



# Prenosové médiá 09

doc. Ing. Ľuboš Ovseník, PhD.

([lubos.ovsenik@tuke.sk](mailto:lubos.ovsenik@tuke.sk); tel. 421 55 602 4336)

[https://data.kemt.fei.tuke.sk/PM\\_PS\\_Prenosove\\_media/](https://data.kemt.fei.tuke.sk/PM_PS_Prenosove_media/)

# BEZDRÔTOVÝ PRENOS (Wireless) 3

## (SPÔSOBY ŠÍRENIA ELEKTROMAGNETICKÝCH VÍŤN )

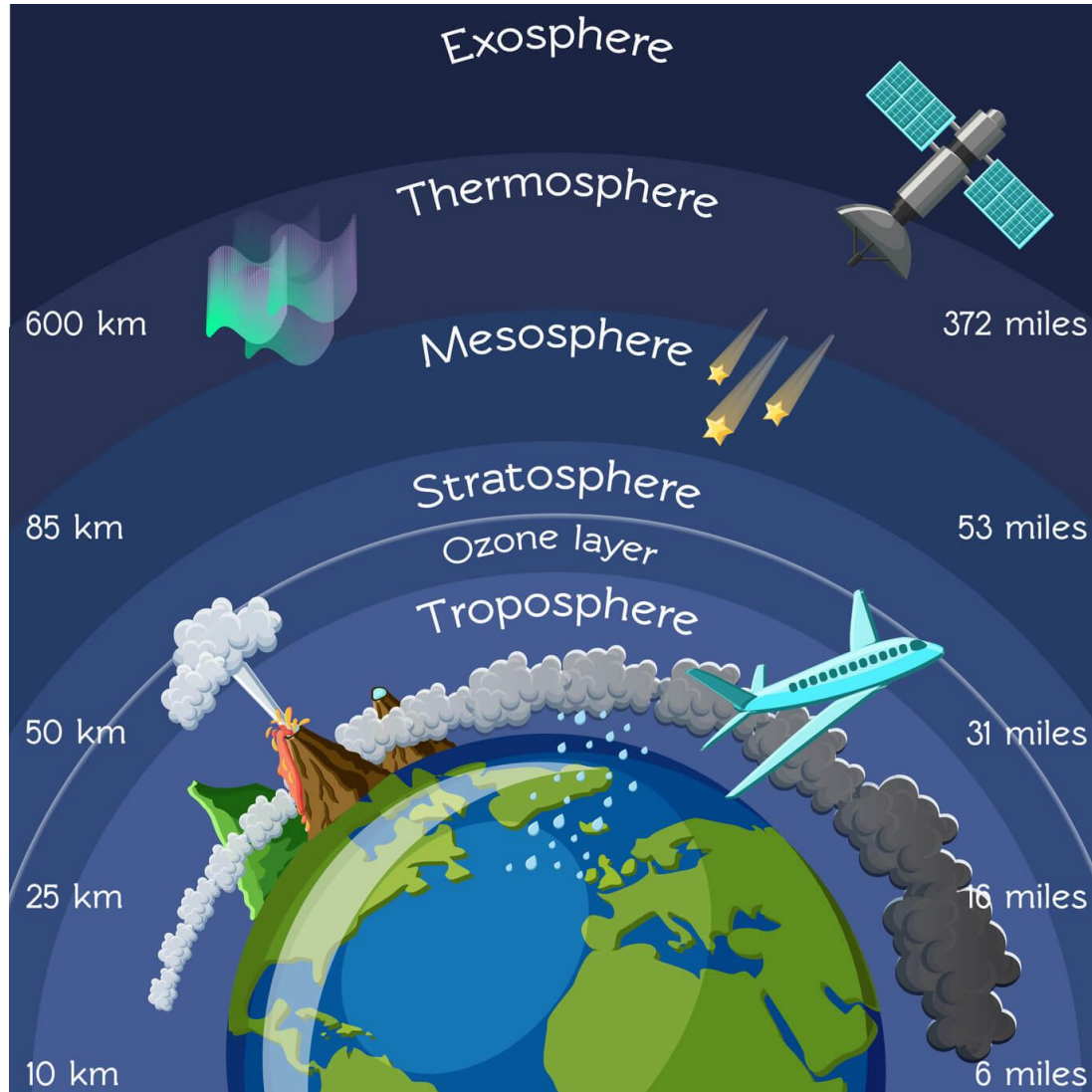
- Vertikálne členenie atmosféry
- Šírenie priestorových elektromagnetických vĺŤn
  - Elektrické vlastnosti zemského povrchu
  - Šírenie prízemných elm vĺŤn medzi anténami umiestnenými nad homogénnym rovinným zemským povrchom
  - Šírenie prízemných elm vĺŤn medzi anténami umiestnenými nad guľovým zemským povrchom
  - Šírenie povrchových elm vĺŤn medzi anténami umiestnenými nad homogénnym zemským povrchom
  - Šírenie povrchových elm vĺŤn medzi anténami umiestnenými nad nehomogénnym zemským povrchom
  - Vplyv nerovnosti zemského povrchu na šírenie priestorových elm vĺŤn
- Šírenie troposférických elektromagnetických vĺŤn
  - Rozptyl elektromagnetických vĺŤn v troposfére
  - Tlmenie elektromagnetických vĺŤn v troposfére
- Šírenie ionosférických elektromagnetických vĺŤn
  - Šírenie elektromagnetických vĺŤn v ionosfére s vrstevnatou štruktúrou

# Vertikálne členenie atmosféry

Zemská atmosféra sa rozdeľuje do horizontálnych vrstiev podľa rôznych hľadísk:

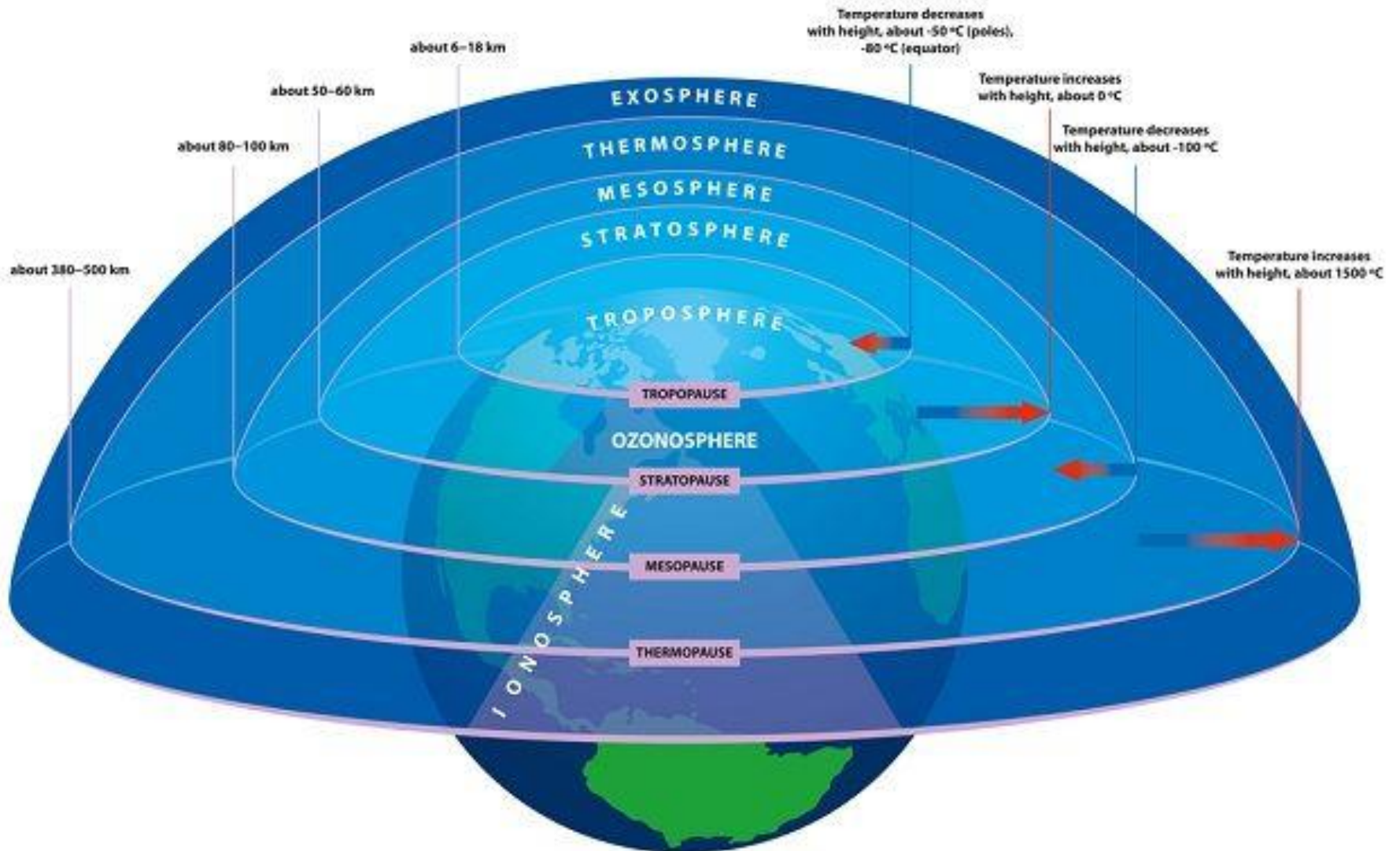
- podľa priebehu teploty vzduchu s nadmorskou výškou
  - Troposféra (0-20 km) je v polárnych oblastiach vplyvom zemskej rotácie sploštená
    - obsahuje prakticky všetku atmosférickú vodu a prebieha v nej väčšina poveternostných procesov a dejov – počasie
    - teplota s výškou klesá o približne  $0,65^{\circ}\text{C}/100\text{m}$
  - Stratosféra (20-50 km) - teplota sa s výškou okrem hornej časti, kde stúpa o  $0,3^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ , prakticky nemení
  - Mezosféra (50-85 km) sa vyznačuje silným poklesom teploty vzduchu s pribúdajúcou výškou – v hornej časti dosahuje teplota až  $-100^{\circ}\text{C}$
  - Termosféra (85-690 km) - teplota vplyvom pohlcovania slnečného žiarenia atómami a molekulami plynov dosahuje až stovky  $^{\circ}\text{C}$ 
    - vzhľadom k nepatrnej hustote vzduchu však túto teplotu nevieme merať bežnými metódami

- **Exosféra** (od 690 km) - vonkajšia vrstva atmosféry, z ktorej ľahké plyny unikajú do okolitého medziplanetárneho priestoru
  - prechod medzi exosférou a medziplanetárnym priestorom je veľmi plynulý, preto sa neurčuje vrchná hranica



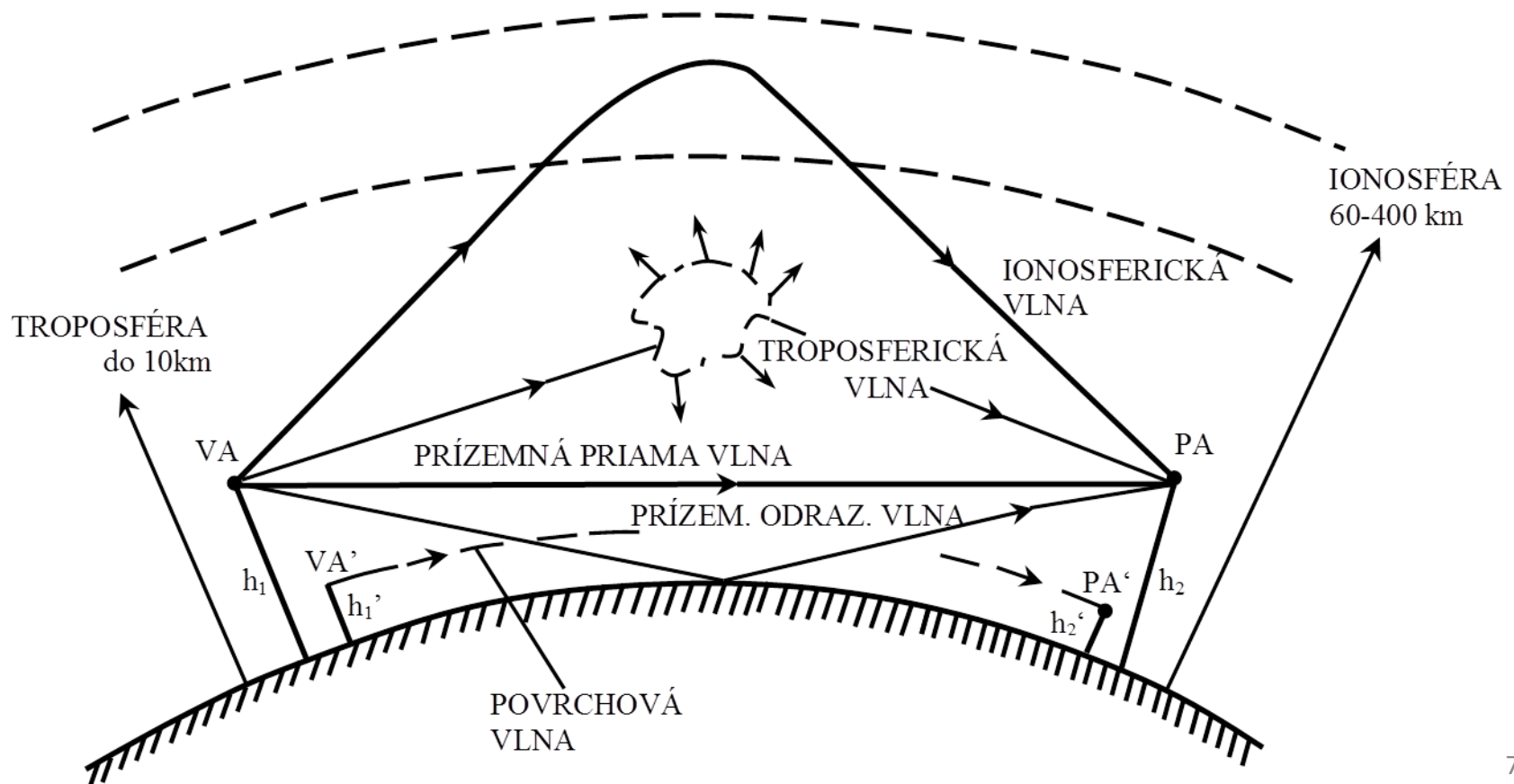
- **podľa chemického zloženia** vzduchu
  - **Homosféra** – vrstva atmosféry, v ktorej sa zloženie vzduchu v dôsledku jeho intenzívneho vertikálneho premiešavania s pribúdajúcou výškou prakticky nemení
  - **Heterosféra** – intenzita vertikálneho premiešavania vzduchu slabne a s pribúdajúcou výškou ubúda ťažších plynov
  
- **podľa koncentrácie** atmosférických iónov a voľných elektrónov
  - **Neutrosféra** (0-65km) je vrstva s minimálnym výskytom iónov a voľných elektrónov
  - **Ionosféra** je množstvo atmosférických vrstiev a veľkou koncentráciou iónov a voľných elektrónov, ktoré sa prejavujú odražaním niektorých frekvencií rádiových vln
  
- **podľa ovplyvnenia spodných vrstiev** atmosféry zemským povrchom
  - **Medzná vrstva atmosféry** (do výšky 0,1-2 km), tu je priebeh meteorologických prvkov ovplyvnený trením prúdiaceho vzduchu o zemský povrch
  - **Voľna atmosféra** – vplyv trenia o zemský povrch je zanedbateľný

# Obr. Delenie atmosféry



# Šírenie priestorových elektromagnetických vln

- šírenie priestorových (povrchových a prízemných) elm vln vo veľkej miere závisí od elektrických parametrov povrchových vrstiev Zeme



# Elektrické vlastnosti zemského povrchu

- **elektrické vlastnosti** jednotlivých zložiek pôdy, podložia a objektov na zemskom povrchu závisia od ich **štruktúry**, **teploty** a **vlhkosti**
- **povrchové vrstvy** Zeme majú **nehomogénnu štruktúru**
  - **hrúbka vrstvy**, ktorá ovplyvňuje šírenie elektromagnetických vln, **závisí od vlnovej dĺžky** elm vlnenia
  - čím je **vlnová dĺžka väčšia**, tým **hrubšia vrstva zeme** ovplyvňuje šírenie vlny
- **nerovnosti terénu** a jeho **pokrytie** (lúky, lesy, mestá a pod.) sa prejavujú **podobným spôsobom** ako elektrické vlastnosti pôdy
- **základné parametre pôdy**, vplývajúce na vlastnosti šírenia elm vln:
  - **elektrická vodivosť** „ $\sigma$ “
  - **permitivita** „ $\epsilon$ “
  - **permeabilita** „ $\mu$ “



Tab. Elektrické vlastnosti niektorých typov zemského povrchu

Typ povrchu	Relatívna permitivita $\epsilon_r$	Špecifická vodivosť $\sigma$ (S/m)
Vlhká pôda	10 až 30	$10^{-3}$ až $10^{-2}$
Suchá pôda	3 až 6	$10^{-4}$ až $10^{-3}$
Hory	-	$7 \cdot 10^{-4}$
Lesy	-	$10^{-3}$
Veľké mestá	-	$10^{-3}$
Morská voda	80	4
Sladká voda	80	$10^{-3}$

■ **elektrické vlastnosti pôdy** sú dané:

- **vlastnosťami** jednotlivých druhov vrchných vrstiev zemskej kôry a ich rozložením na povrchu
- **obsahom solí** v jednotlivých horninách
- **obsahom a úrovňou vody** v jednotlivých vrstvách

- pri rozboře šírenia na danej trase vždy uvažujeme lokálne vlastnosti pôdy - rozoznávame viac ako **1000 druhov hornín**, ktoré delíme na **tri hlavné skupiny**:

- **Magmatické (vyvreté)** - dostali sa do zemskej kôry vplyvom sopečnej činnosti

- stuhnúť magma – **žula, čadič**



- **Usadené (sedimentárne)** - vznikli z magmatických, pôsobením deštrukčných síl na pôvodnú horninu. V niektorých prípadoch vznikli tieto druhy pôsobením biologických procesov, najmä v morskej vode (tieto druhy sú veľmi pórovité)

- vrstvy bahna a piesku na morskom dne, ktoré sa stlačili a vytvorili pevné vrstvy – **pieskovec, vápenec**



- **Metamorfózne (premenené)** - vznikli vplyvom rôznych geologických javov (tlak, teplota) na magmatické alebo usadené druhy hornín, čím zmenili svoje pôvodné vlastnosti a nadobudli tvrdú kryštalickú štruktúru (vlastnosťami sú veľmi príbuzné magmatickým)

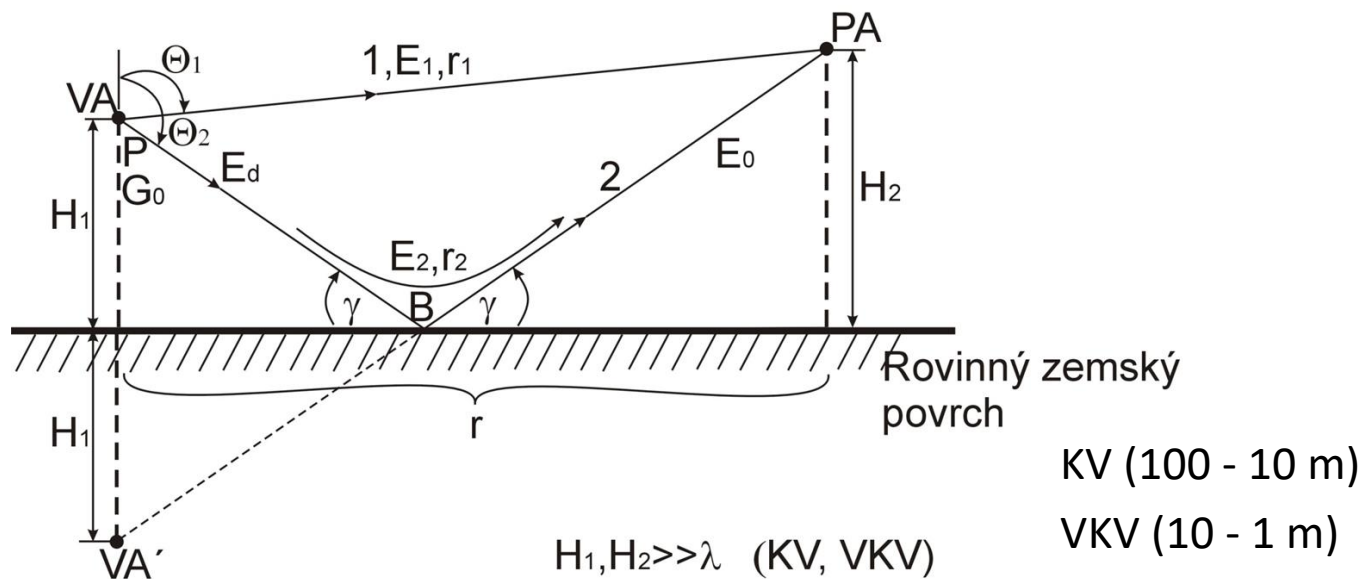
- mramor, bridlica



- **elektrické vlastnosti pôdy**
  - **roviny** majú typické vlastnosti **usadených** druhov hornín
    - na rovinách, kde je reliéf povrchu jednoduchý, **uplatnia sa predovšetkým elektrické vlastnosti pôdy**
  - **hory (nerovnosť, drsnosť)** majú vlastnosti **magmatických a metamorfózných** hornín
    - na miestach, kde prevládajú hory a kde je reliéf povrchu veľmi zložitý, má **podstatný vplyv** na šírenie a jeho vlastnosti **difrakcia** (lámanie) a elektrické vlastnosti pôdy sa uplatnia len veľmi mierne
  
- **stupeň nerovnosti** treba posudzovať vzhľadom na **vlnovú dĺžku** prenášanej elm vlny - povrch zemegule delíme na dve skupiny
  - **PRVÁ:** tu patria **povrchy s nepatrnými nerovnosťami**
    - príkladom povrchov prvej skupiny sú **vodné plochy, polia, lúky**
  - **DRUHÁ:** tu patria **povrchy s veľkými nerovnosťami**
    - príkladom povrchov druhej skupiny je **les a veľké mesto**
      - napr. vlny, šíriace sa nad lesom, sú predovšetkým tlmené tým, že elm vlna indukuje prúdy v kmeňoch a konároch stromov, ktoré môžeme uvažovať ako uzemnené antény z polovodivého materiálu

# Šírenie prízemných elm vln medzi anténami umiestnenými nad homogénnym rovinným zemským povrchom

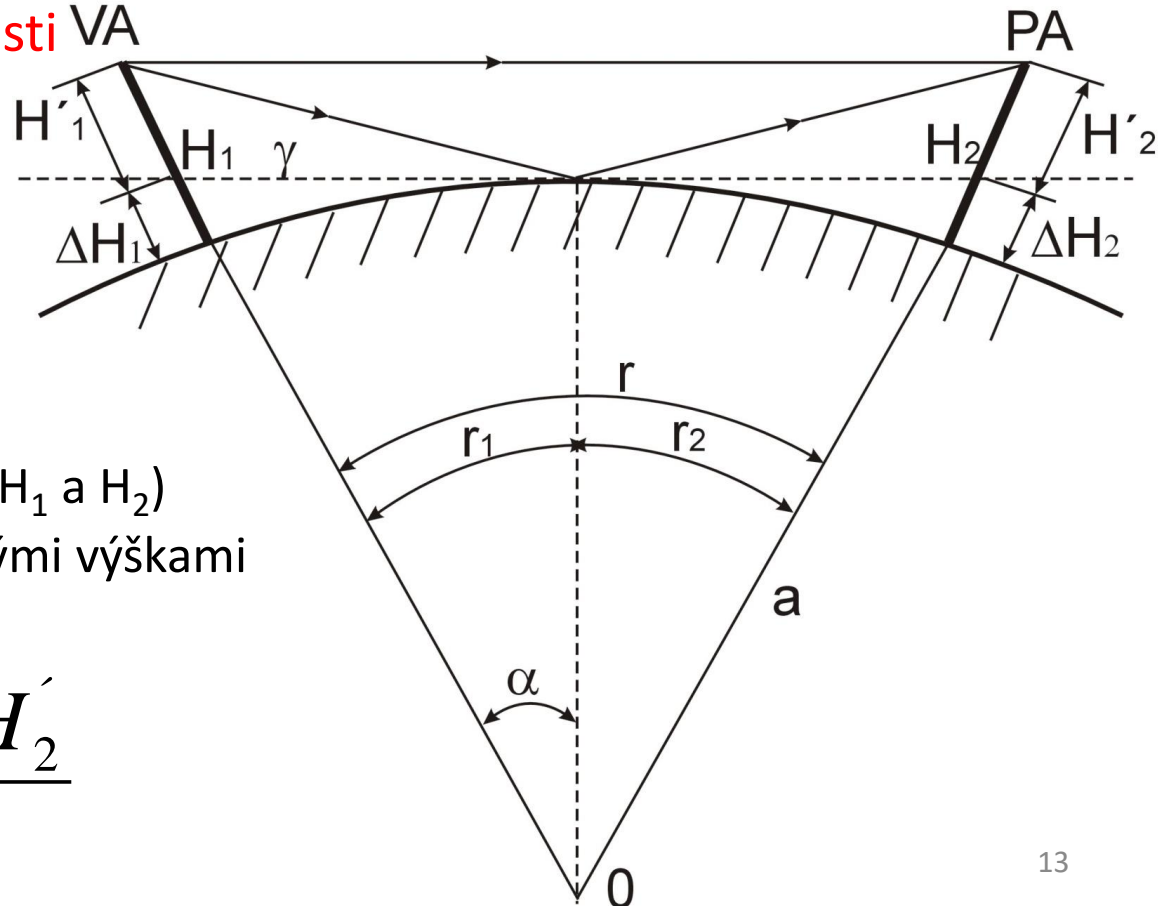
- elm pole pri tomto usporiadaní antén môžeme považovať **v mieste príjmu (PA) za súčet** (superpozíciu) prízemných vln, t.j. **priamej (1) a odrazenej (2) vlny**
  - rozdiel fáz týchto dvoch zložiek elm poľa závisí od výšok antén („VA“ a „PA“), resp. od rozdielu dráh ( $r_2 - r_1$ )



- tento typ šírenia **je podmienený priamou viditeľnosťou** medzi „VA“ a „PA“ (vysielačou a prijímacou anténou)

# Šírenie prízemných elm vln medzi anténami umiestnenými nad guľovým zemským povrchom

- v prípade antén umiestnených nad zemským povrchom je uváženie zakrivenia zemského povrchu jednoduché, **ak sa antény nachádzajú v oblasti priamej viditeľnosti**



- **intenzita el. poľa v mieste príjmu**
  - šírenie nad rovinným zemským povrchom
  - skutočné výšky antén ( $H_1$  a  $H_2$ ) nahradíme redukovanými výškami

$$|E| = \frac{3,94 \sqrt{PGH'_1 H'_2}}{\lambda r^2}$$

- **dĺžka oblasti priamej viditeľnosti** „ $R_0$ “ antén je („ $a$ “ je polomer Zeme  $\approx 6370$  km)

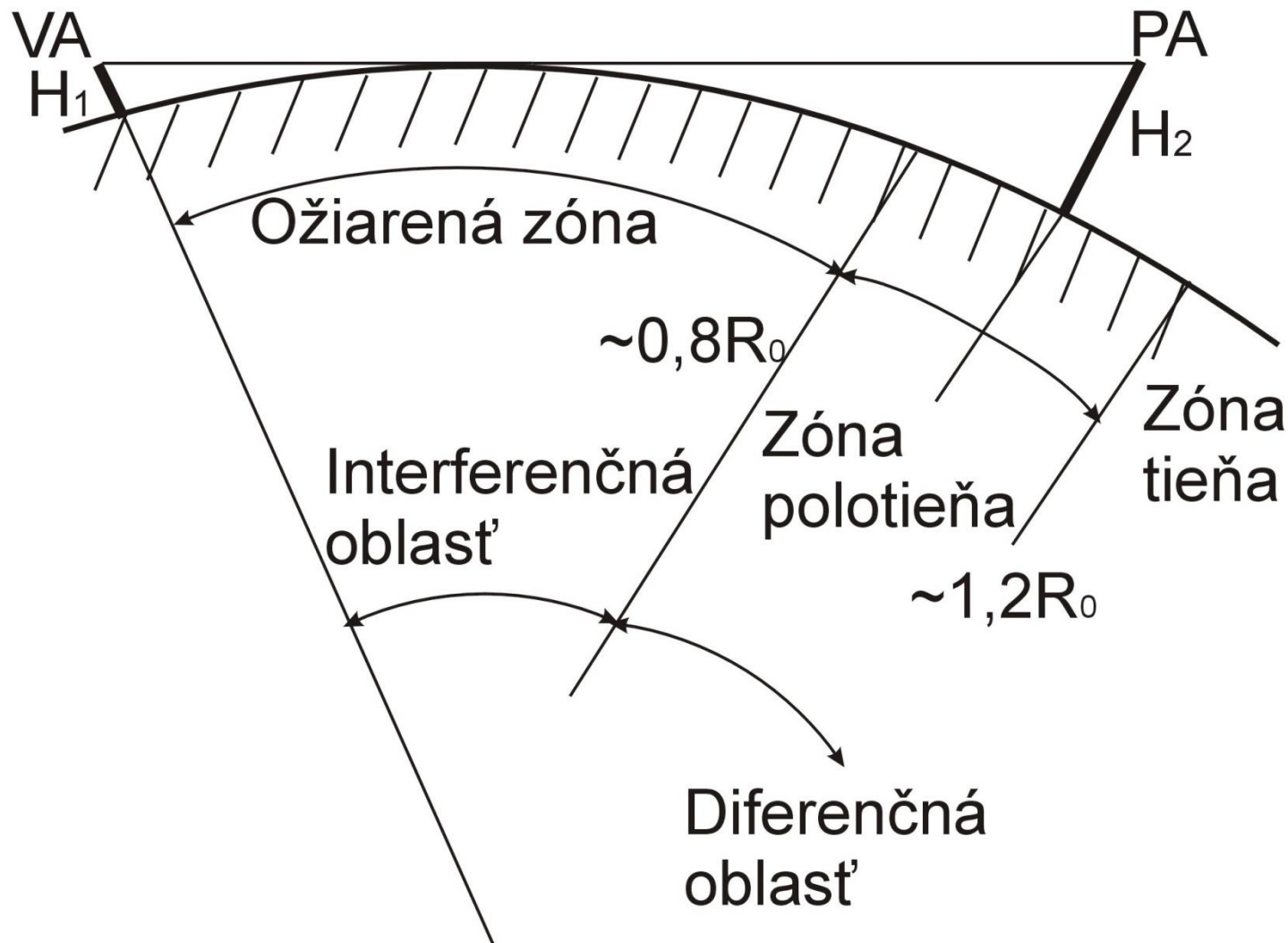
$$R_0 = \sqrt{2a} \left( \sqrt{H_1} + \sqrt{H_2} \right)$$

- keď **vzdialenosť** medzi anténami ( $r$ ) je rovná dĺžke oblasti priamej viditeľnosti ( $R_0$ ), **redukované výšky** ( $H'_1, H'_2$ ) **sú nulové**
  - podľa vzťahu (predchádzajúci slide) je (by malo byť) **nulové aj elm pole v mieste príjmu**
  - **toto je v rozpore so skutočnosťou**, pretože elm pole existuje nielen v oblasti priamej viditeľnosti, ale i ďaleko za jej hranicami
- teda v praxi možno tento vzťah použiť **len do vzdialenosti**

$$r \leq 0,7 \div 0,8 R_0$$

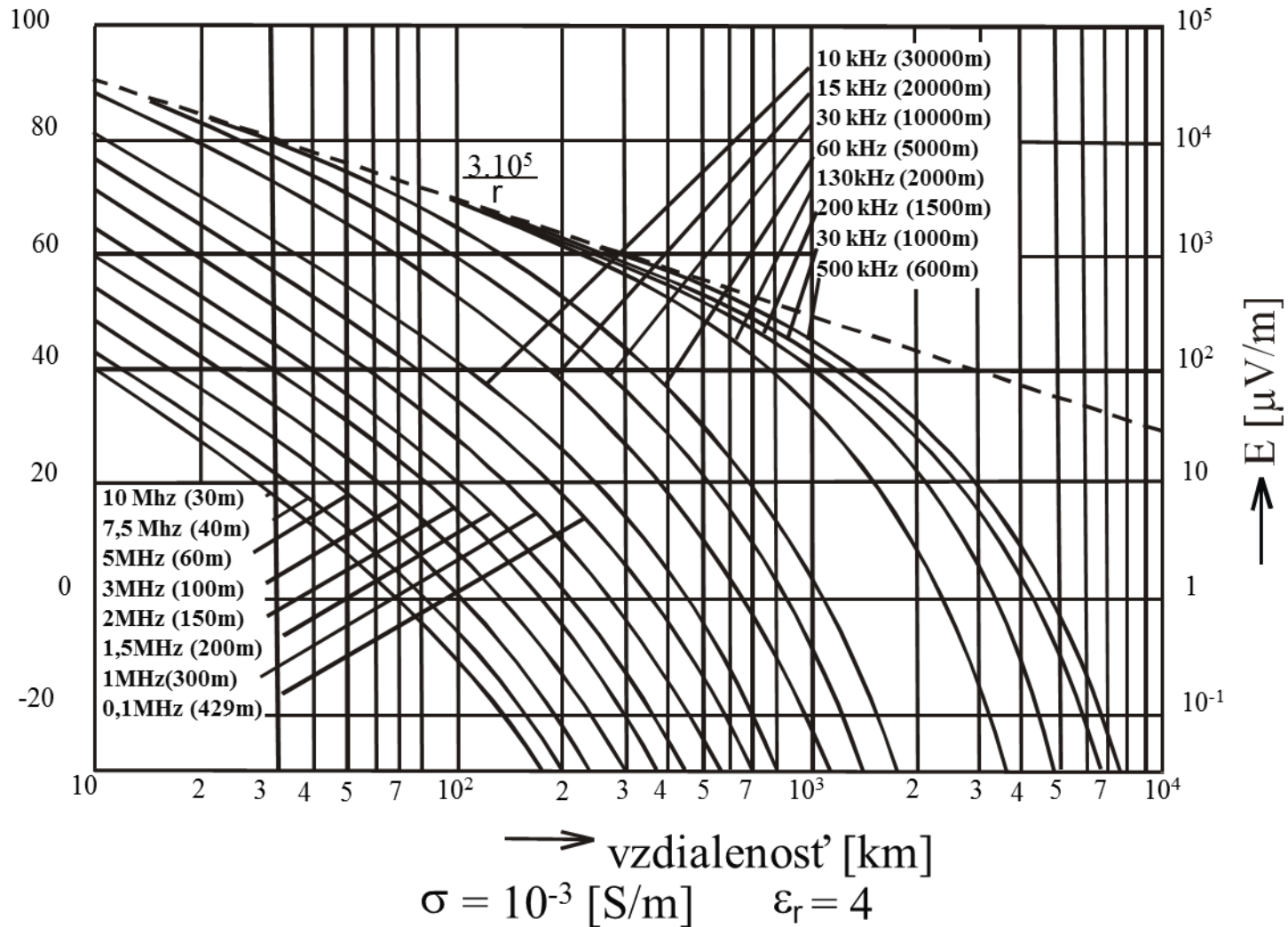
- túto oblasť nazývame **interferenčnou oblasťou** - v nej **môžeme** elm pole v mieste príjmu **považovať za superpozíciu** vlny priamej a vlny odrazenej
- pri zväčšovaní vzdialenosti medzi anténami prechádzame z oblasti interferenčnej do oblasti **difrakčnej (diferenčnej)** - v nej elm pole **nemožno považovať za superpozíciu** elm polí dvoch vĺn

Obr. Rozdelenie trasy šírenia vlny nad guľovým zemským povrchom na oblasti



Obr. Výpočet elm poľa v difrakčnej oblasti je komplikovaný - boli zhotovené krivky uľahčujúce technické výpočty

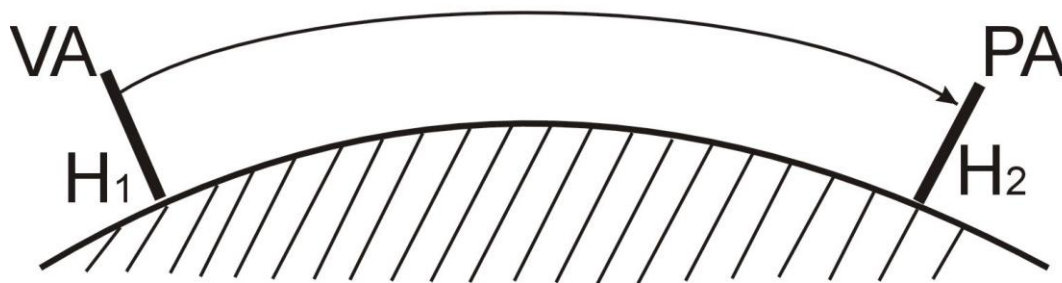
### Krivky šírenia povrchovej vlny





# Šírenie povrchových elm vln medzi anténami umiestnenými nad homogénnym zemským povrchom

- **povrchové elm vlny** sú priestorové vlny, ktoré sa šíria pozdĺž zemského povrchu (kopírujú zemský povrch) - **difrakcia**
  - tieto vlny vznikajú v prípade **antén umiestnených v malej výške** (v porovnaní s vlnovou dĺžkou) nad povrchom zeme



$$H_1, H_2 < \lambda \text{ ( DV, SV )}$$

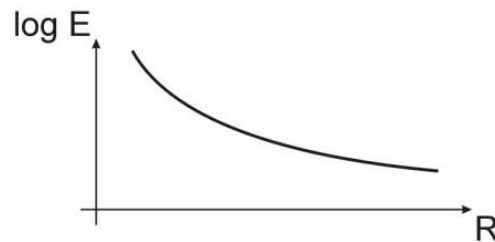
DV (10 000 - 1000 m)

SV (1000 - 100 m)

- tento typ šírenia **nie je podmienený priamou viditeľnosťou** medzi „VA“ a „PA“ (vysielacou a prijímacou anténou)

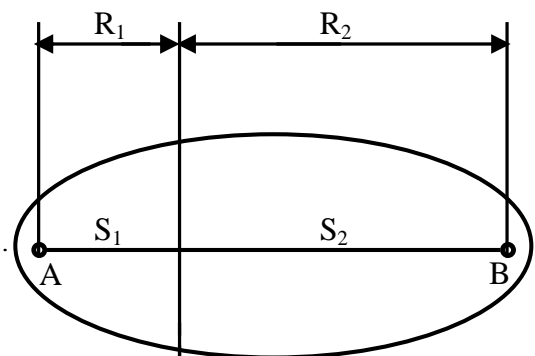
# Šírenie povrchových elm vln medzi anténami umiestnenými nad nehomogénnym zemským povrchom

- častejšie sa elm vlna medzi „VA“ a „PA“ šíri nad zemským povrchom, ktorý pozostáva z **niekoľkých častí s rôznymi el. parametrami**
- exaktné riešenie tejto úlohy je veľmi zložité a prakticky je možné ho uskutočniť len za určitých zjednodušujúcich predpokladov (napr.):
  - nech sa trasa medzi VA a PA skladá z dvoch homogénnych oblastí ( $S_1, S_2$ )
  - treba si však uvedomiť, že rozloženie elm poľa pozdĺž nehomogénnej trasy nie je rovnaké ako pozdĺž homogénnej trasy

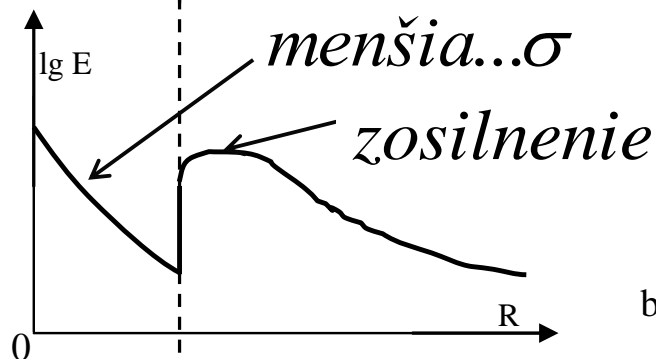


- pri prechode z oblasti s **menšou** el. vodivosťou do oblasti s väčšou el. vodivosťou nastáva skokové **zväčšenie intenzity** elektrického poľa
- pri prechode z oblasti s **väčšou** el. vodivosťou do oblasti s menšou el. vodivosťou nastáva skokové **zmenšenie** intenzity elektrického poľa

# Tab. Šírenie povrchových elm vln nad nehomogénnym zemským povrchom



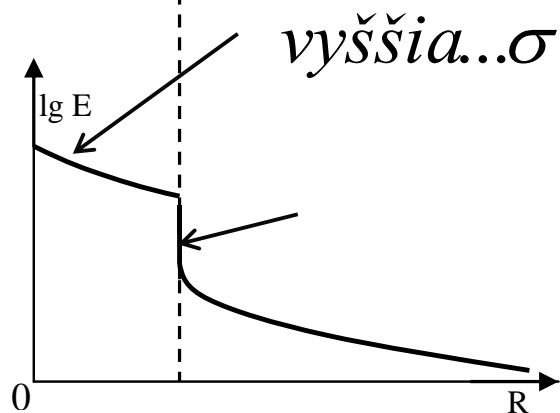
- a) trasa medzi VA a PA
- oblasť, v ktorej je VA, má dĺžku  $R_1$  a je charakterizovaná parametrom  $S_1$
  - oblasť, v ktorej je PA, má dĺžku  $R_2$  a je charakterizovaná parametrom  $S_2$



- b) rozloženie intenzity poľa pre

$$|S_1| > |S_2| \Rightarrow (\sigma_{S_1} < \sigma_{S_2})$$

- úsek trasy s parametrom  $S_1$  má **menšiu** el. vodivosť ako úsek s parametrom  $S_2$



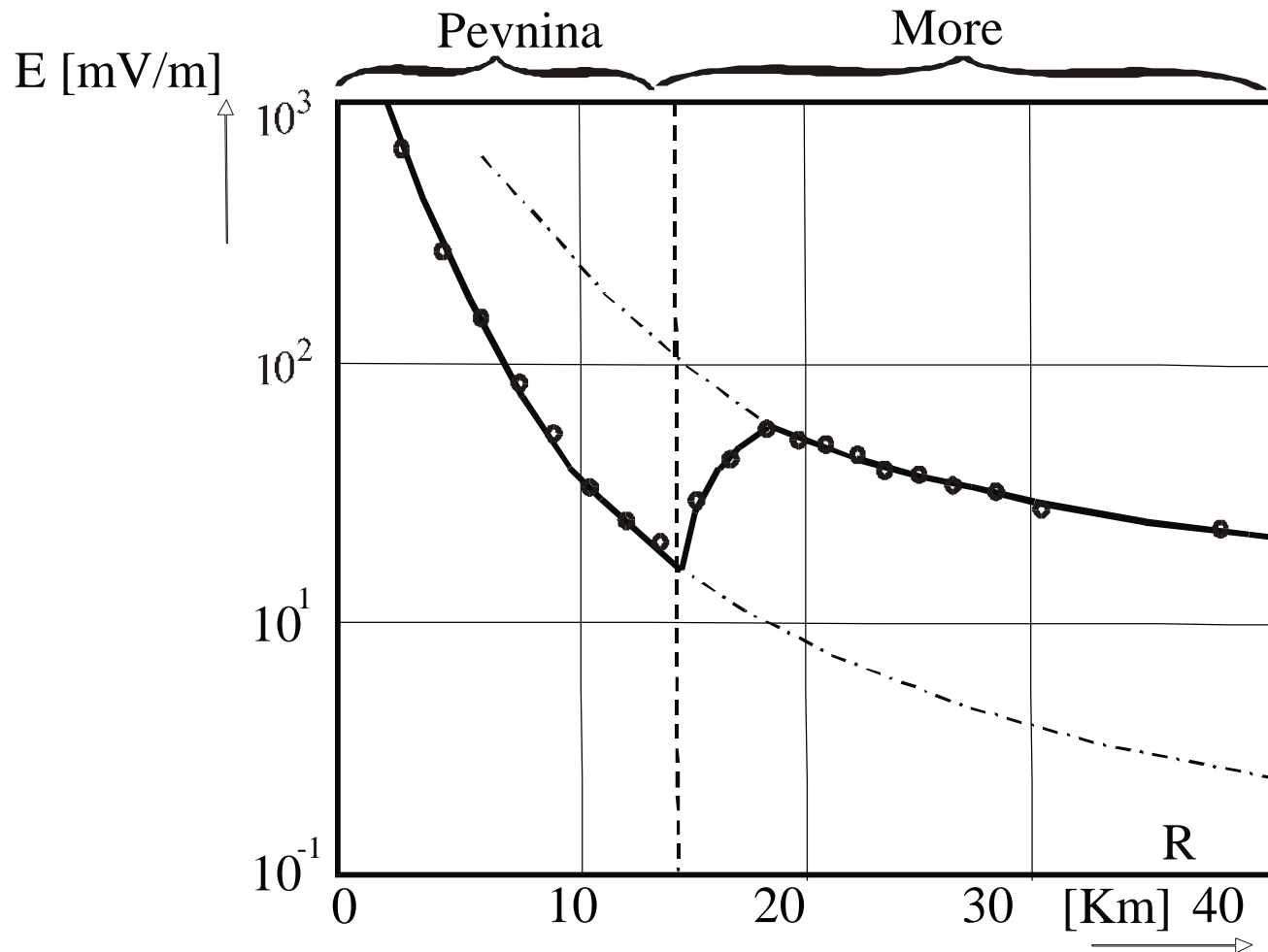
- pri prechode do druhej oblasti nastáva skokové zväčšenie intenzity elektrického poľa

- c) rozloženie intenzity poľa pre

$$|S_1| < |S_2| \Rightarrow (\sigma_{S_1} > \sigma_{S_2})$$

- c) úsek trasy s parametrom  $S_1$  má **väčšiu** el. vodivosť ako úsek s parametrom  $S_2$

- tieto javy boli potvrdené experimentálne
  - závislosti intenzity elektrického poľa od vzdialenosti pri prechode elm vlny s vlnovou dĺžkou  $\lambda = 249\text{m}$  cez rozhranie pevnina – more
  - výkon vysielacej antény  $P_v = 50\text{kW}$



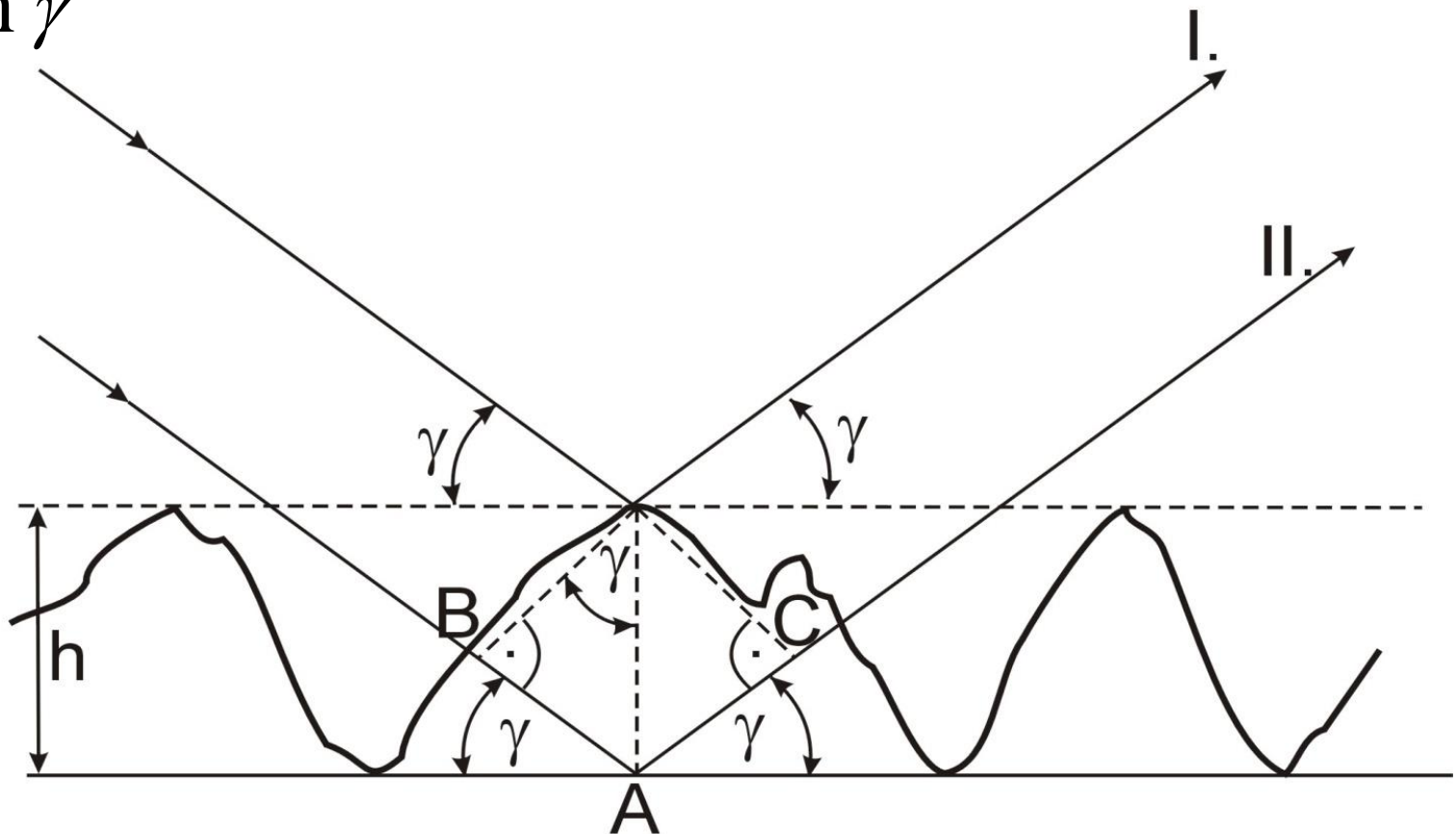
# Vplyv nerovnosti zemského povrchu na šírenie priestorových elektromagnetických vln

- vplyv nerovností na šírenie elm vln podstatným spôsobom závisí od pomeru vlnovej dĺžky a rozmerov nerovností
  - hornatá krajina s nerovnosťami veľkými rádovo  $10^2$  m predstavuje pre veľmi dlhé vlny hladký zemský povrch
  - rovinná lúka s 10 cm vysokou trávou predstavuje pre centimetrové vlny (mikrovlny) drsný povrch
- pre kvantitatívne ohodnotenie nerovností (drsnosti) zemského povrchu sa používa Rayleighovo kritérium
  - ak na drsný zemský povrch dopadá pod uhlom „ $\gamma$ “ rovinná elektromagnetická vlna
  - zaujíma nás, pri akej výške nerovností „ $h$ “ začína zanikať zrkadlový odraz a vzniká rozptyl (difúzny odraz)
  - maximálna výška nerovností, pri ktorej odrážajúci povrch môžeme ešte považovať za hladký, závisí od vlnovej dĺžky a uhla dopadu
  - merania ukazujú, že elektromagnetické vlny s vlnovou dĺžkou  $\lambda < 1$  m pri uhloch  $\gamma > 2 \div 3^\circ$  sa odrážajú od zemského povrchu zásadne difúznym spôsobom

## ■ Rayleighovo kritérium

- predstavuje približný odhad pre určenie vplyvu nerovností zemského povrchu na šírenie prízemných elektromagnetických vln

$$h < \frac{\lambda}{8 \sin \gamma}$$

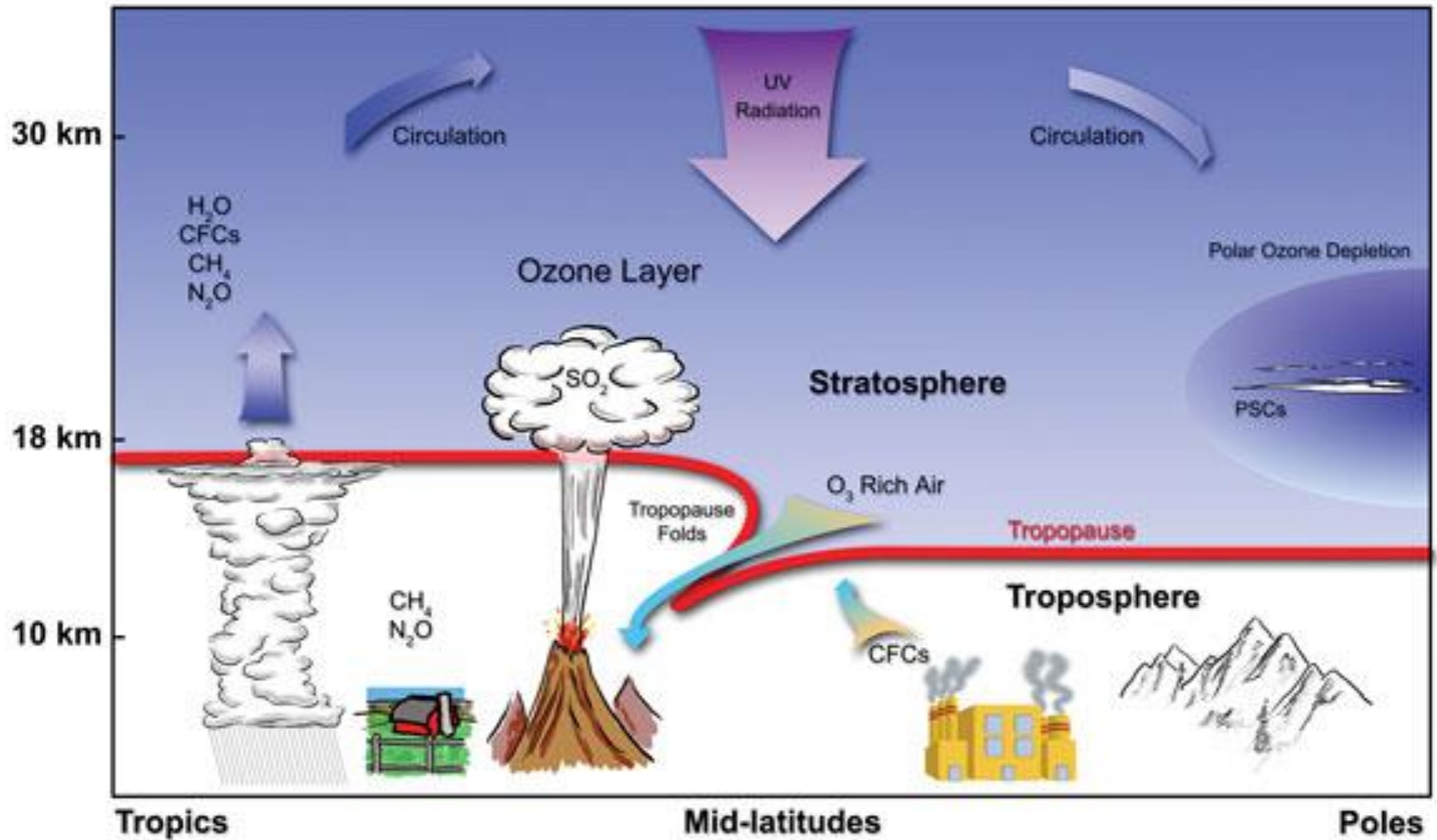


# Šírenie troposférických elektromagnetických vln

## VLASTNOSTI TROPOSFÉRY

- **troposférou** nazývame **dolnú vrstvu atmosféry**, ktorá leží priamo nad zemským povrchom a siaha do výšky
  - 8 až 10 km v oblastiach pólů Zeme
  - 10 až 12 km v stredných zemepisných šírkach
  - 16 až 18 km v oblasti rovníka
- **zloženie troposféry** (percentuálne zastúpenie jednotlivých plynov)
  - **nezávisí od výšky**
  - **výnimkou je obsah vodnej pary** - závisí od meteorologických podmienok a **zmenšuje sa so zväčšovaním výšky**
- **charakteristické javy** v troposfére
  - **pokles teploty so vzrastajúcou výškou** (vertikálny teplotný gradient má hodnotu  $0,65^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ )
  - v izotermickej troposfére **klesá tlak (p) s výškou**

# Obr. Troposféra





- **príčinou poklesu teploty** s výškou je priehľadnosť troposféry pre slnečné žiarenie
  - prakticky **všetka slnečná energia** prechádzajúca troposférou je **pohlcovaná** zemským povrchom
  - **zohriaty povrch Zeme spôsobuje ohrev troposféry**, pričom rozhodujúcu úlohu hrá **konvekcia (prúdenie) tepla**
  - vrstvy troposféry, ktoré sú v styku so zemským povrchom sa ohrievajú a vystupujú hore, ich miesto zaujímajú chladnejšie vrstvy, atď.
  - v dôsledku nerovnomerného rozloženia teploty na povrchu Zeme pritom **vznikajú prúdenia vzostupné a zostupné**, pričom vznikajú v troposfére víry
- v určitých prípadoch môžu v troposfére vznikáť oblasti, v ktorých **teplota vzduchu rastie so zväčšovaním výšky**
  - tento jav sa nazýva **teplotná inverzia**
  - inverzia môže vznikáť rôznym spôsobom , napr.
    - **premiestnením teplého vzduchu** teplejších oblastí nad zemský povrch
    - alebo **spônad pevniny nad chladnejšie more**
- **šírenie elm vln v troposfére** závisí od meteorologických podmienok
  - ich vplyv sa prejaví ako **lom, rozptyl** (difrakčný odraz) a **tlmenie** elm vln

# LOM TROPOSFÉRY

vznik lomu (refrakcie) je spojený s priestorovými zmenami elektrickej permitivity prostredia, v ktorom sa šíria elm vlny

- relatívny index lomu vzduchu sa **len málo líši od jednotky** - stredná hodnota pri povrchu Zeme je

$$n = \sqrt{\varepsilon_r} \approx 1,000325$$

- ukazuje sa však, že i **veľmi malé zmeny indexu lomu troposféry**, spojené so **zmenou výšky**, majú praktický význam
- v praxi sa častejšie používa tzv. **súčiniteľ lomu** „N“

$$N = 10^6 (n - 1)$$

- **súčiniteľ lomu** závisí od **teploty, tlaku** a **vlhkosti vzduchu**

$$\frac{dN}{dH} = 77,6 \left[ \frac{1}{T} \frac{dp}{dH} - \left( \frac{p}{T^2} + 9620 \frac{e}{T^3} \right) \frac{dT}{dH} + \frac{4810}{T^2} \frac{de}{dH} \right]$$

- so **zväčšovaním nadmorskej výšky (H)** **tlak (p)** **klesá** a **gradient tlaku (dp)** **len málo závisí** od meteorologických podmienok
- **gradient teploty (dT)** a **gradient vlhkosti (de)** sú však **citlivé na zmeny meteorologických podmienok** a môžu meniť i svoje znamienko (smer) – napr. pri inverzii

## Určenie polomeru krivosti lúča

- **súčiniteľ lomu štandardnej troposféry (závisí od nadmorskej výšky)**

$$N(H) = 289e^{-0,136H}$$

- **pretože súčiniteľ lomu závisí od výšky  $H$ , trajektórie lúčov elm vln v priblížení geometrickej optiky nie sú priamky**

- ak predpokladáme, že troposféra sa skladá z rovinných vrstiev s konštantnými „ $N$ “

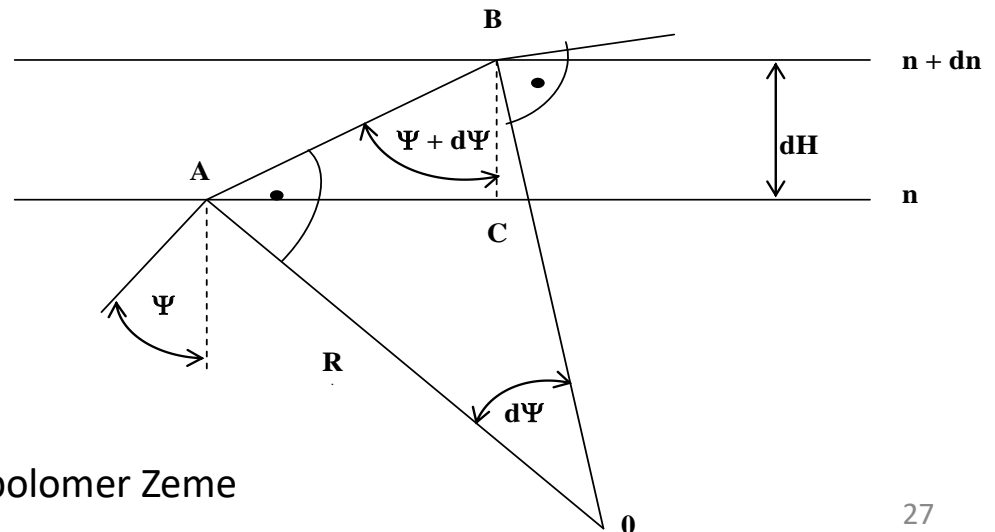
- uvažujme dve také vrstvy vzdialené „ $dH$ “
- index lomu dolnej vrstvy je „ $n$ “, hornej „ $n + dn$ “
- lúč dopadajúci na dolnú vrstvu pod uhlom „ $\Psi$ “ zmení na dráhe „ $dH$ “ svoj smer, takže na hornú dopadne pod uhlom „ $\Psi + d\Psi$ “
- polomer krivosti Zeme

$$R_K \approx -\frac{1}{\frac{dn}{dH}} = -\frac{10^6}{\frac{dN}{dH}}$$

- efektívny polomer krivosti

$$R_{ef} = \frac{R}{1 - R \frac{dN}{dH} 10^6}$$

$R$  - polomer Zeme



## Druhy troposférického lomu

- podľa gradientu ( $dn/dH$ ) rozlišujeme niekoľko (5) **základných druhov** troposférického lomu

- **Záporný lom** - nastáva pre gradient indexu lomu  $(dN/dH) > 0$  - lúč sa **odchyľuje** od povrchu Zeme, dochádza k **zmenšeniu priamej viditeľnosti** antén



$$R_{ef} < R; R_K < 0$$

- **Nulový lom** - nastáva pre  $(dN/dH) = 0$  - lúč sa **šíri po priamke**, **priama viditeľnosť** antén **sa nemení**



$$R_{ef} = R; R_K = \infty$$

- **Kladný lom** - nastáva pre  $(dN/dH) < 0$  - lúč sa **prichyľuje** k povrchu Zeme, **priama viditeľnosť** antén **sa zväčšuje**



$$R_{ef} > R; R_K > 0$$

- **Kritický lom** - nastáva pre  $(dN/dH) = -0,157$  - lúč kopíruje zakrivenie zemského povrchu



$$R_{ef} = \infty; R_K = 6,37 \cdot 10^6 \text{ m}$$

- **Superrefrakcia** - nastáva pre  $(dN/dH) < -0,157$  (príčinou jej vzniku je najčastejšie teplotná inverzia) - lúč sa vracia späť k zemskému povrchu a mnohonásobne sa od neho odráža - elm vlna sa šíri tzv. vlnovodovým kanálom



$$R_{ef} < 0; R_K = 6,37 \cdot 10^6 \text{ m}$$

- superrefrakcia umožňuje šírenie elm vln na veľké vzdialenosti (ďaleko za oblasť priamej viditeľnosti)
- praktické využitie tohto spôsobu šírenia je obmedzené pre jeho zriedkavý výskyt - môže však byť príčinou rôznych rušení diaľkovým príjmom

# Rozptyl elektromagnetických vln v troposfére

- praktické skúsenosti ukazujú, že v **troposfére existujú chaotické turbulentné prúdenia** vzduchu
  - tieto prúdenia majú vplyv na lokálny súčiniteľ lomu ( $N$ ), takže závislosť **súčiniteľa tlmenia** od výšky (tzv. profil súčiniteľa tlmenia) **vykazuje fluktuácie** (pohyb, vlnenie, kolísanie)
  - tieto **fluktuácie sú príčinou rozptylu elm vln** šíriacich sa v troposfére, ktorý umožňuje **diaľkové spojenie pomocou** veľmi krátkych vln (**VKV**)
- **delenie fluktuácií:**
  - **rýchle** (trvajúce minúty, sekundy a zlomky sekúnd)
  - **pomalé** (hodinové až mesačné)
    - **príčinou** pomalých fluktuácií intenzity elektrického poľa sú **regulárne** (napr. sezónne) a **náhodné zmeny** meteorologických podmienok

# Tlmenie elektromagnetických vln v troposfére

- doteraz bol skúmaný **vplyv troposféry na šírenie elm vln** s uvážením jej **nehomogénosti**
  - tento **vplyv sa prejavoval** **zakrivením trajektórie** (lúča) a **rozptylom**
    - pritom sme predpokladali, že **troposféra je priezračná** pre elm vlny - má nulové tlmenie
  - bohatý experimentálny materiál získaný pri využití rádiových spojov v širokom frekvenčnom rozsahu ukazuje, že **tento predpoklad je oprávnený** pre všetky meteorologické podmienky **len pre elm vlny s vlnovou dĺžkou**

$$\lambda > 10cm$$

- kratšie elm vlny (**mikrovlny**) sa v troposfére **širia s tlmením**, ktoré pri niektorých meteorologických podmienkach môže byť také veľké, že bráni nadviazaniu rádiového spojenia
- **druhy tlmenia** v troposfére:
  - tlmenie spôsobené **atmosferickými zrážkami** (dážď, hmla, sneh)
  - **molekulárna absorbcia**
  - **rozptyl na časticiach** – pre pásmo svetla
  - tlmenie na **pevných častočkách** (prach, dym a pod.) – pre pásmo svetla

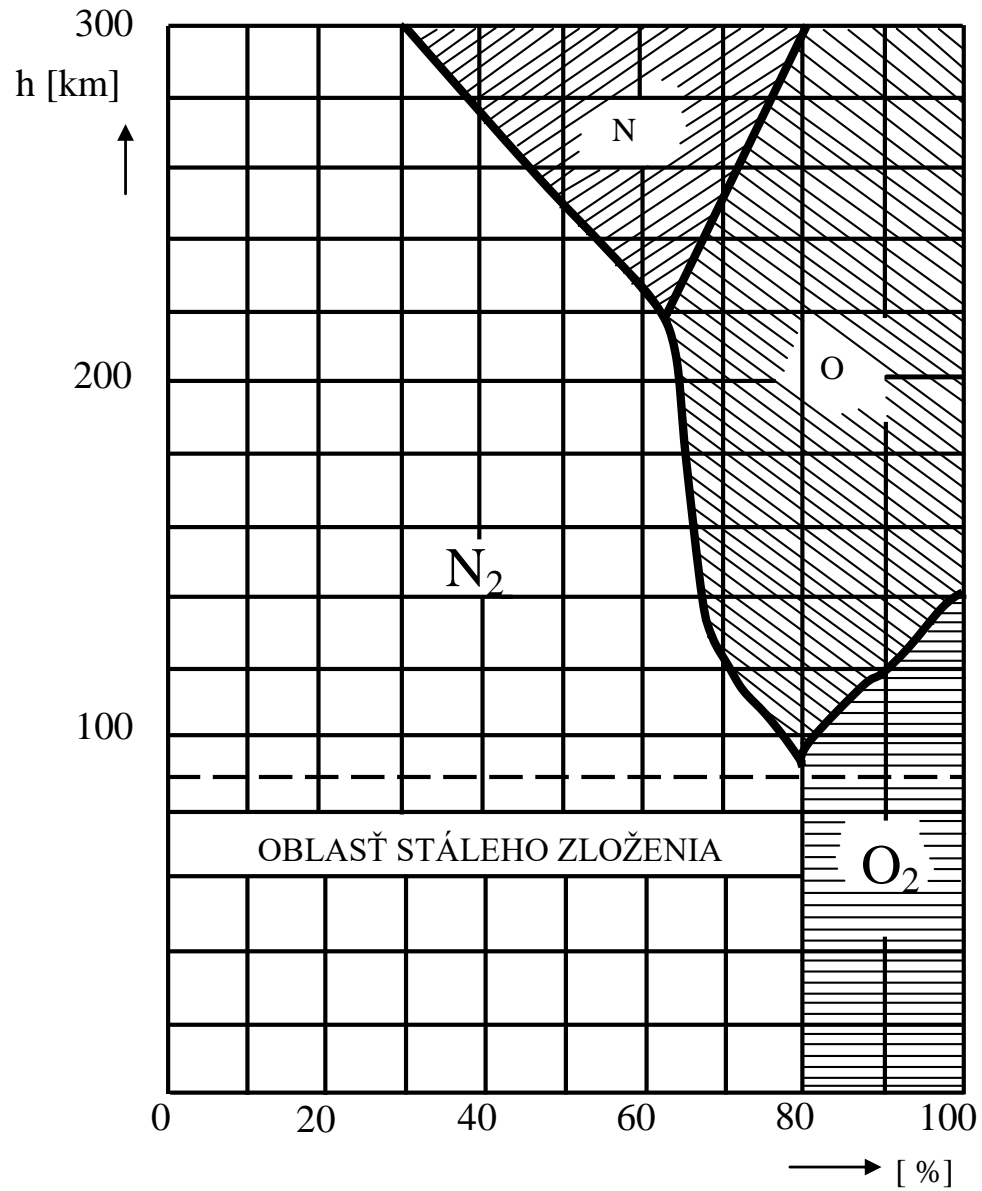
# Šírenie ionosférických elektromagnetických vln

## VLASTNOSTI IONOSFÉRY

- ionosférou nazývame ionizovanú časť atmosféry, ktorá sa nachádza vo výškach nad 60 km
- výsledky merania ukazujú, že do výšky asi 90 km má atmosféra rovnaké zloženie ako pri povrchu Zeme
- vo veľkých výškach rozdiely v molekulovej hmotnosti jednotlivých plynov spôsobujú rozvrstvenie atmosféry
  - ťažšie plyny sa sústreďujú v nižších výškach
  - v zriedenej atmosfére dochádza vplyvom slnečného žiarenia k disociácii (rozklad na ióny, t.j. na kladnú a zápornú zložku) molekúl kyslíka a dusíka
  - molekuly týchto plynov pohlcujú kvantá energie a rozštiepia sa na atómy
    - disociácia kyslíka ( $O_2$ ) začína od výšky asi 90 km
    - disociácia dusíka ( $N_2$ ) od výšky nad 220 km



# Obr. Zloženie atmosféry



- **ionizáciou plynu** rozumieme **odstránenie** jedného alebo viacerých elektrónov z atómov plynu
  - na **odstránenie** jedného elektrónu z atómového obalu **je potrebné vykonať** tzv. **ionizačnú prácu** „ $W$ “

- v prípade, že **príčinou ionizácie** je interakcia (vzájomné pôsobenie) s časticami (napr. **fotónmi**) s **energiou kvanta** ( $E_f = h \cdot f$ ), potom ionizácia môže nastať, ak je splnená podmienka

$$hf > W$$

- kde „ $h$ “ je Planckova konštanta ( $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{Js}$ ) a „ $f$ “ je frekvencia

#### Ionizačné práce pre základné plyny v atmosfére ( $1\text{eV} = 1,602 \cdot 10^{-19}\text{J}$ )

Plyn	Vlnová dĺžka ionizujúcej vlny [nm]	Ionizačná práca [eV]
O <sub>2</sub>	102,6	12,2
O	91	13,6
N	79,5	15,5
N <sub>2</sub>	85	14,5

- z tabuľky vyplýva, že **ionizáciu atomárneho kyslíka** „O“ **môže spôsobiť** len **ultrafialové žiarenie**

## ■ zdroje ionizácie:

### ■ slnko

- **fotosféra** s teplotou asi 6000 K vyžaruje elm vlny s veľmi širokým spektrom frekvencií
- **chromosféra** a **koróna** s teplotou rádovo  $2 \cdot 10^6$  K sú zdrojmi UV žiarenia ( $\lambda \approx 2$  až 30nm) a mäkkého röntgenového žiarenia ( $\lambda = 0,8$  až 2 nm)
- okrem toho vyžaruje elektróny a iné častice, ktoré tvoria korpuskulárne žiarenie

### ■ vyžarovanie hviezd, kozmické žiarenie, kozmický prach a meteority

## ■ súčasne so vznikom elektrónov a iónov prebieha v atmosfére i opačný proces – **rekombinácia** (pohlcovanie, t.j. znovuspojenie do neutrálnych atómov), pri ktorej sa vyžaruje energia, rovná ionizačnej práci

### ■ preto medzi ionizáciou a rekombináciou existuje **dynamická rovnováha**

## ■ pretože hlavným ionizačným činiteľom je Slnko, **hustota elektrónov sa mení s dennou dobou**

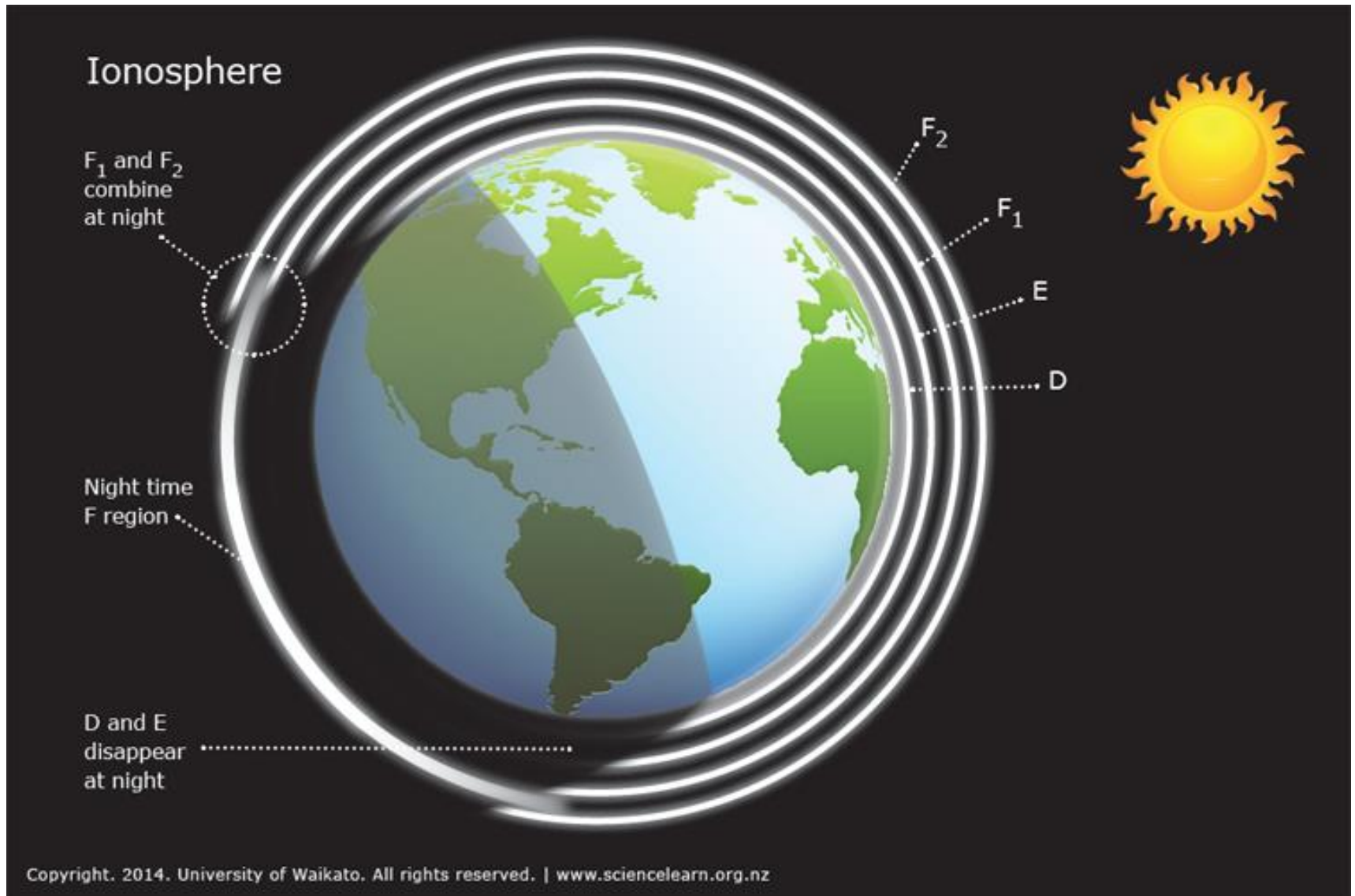
### ■ **najväčšia** je ráno a dopoludnia

### ■ **popoludní** začína postupne prevládať rekombinácia

### ■ ionizácia však **nie je nulová ani v noci**, pretože najvyššie vrstvy atmosféry zostávajú trvalo ionizované

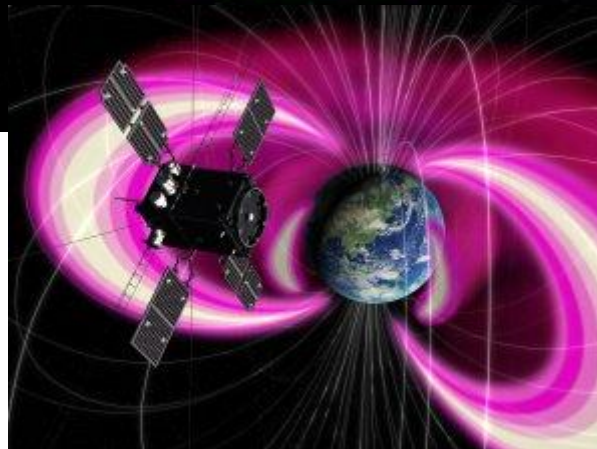
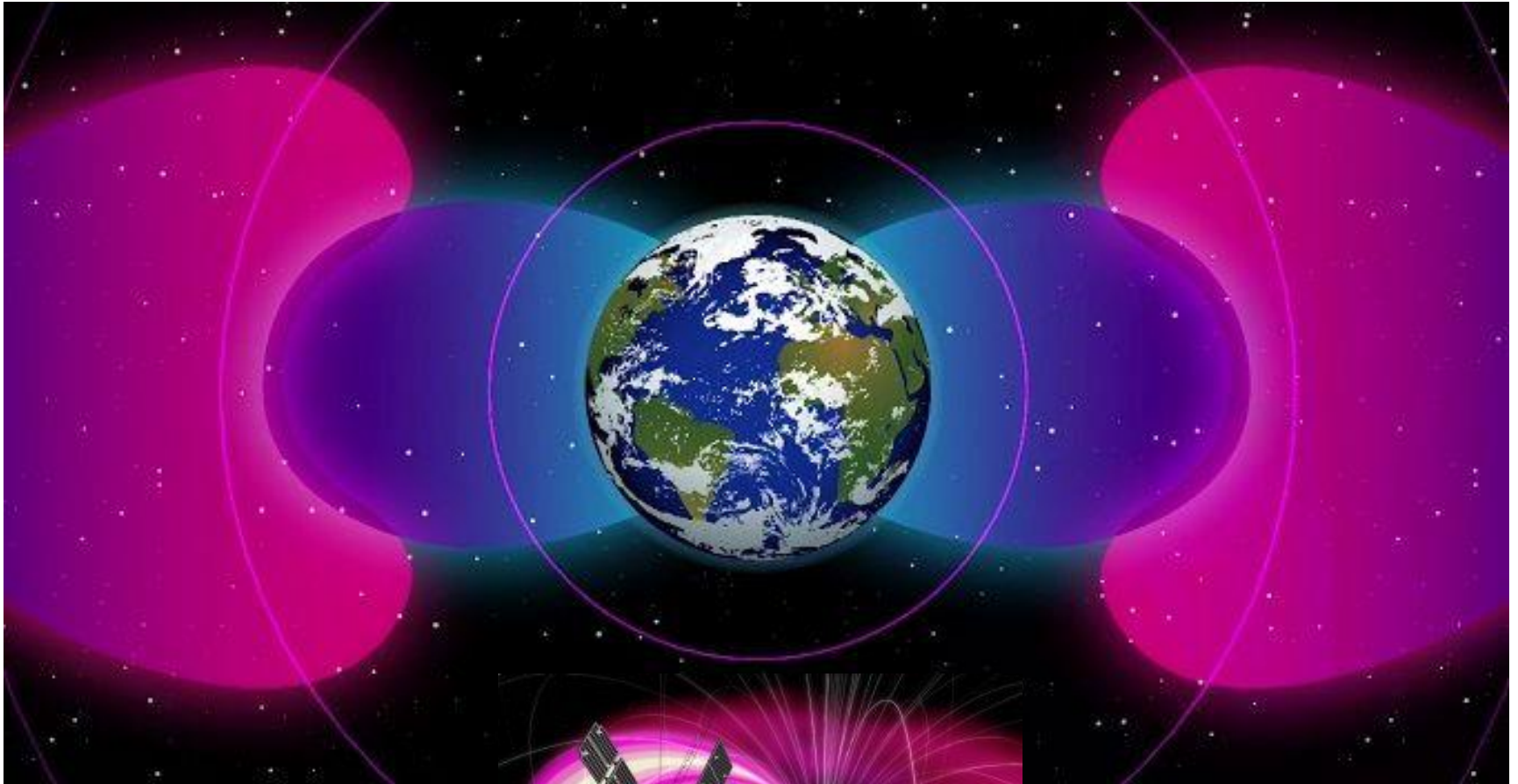
### ■ okrem **denných zmien** pozorujeme i **sezónne a dlhodobé zmeny**, ktoré sú spojené so zmenami slnečnej aktivity

# Obr. Ionosféra



- v dôsledku rôznych ionizačných mechanizmov a nehomogenity atmosféry je aj **rozloženie hustoty elektrónov** v ionosfére **nerovnomerné** - **vyznačuje sa vrstevnatou štruktúrou**
- na základe výsledkov experimentov sa ustálilo rozdelenie ionosféry na **štyri vrstvy**
  - **D** - od 60 do 90km
  - **E** - od 100 do 120km
  - **F<sub>1</sub>** - od 180 do 240km (vzniká iba v letnom období)
  - **F<sub>2</sub>** - od 230 do 400km
- v **noci zanikajú vrstvy** D a F<sub>1</sub>, zostávajú iba vrstvy E a F<sub>2</sub>, pričom hustota iónov v nich výrazne klesá
- okrem uvedených vrstiev sa niekedy objaví silne ionizovaná vrstva E<sub>s</sub> (**sporadická vrstva**)
  - táto vrstva môže vzniknúť v ľubovoľnom čase a ročnom období
  - v **stredných zemepisných šírkach** sa však najčastejšie vyskytuje **cez deň v letnom období**
- okrajové (najvyššie) vrstvy ionosféry tvoria tzv. **Van Allenove** oblasti
  - obklopujú zemeguľu a tvoria ich **vysokoenergetické častice**

# Obr. Van Allenove radiačné pásy



# Šírenie elektromagnetických vln v ionosfére s vrstevnatou štruktúrou

- **koncentrácia elektrónov v ionosfére je funkciou výšky** - veličiny  $\sigma$  (el. vodivosť) a  $\epsilon$  ( permitivita) závisia od polohy
  - ionosféra je preto **nehomogénnym prostredím s vrstevnatou štruktúrou**, tak ako aj troposféra
- na **rozdiel** od troposféry, kde sa **elektrická permitivita mení v malom rozsahu** a je **blízka jednotke**, **permitivita ionosféry** môže v závislosti od frekvencie **nadobúdať hodnoty menšie ako 1**
  - vo všeobecnosti môže nadobúdať hodnoty **blízke alebo rovné nule**
- **index lomu ionosféry závisí od výšky** 
$$n = \sqrt{\epsilon_{ri}} = \sqrt{1 - \frac{80,8N(H)}{f^2}}$$
- **šírenie elm vlny v ionosfére** sa v tomto prípade kvalitatívne **nelíši od šírenia vlny v troposfére**
  - ak **zmenšíme frekvenciu signálu ( $f$ )**, potom sa aj **hodnota indexu lomu zmenší**

- pri frekvencii  $f$  rovnej plazmovej frekvencii  $f_0$  ( $f = f_0$ )
  - homogénna plazma - ionizovaný plyn

$$f = f_0(H) = \sqrt{80,8N(H)}$$

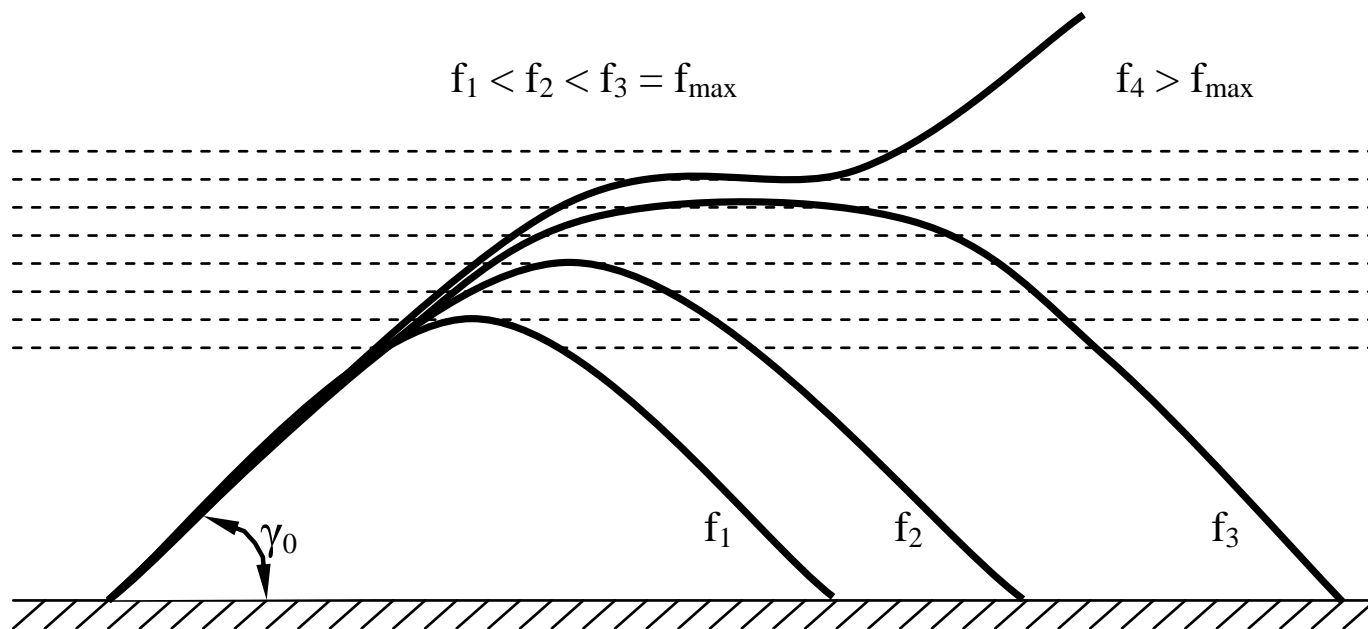
- elektrická permitivita „ $\epsilon_r$ “ a index lomu „ $n$ “ nadobúda nulovú hodnotu - elm vlna sa nemôže takýmto prostredím šíriť
  - zo zákona zachovania energie vyplýva, že takáto elm vlna sa odrazí podobne ako od povrchu vodiča
- ak zväčšujeme frekvenciu signálu, odraz elm vlny vzniká v dôsledku výškovej závislosti  $N(H)$  v čoraz väčšej výške, pokiaľ nedosiahneme výšku, pri ktorej  $N(H) = N_{\max}$
- maximálna frekvencia, pri ktorej sa vertikálne vyžiarená elm vlna odráža od ionosféry, sa nazýva kritickou frekvenciou

$$f_{kr} = \sqrt{80,8N_{\max}}$$

- pri frekvenciách  $f > f_{kr}$  sa elm vlna od ionosféry neodráža; ionosféra sa stáva priehľadnou

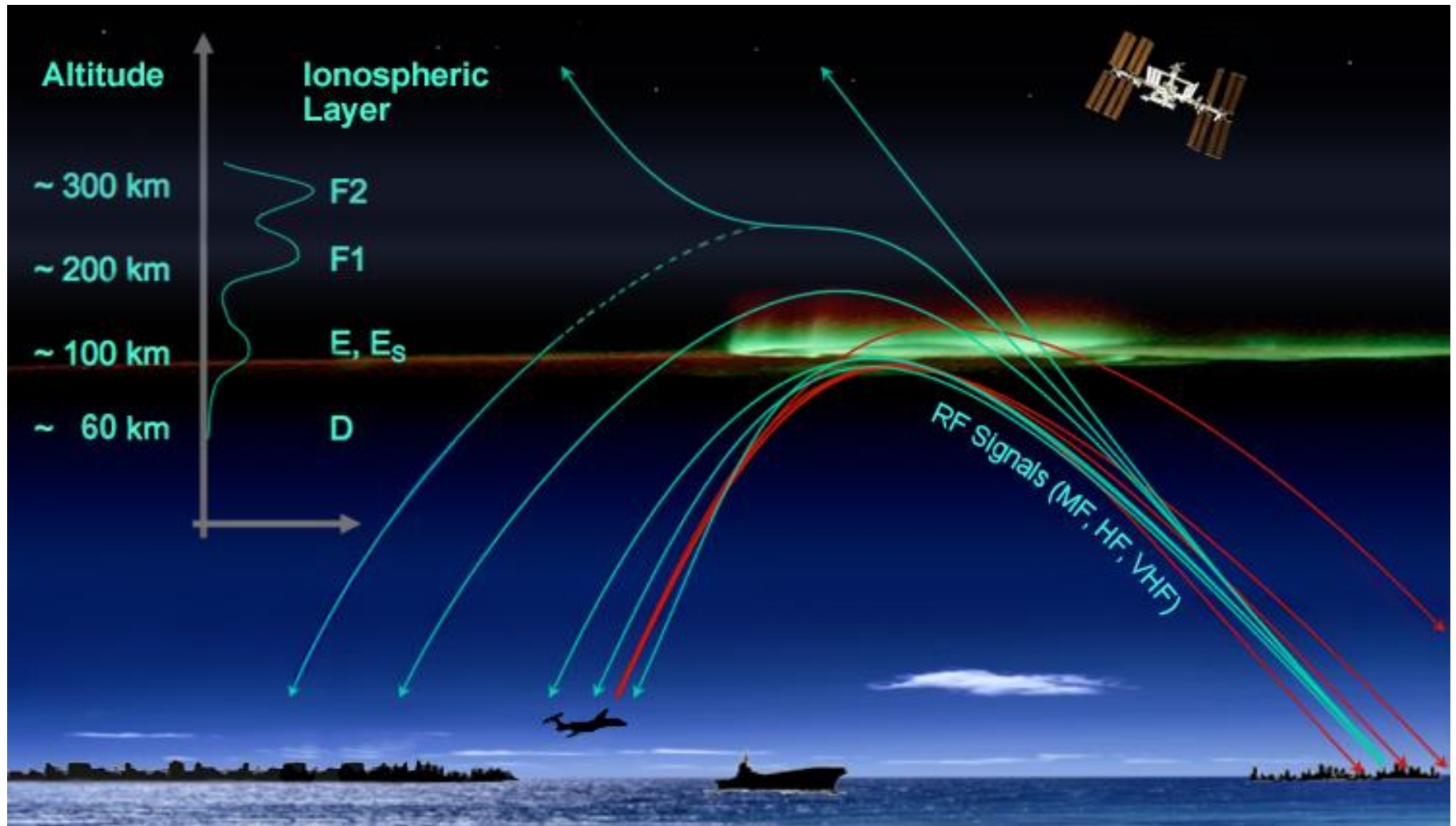


- so **zväčšovaním frekvencie** sa **polomer krivosti trajektórie  $R_K$  zväčšuje**
- keď sa **frekvencia signálu blíži ku  $f_{max}$** , **polomer krivosti sa zväčšuje** tak, že **odrazená vlna dopadá na povrch Zeme vo veľkej vzdialenosti** od vysielača
- pri **veľkej frekvencii ( $f_4 > f_{max}$ )** vlna vstupuje do **oblasti klesajúceho gradientu koncentrácie elektrónov**, **polomer krivosti trajektórie mení znamienko** - trajektória sa **odchyľuje od výšky** a **vlna nedosiahne povrch Zeme**



- **využitie ionosférických vln** je charakteristické pre rádiové spojenie na **krátkych vlnách** (KV) na vzdialenosti rádovo  **$10^2$  až  $10^3$  km** s využitím odrazu od vrstvy

# Obr. Ionosféra



# Kontrolné otázky

- Ktoré sú základné parametre pôdy, vplyvajúce na vlastnosti šírenia elm vln?
- Čím sú dané elektrické vlastnosti pôdy?
- Aké je základné delenie hornín?
- Súčet ktorých vln vytvára elm pole pri ich šírení medzi anténami umiestnenými nad rovinným zemským povrchom?
- Akú podmienku musia spĺňať „VA“ a „PA“ pri šírení elm vlnenia medzi anténami umiestnenými nad rovinným zemským povrchom?
- Na šírenie ktorých rádiových vln sa využíva takéto rozmiestnenie antén?
- Ako sú umiestnené „VA“ a „PA“ pri šírení povrchových elm vln nad rovinným zemským povrchom?
- Ako je polarizované výsledné pole pri šírení povrchových elm vln nad rovinným zemským povrchom?
- Aké je šírenie elm vln nad nehomogénnym zemským povrchom v závislosti na rozložení intenzít poľa pre oblasti charakterizované parametrami „ $S_1$ “ a „ $S_2$ “?

- Ako nazývame oblasť, pre ktorú môžeme elm pole v mieste príjmu (PA) považovať za superpozíciu (skladanie) vlny priamej a odrazenej pri šírení elm vlnenia nad guľovým zemským povrchom?
- Ako nazývame oblasť, pre ktorú nemôžeme elm pole v mieste príjmu (PA) považovať za superpozíciu (skladanie) vlny priamej a odrazenej pri šírení elm vlnenia nad guľovým zemským povrchom?
- Aká časť z priamej viditeľnosti „ $R_0$ “ je Interferenčná oblasť?
- Aká časť z priamej viditeľnosti „ $R_0$ “ je Diferenčná oblasť?
- Aká časť z priamej viditeľnosti „ $R_0$ “ je Zóna polotieňa?
- Aká časť z priamej viditeľnosti „ $R_0$ “ je Zóna tieňa?
- Aká časť z priamej viditeľnosti „ $R_0$ “ je Zóna ožiarenia?
- Aké kritérium sa používa pre ohodnotenie nerovností (drsnoti) zemského povrchu?
- Do akej výšky nad zemským povrchom siaha troposféra v oblasti rovníka?
- Do akej výšky nad zemským povrchom siaha troposféra v stredných zemepisných šírkach?
- Do akej výšky nad zemským povrchom siaha troposféra v oblasti pólův?

- Závisí zloženie troposféry (percentuálne zastúpenie jednotlivých plynov) od výšky?
- Čo je charakteristickým javom v troposfére?
- Čo je teplotná inverzia a ako vzniká?
- Od akých podmienok závisí šírenie elm vln v troposfére a ako sa prejaví ich vplyv?
- Aký veľký je index lomu troposféry (vzduchu)?
- Aké sú základné druhy troposférického lomu (vedieť aj kresliť)?
- Čo spôsobuje rozptyl elm vln šíriacich sa v troposfére a teda umožňuje diaľkové spojenie pomocou „VKV“?
- Pre elm vlnenie akej vlnovej dĺžky „ $\lambda$ “ môžeme predpokladať, že troposféra je priehľadná, t.j. má nulové tlmenie?
- Aké sú druhy tlmenia elm vln v troposfére?
- V akých výškach (nad koľko kilometrov) atmosféry sa nachádza ionosféra?
- Do akej výšky nad zemským povrchom má atmosféra rovnaké zloženie ako pri povrchu Zeme?
- Od akej nadmorskej výšky dochádza k disociácii dusíka „ $N_2$ “ (rozštiepeniu na atómy N)?
- Od akej nadmorskej výšky dochádza k disociácii kyslíka „ $O_2$ “ (rozštiepeniu na atómy O)?

- Čo je to ionizácia plynu?
- Čo je to rekombinácia?
- Čo musí existovať medzi ionizáciou a rekombináciou?
- Akú podmienku musí spĺňať ioniozačná práca „ $W$ “, aby došlo k ionizácii fotónmi s energiou kvanta ( $h \cdot f$ )?
- Čo (kto) je základným zdrojom ionizácie atmosféry?
- Aký je výškový interval „D“ vrstvy ionosféry?
- Aký je výškový interval „E“ vrstvy ionosféry?
- Aký je výškový interval „F1“ vrstvy ionosféry?
- Aký je výškový interval „F2“ vrstvy ionosféry?
- Ktoré vrstvy ionosféry zanikajú v noci?
- Ako sa nazývajú oblasti, ktoré tvoria najvyššie (okrajové) vrstvy ionosféry?
- Čo tvorí Van Allenove oblasti ionosféry?
- Pre aké frekvencie „ $f$ “ v porovnaní s kritickou frekvenciou „ $f_{kr}$ “ sa ionosféra stáva priehľadnou (el. vlna sa od ionosféry neodráža)?
- Na aké vzdialenosti sa využíva šírenie pomocou odrazu od ionosféry pre prenos „KV“?

# Zoznam použitých skratiek a symbolov

- c rýchlosť svetla vo vákuu (cca  $3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$ )
- °C jednotka teploty (stupeň Celzia)
- cm jednotka dĺžky (centimeter,  $10^{-2}$ )
- dB jednotka tlmenia (decibel)
- DV dlhé vlny (Low Frequency (LF))
- elm elektromagnetická/é/ý
- eV jednotka energie (elektrónVolt)
- GHz jednotka frekvencie (GigaHertz,  $10^9$ )
- GPS globálny systém určenia polohy (Global Positioning System)
- GSM globálny systém mobilných komunikácií (Global System for Mobile Communications)
- IR infračervené svetlo (InfraRed)
- K jednotka teploty (stupeň Kelvinova)
- km jednotka dĺžky (kilometer,  $10^3$ )
- KV krátke vlny (High Frequency (HF))
- kW jednotka výkonu (kilowatt,  $10^3$ )

- $\lambda$  vlnová dĺžka
- LOS priama viditeľnosť (Line Of Sight)
- $\mu\text{m}$  jednotky dĺžky (mikrometer ,  $10^{-6}$ )
- m jednotky dĺžky (meter)
- mm jednotky dĺžky (milimeter ,  $10^{-3}$ )
- MHz jednotka frekvencie (MegaHertz,  $10^6$ )
- NLOS bez priamej viditeľnosti (Non Line Of Sight)
- nm jednotka dĺžky (nanometer,  $10^{-9}$ )
- PA prijímacia anténa
- RF rádiové frekvencie (Radio Frequency)
- S jednotky elektrickej vodivosti (Siemens)
- SV stredné vlny (Medium Frequency (MF))
- THz jednotka frekvencie (TeraHertz,  $10^{12}$ )
- TV televízia (Television)
- UKV ultra krátke vlny (Ultra High Frequency (UHF))
- UV ultrafialové svetlo (Ultra Violet)
- VA vysielacia anténa
- VKV veľmi krátke vlny (Very High Frequency (HF))



- W jednotka výkonu (Watt)
- WiFi súbor štandardov pre bezdrôtovú komunikáciu (Wireless Fidelity – „bezdrôtová vernosť“)
- WiMax bezdrôtová telekomunikačná technológia (World Interoperability for Microwave Access)



Ďakujem za pozornosť