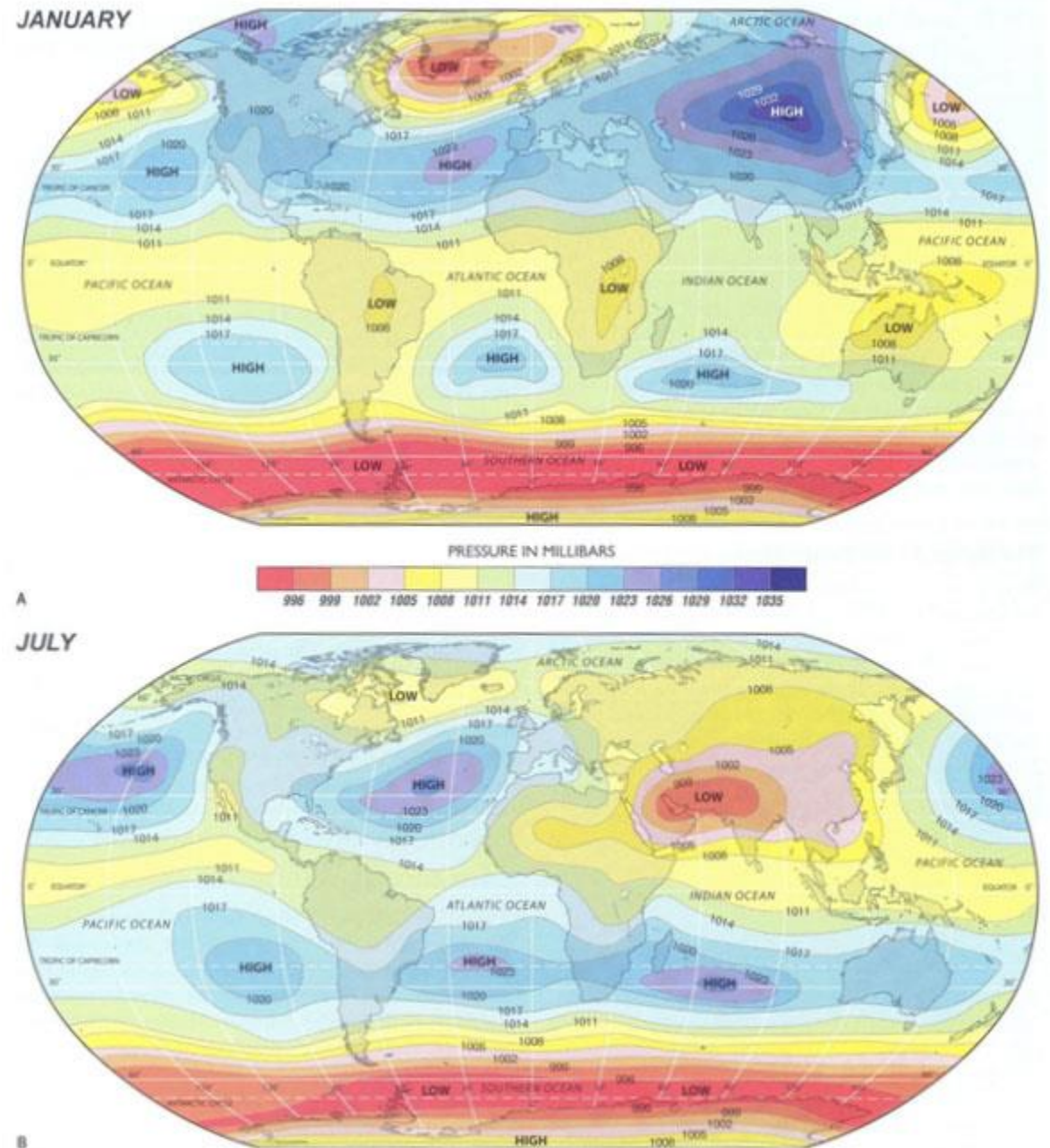


# Proudění vzduchu a tlaková pole



# Proudění vzduchu a tlaková pole

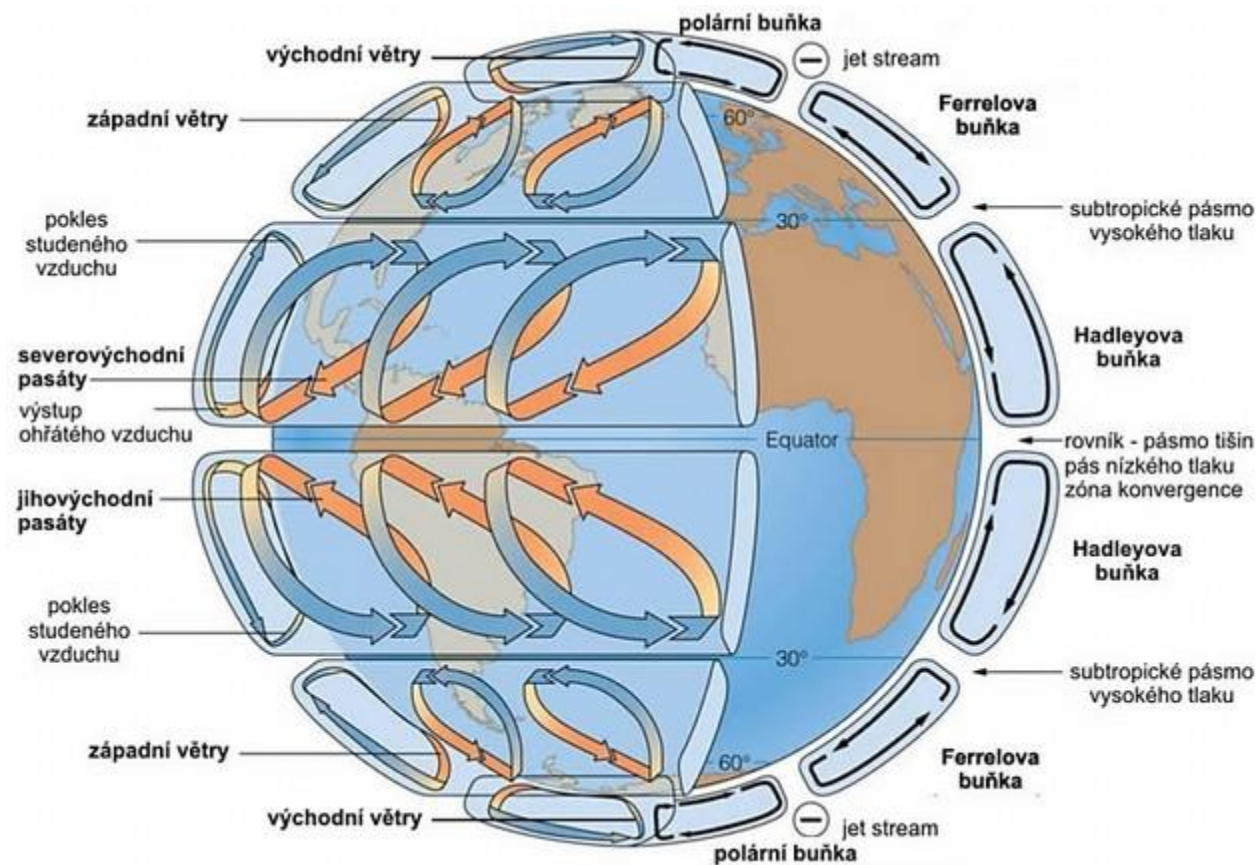
- Akční centra atmosféry
  - ekvatoriální tlaková deprese, Islandská TN, Aleutská TN, Azorská TV, Havajská TV
- Sezonní tlakové útvary
  - Perská/Íránská TN, Sibiřská TV, Kanadská TV





# Proudění vzduchu a tlaková pole

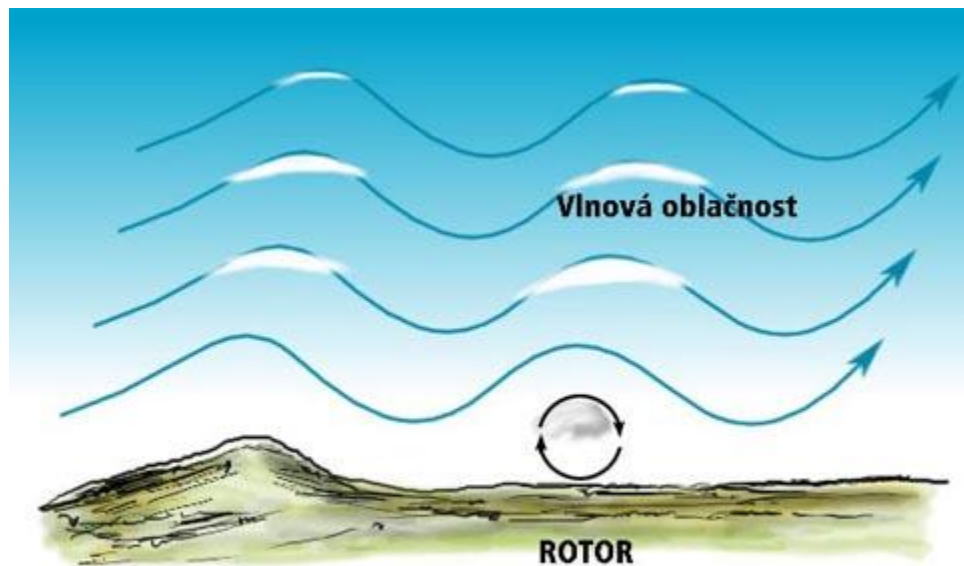
- Hadleyho, Ferrelova a polární buňka a jejich vliv na cirkulaci atmosféry



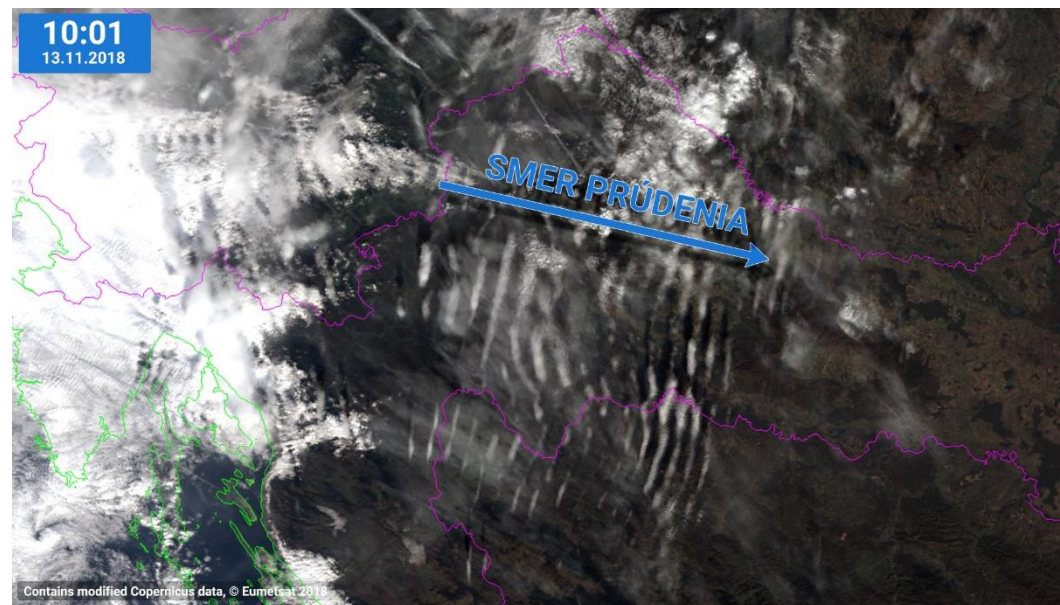
# Oblaka

- 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

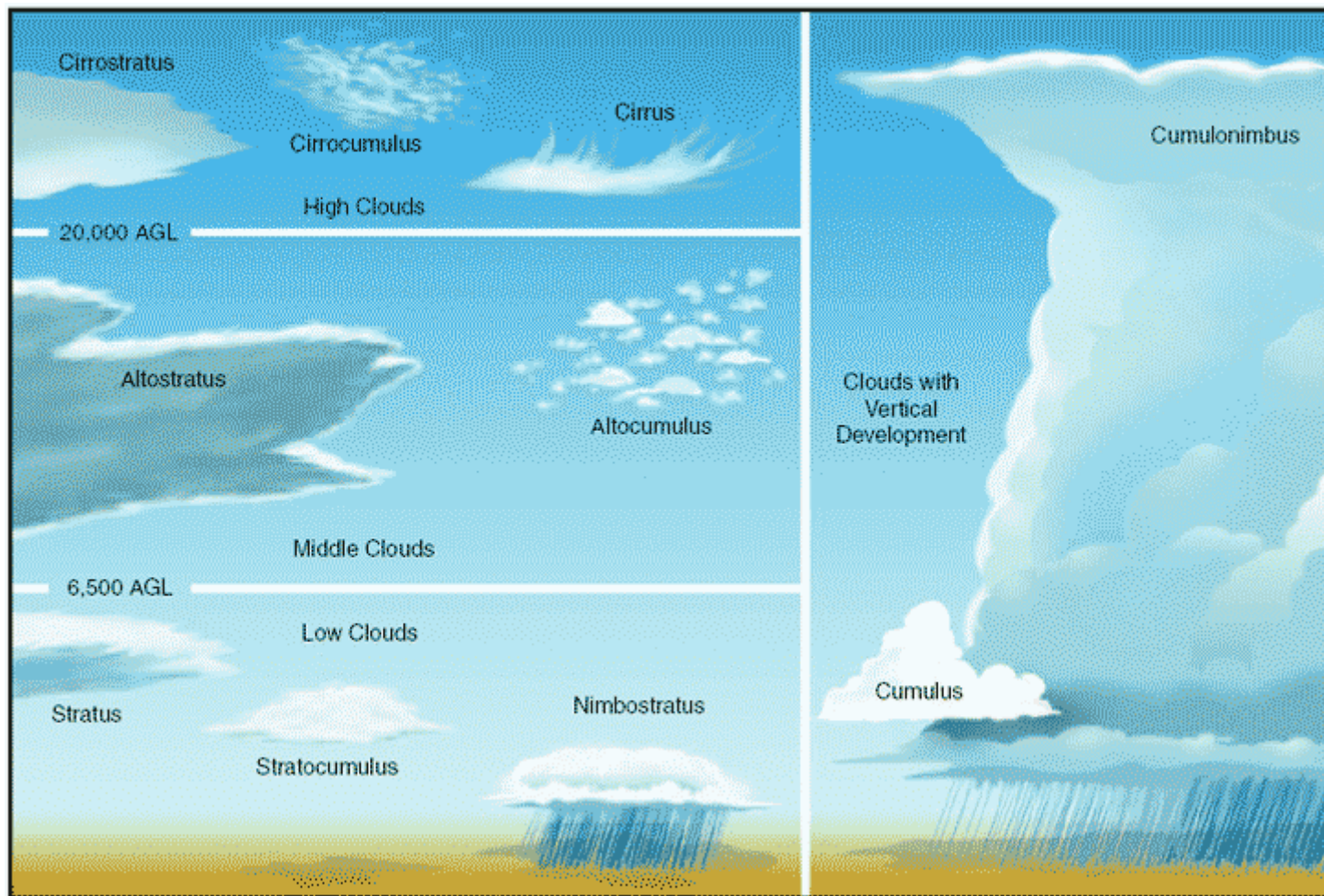


# Druhy oblaků

- 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

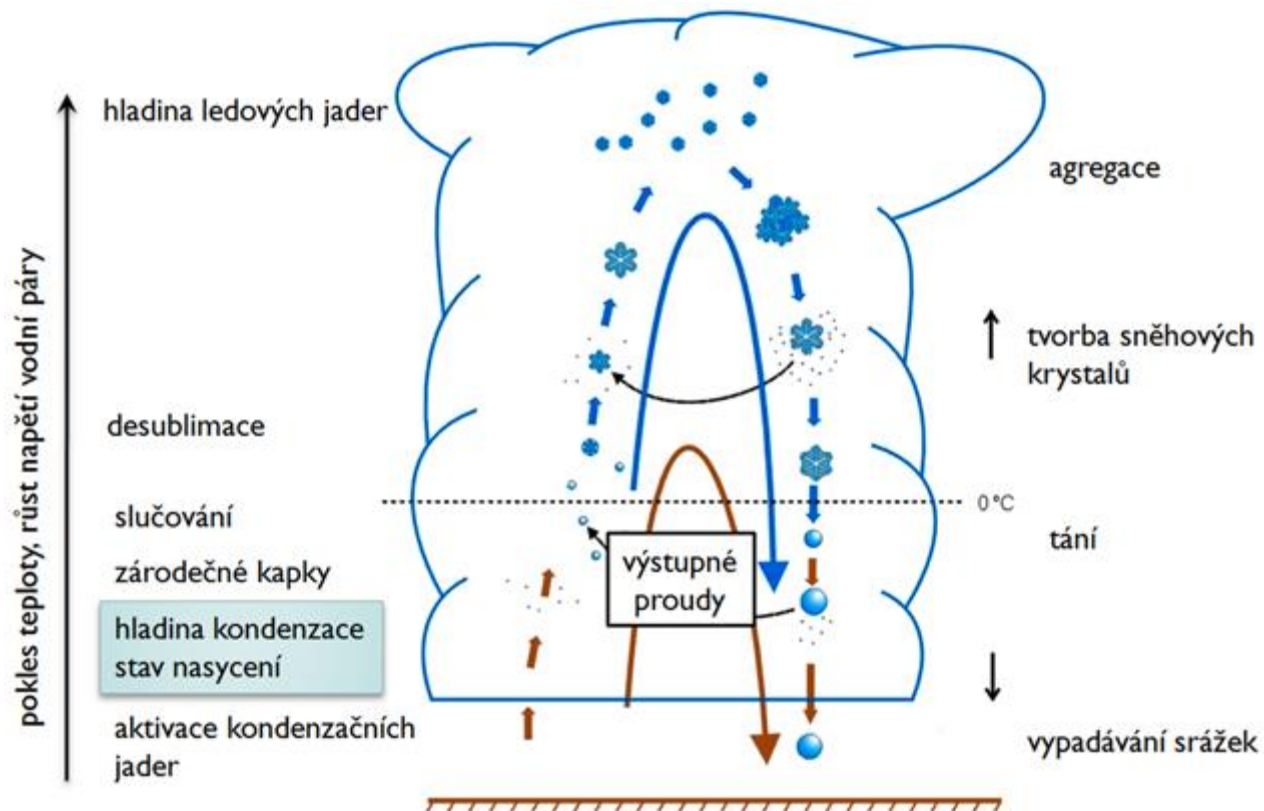
# Proces kondenzace

- Přechlazená voda (až  $-42\text{ °C}$ ) 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 ( $\mu\text{m}$ ) na úkor jiných kapiček zapříčiněný spouštěcím mechanismem
- Mírné a vyšší zeměpisné šířky (přítomnost ledových částic):
  - při  $T < 0\text{ }^\circ\text{C}$  zmrznutí části přechlazených kapiček s krystalizačním jádrem v ledové částičky (menší tlak nasycené vodní páry)
  - vypařování přechlazených kapiček x růst ledových částiček ukládáním molekul  $\text{H}_2\text{O}$  a srážkami s přechlazenými kapičkami
  - překonání vzestupných proudů, vypadávání ledových částiček z oblaku a jejich rozpuštění pod hladinou nulové izotermy ( $0\text{ }^\circ\text{C}$ )
  - ale: nedostatečná zásoba ledových částiček ve smíšených oblacích ( $T = -10$  až  $-20\text{ }^\circ\text{C}$ ) k vydatným srážkám, vliv sekundární produkce ledu (rozpad ledových částiček)

# Teorie vzniku srážek



# Teorie vzniku srážek

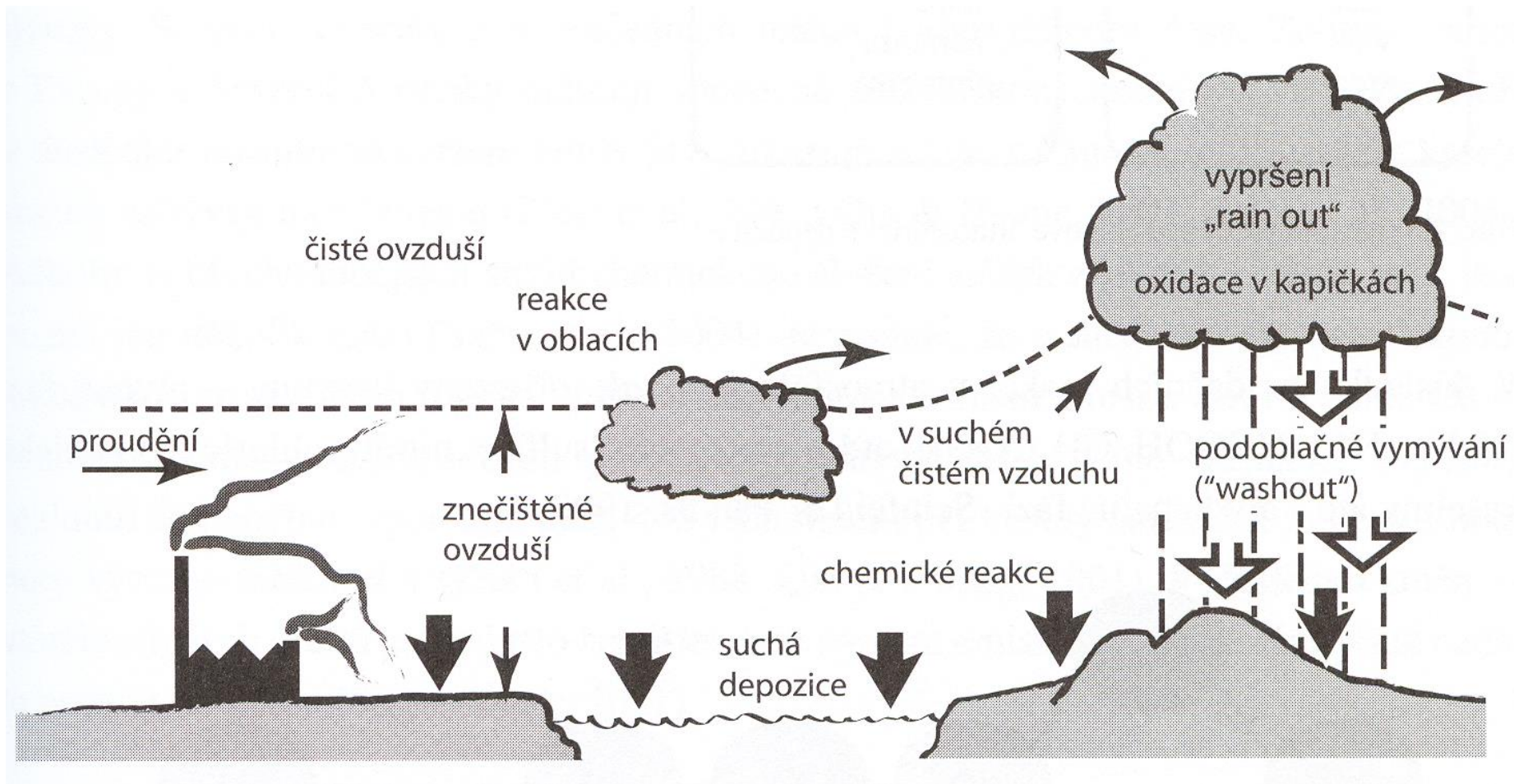
- Nízké zeměpisné šířky (koalescenční teorie):
  - převaha tropických lijáků z teplých oblaků (absence ledových částic)
  - vliv přítomnosti obřích kondenzačních jader (např. hygroskopické soli –  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ) a vzniku větších kapiček
  - koalescence: vzájemné splývání srážejících 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 ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  - hygroskopické mořské soli; K, Ca – kontinentální původ)
- Antropogenní znečištění:  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ 
  - 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.

# Literatura

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

---

Děkuji za pozornost