

## 6 Hluk a ochrana před nadměrnou hlukovou zátěží

Hluk je z biologického hlediska zvuk, škodlivý svou nadměrnou intenzitou. Účinek hluku je subjektivní (obtěžující, rušící soustředění a psychickou pohodu) a objektivní (měřitelné poškození sluchu). Hluk může mít charakter neperiodického nebo periodického zvuku.

### *Hluk jako faktor životního prostředí*

Nadměrný hluk zaujímá v řadě faktorů ohrožujících naše životní prostředí stále důležitější místo. V programech ochrany prostředí, které realizují vyspělé státy světa, se řadí hluk ihned za znečištění ovzduší a ochranu povrchových vod.

V současné době je na škodlivé účinky hluku zaměřena pozornost mnoha odborníků v oblasti zdravotnictví. Stejně tak se měřením a snižováním hluku zabývají stále větší počty odborníků různých profesí. Jednou z nejzávažnějších vlastností zvuku a hluku je, že se šíří na poměrně velké vzdálenosti, stovky metrů i více. Postihuje tedy nejenom obsluhu zdroje, ale i osoby, pro něž je hluk nežádoucí a zbytečný.

### Zvuk - základní pojmy

#### *Podstata zvuku*

Zvuk je mechanické kmitání pružného prostředí ve frekvenčním rozsahu 20 až 20 000 Hz. Tento frekvenční rozsah odpovídá kmitočtovému rozsahu vnímání lidského ucha. Zvukovou vlnu, která leží ve zvukovém rozmezí frekvencí, ucho přijme jenom tehdy, když *intenzita zvuku* převyšuje minimální hodnotu tzv. *práh slyšitelnosti*.

#### *Intenzita zvuku*

Je množství energie, které za jednotku času projde jednotkou plochy

$$I = \frac{1}{S_0} \frac{dE}{dt}$$

U kulové vlnoplochy roste velikost plochy, kterou vlnění prochází, se čtvercem vzdálenosti  $r$  od zdroje vlnění. Pro intenzitu vlnění pak platí  $I \approx r^{-2}$ .

#### *Akustický tlak*

Zvuková vlna, která se šíří vzduchem, představuje podélné vlnění, které vyvolává postupující zhuštění a zředění. Tyto lokální změny hustoty vzduchu, doprovázené odpovídajícími lokálními změnami jeho tlaku, jsou tím větší, čím větší je amplituda zvukové vlny. Vnější projevem je tzv. *akustický tlak*  $p_a$ . Akustický tlak měříme *zvukoměrem*, což je citlivý (nejčastěji kapacitní) mikrofón převádějící akustický tlak na elektrické napětí.

Lidské ucho vnímá tyto tlakové změny vzduchu ve svém okolí, jsou-li větší než hodnota tzv. *prahu slyšitelnosti*, jemuž odpovídá akustický tlak  $p_0 \doteq 10^{-5}$  Pa. Je-li energie přenášená zvukovými vlnami příliš velká, může akustický tlak ucho poškodit. Za tzv. *práh bolestivosti*, při jehož překročení je toto nebezpečí aktuální, je považována hodnota akustického tlaku  $10^2$  Pa. Tyto prahové hodnoty odpovídají intervalu frekvencí od 700 Hz do 6 kHz, na něž je lidské ucho nejcitlivější.

Lidské ucho vnímá srovnávací tón 1 kHz s různou hlasitostí v intervalu intenzit v rozsahu  $10^{-12}$  Wm<sup>-2</sup> až 1 Wm<sup>-2</sup>. Velká šířka tohoto intervalu je pro praktické použití nepohodlná. Proto ji upravujeme využitím Weberova – Fechnerova zákona.

#### *Weberův – Fechnerův zákon*

Podle tohoto zákona je intenzita smyslového počítka přímo úměrná logaritmu intenzity podnětu. Mění-li se tedy podněty působící na naše smysly řadou geometrickou, vnímáme jejich změnu řadou aritmetickou. Lidské smysly tedy podle Webera a Fechnera vnímají vnější

podněty v logaritmické závislosti na jejich intenzitě. Zmíněný zákon platí jen přibližně.

### **Hladina intenzity zvuku**

Hladina intenzity zvuku  $L$  je v souladu s Weberovým – Fechnerovým zákonem definovaná jako dekadický logaritmus poměru intenzity  $I$  měřeného zvuku a srovnávací intenzity  $I_0 = 10^{-12} \text{ Wm}^{-2}$ , odpovídající prahu slyšitelnosti lidského ucha pro základní tón o frekvenci 1 kHz

$$L = \log \frac{I}{I_0}.$$

Bezrozměrnou jednotkou hladiny intenzity zvuku je 1 **bel**, pojmenovanou po vynálezci telefonu A. G. Bellovi. V praxi se obvykle pracuje s jednotkou desetkrát menší – **decibel dB**. Pro tuto jednotku má definiční rovnice hladiny intenzity zvuku tvar

$$L = 10 \log \frac{I}{I_0}.$$

Lidským uchem slyšitelný interval hladin intenzity referenčního jednoduchého tónu o frekvenci 1 kHz má tedy přibližně šířku 120 dB. Prahu slyšitelnosti tohoto tónu odpovídá pak **nulová hladina**  $L = 0$  intenzity. Prahu bolestivosti tohoto tónu o intenzitě přibližně  $1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , přísluší hladina intenzity  $L = 120$  dB. Hladiny intenzity zvuku pro vybrané zdroje jsou uvedeny v tab. 3. Zvýšení hladiny intenzity  $L$  zvuku o 1 dB, což je pro zdravé ucho přibližně minimální rozlišitelný rozdíl, představuje zvýšení jeho intenzity  $I$  o přibližně 1/4.

Vjem výšky zvuku odpovídá frekvenci harmonických zvukových kmitů. Kromě **základní frekvence** to jsou i tzv. **vyšší harmonické frekvence**. Přítomnost vyšších harmonických frekvencí s nenulovými amplitudami určuje **barvu zvuku**.

Tab. 3: Hladiny intenzity různých zvukových zdrojů

Hladina [dB(A)]	Zvuk	Intenzita zvuku [J/m <sup>2</sup> s]	Akustický tlak [N/m <sup>2</sup> ]
0	Spodní hranice citlivosti lidského ucha	10 <sup>-12</sup>	0,000 02
10	Šepot, šelest listí	10 <sup>-11</sup>	0,000 065
20	Tichá zahrada	10 <sup>-10</sup>	0,000 2
30	Housle hrající pianissimo	10 <sup>-9</sup>	0,000 65
40	Kroky, tichá hudba	10 <sup>-8</sup>	0,002
50	Hluk v kavárně	10 <sup>-7</sup>	0,006 5
60	Rozhovor, hluk v obchodě	10 <sup>-6</sup>	0,02
50	Hlasitá řeč, hluk automobilu	10 <sup>-5</sup>	0,064 5
90	Rušná ulice, automobilový klakson	10 <sup>-3</sup>	0,645
100	Fortissimo orchestru, siréna	10 <sup>-2</sup>	2,04
110	Sbíječka	10 <sup>-1</sup>	6,45
120	Tryskový motor, hrom	1	20,4
130	Práh bolesti	10	64,5

Poznámka:

Akustika se zabývá mechanickými kmity v širším pásmu frekvencí. Rozlišujeme tři pásma:

- **infrazvuk** - vlny o frekvencích pod 20 Hz,
- **interval slyšitelnosti** - vlny o frekvencích od 20 do 20 000 Hz,
- **ultrazvuk** - vlny o frekvencích 20 000 Hz a výše.

### ***Vyjádření účinků zvuku na člověka***

Při popisu účinků zvuku na člověka používáme hladinu hluku vyjádřenou v **decibelech** a korigovanou kmitočtově pomocí **pásmového váhového filtru**, který zachycuje nestejnou citlivostí ucha na zvuky o různých kmitočtech. Údaj hladiny hluku je označen **dB (A)**, kde *A* označuje použitý váhový filtr. Poněvadž většina hluků v našem prostředí nemá ustálený, ale proměnný charakter, vyhodnocuje se průměrná úroveň sumy akustické energie, která působila v příslušném čase a tato energeticky průměrná hladina se označuje jako **ekvivalentní hladina hluku LAeq**.

### ***Definice hluku***

Hlukem rozumíme každý zvuk, který svou intenzitou nepříznivě ovlivňuje pohodu člověka nežádoucími, nepříjemnými nebo škodlivými účinky.

Povaha hluku charakterizuje hluk z hlediska časového průběhu a kmitočtového složení:

- **hluk ustálený**, je takový, jehož hladina se nemění o více než 5 dB(A),
- **hluk proměnný**, má větší změny intenzity než 5 dB(A),
- **hluk impulzní**, je tvořen jednotlivými impulzy nebo sledem impulzů o délce 1 až 200 ms, s intervaly mezi pulzy delšími než 10 ms,
- **hluk vysokofrekvenční**, může být způsoben neakustickými rušivými vlivy (vítr, vibrace, elektrické a magnetické pole atd.).

## **Působení hluku na člověka**

### ***Rozdělení účinků***

**Účinky obtěžující** jsou velmi nesnadno kvantifikovatelné, protože jejich dopad se různí podle pocitů, dojmů a zdravotní dispozice osob zasažených hlukem. Také zdroje hluku mají různý rušivý účinek, např. silniční hluk je méně rušivý než hluk letecký a naopak ruší více než hluk z běžného železničního provozu.

**Účinky škodlivé** jsou účinky vyvolané nepřipustně vysokou hladinou hluku. Pro území ČR byl schválen Poradním sborem hlavního hygienika ČR dne 19. 4. 1990 limit LAeq ve výši 65 dB(A). Pro posuzování hlukové zátěže obyvatel dopravou byl zvolen základní limit LAeq = 65 dB(A) pro dopravu pozemní a LAm<sub>ax</sub> = 85 dB(A) pro dopravu leteckou.

Vzhledem k tomu, že nelze zajistit dodržení normovaných hodnot škodlivého hluku z dopravy ve všech případech, posuzuje se škodlivost hluku počtem obyvatel zasažených nadměrným hlukem. Pro tento postup byly stanoveny "zóny dB(A)":

1. zóna 65 - 69,5 dB(A),
2. zóna 70 - 74,9 dB(A),
3. zóna 75 - 79,9 dB(A),
4. zóna nad 65 dB(A) pro počet všech obyvatel zasažených nadměrným hlukem z dopravy, viz tab. 4,
5. zóna nad 85 dB(A) pro leteckou dopravu.

## **Poškození sluchu hlukem**

### ***Příznaky poškození sluchu hlukem***

- nedoslýchavost,
- ušní šelest,
- závratě,
- další (bolest, teploty, ušní výtok, svědění).

Tab. 4: Počet obyvatel zasažených nadměrným hlukem ze silniční dopravy, v tisících

Zóna	Ekvivalentní hladina hluku LAeg dB(A)	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996
1	65 -69,9	591	587	577	559	527	516	507
2	70-74,9	711	707	695	673	635	621	610
3	75-79,9	93	92	91	88	83	81	80
	nad 65	1395	1387	1362	1321	1245	1218	1198

### Zdroj poškození sluchu

- okamžitý (akutní hlukové trauma),
- dlouhodobý (poškození sluchu hlukem - chronické akustické trauma).

Mechanismem poškození je hluk (akustický tlak), explose (mechanický tlak vzduchu) nebo vibrace (tlak pod prahem slyšitelnosti).

**Akutní akustické trauma**, náhle vzniklé, trvalé poškození sluchu intenzivním zvukem (nad prahem bolesti >130dB).

**Chronické poškození sluchu hlukem**, poškození chronickou expozicí hluku. Zdrojem může být dlouhodobá expozice hluku nebo episodický nárazový hluk. Čím déle hluk působí, tím méně stačí jeho intenzita k poškození. Nejprve dochází k dočasnému, následně trvalému posunu sluchového prahu.

Příznaky chronického poškození sluchu hlukem: progresse v čase, symetrie, porucha porozumění, ušní šelest, případně závratě a bolesti (tlak) v uších. Typicky se vyskytuje v případech práce v hluku. Vzhledem k dlouhému trvání nedoslýchavosti je typická dlouhodobá tolerance sluchových ztrát.

### Léčba chronického poškození sluchu hlukem

Léky zlepšující mechanické vlastnosti krve, metabolicky působící léky (vitaminy), kortikoidy. Chirurgická léčba neexistuje, konzervativní léčba není efektivní. Zásadní je proto prevence:

- sledování úrovně hluku, kontroly v hlučných provozech, ochranné pomůcky,
- administrativní (legislativní) opatření,
- depistáž „hlukově senzitivních jedinců“ (DPOAE),
- redukce zdrojů hluku (vývoj nových technologií).

### Stanovení právních podmínek pro zátěž hlukem

#### Limity

Ochrana lidského zdraví před hlukem je zakotvena v zákoně č. 258/2000 Sb., o ochraně veřejného zdraví, konkrétně v §§ 30-34 tohoto zákona.

Limity pro hluk jsou pak podrobně stanoveny nařízením vlády č. 148/2006 Sb., o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací. U venkovního hluku stanoví nařízení vlády zvlášť limity pro hluk ze stavební činnosti a z leteckého provozu, pro zdravotnická zařízení, pro impulsní hluk, pro hudbu a řeč, viz tab. 5.

Tab. 5: Základní limity pro venkovní hluk (u obytných domů)

Venkovní hluk	Den (6:00-22:00) /dB/	Noc (22:00-6:00) /dB/
Základní limit – pro hluk jiný, než z dopravy	50	40
Hluk ze silniční dopravy	55	45

Hluk ze železniční dopravy	<b>55</b>	<b>50</b>
Hluk z hlavních silnic	<b>60</b>	<b>50</b>
Hluk v ochranných pásmech drah	<b>60</b>	<b>55</b>
Stará hluková zátěž	<b>70</b>	<b>60</b>
Stará hluková zátěž u železničních drah	<b>70</b>	<b>65</b>

*Poznámka:*

*Starou hlukovou zátěží se rozumí stav hlučnosti způsobený silniční a železniční dopravou, který nastal před koncem roku 2000.*

U vnitřního hluku stanoví nařízení vlády zvlášť limity pro zdravotnická zařízení a různé veřejné budovy (obchody, školy apod.). Dále jsou podrobněji upraveny limity pro vibrace a pro hluk na pracovištích, viz tab. 6.

*Tab. 6: Základní limity pro vnitřní hluk (uvnitř obytných místností)*

<b>Vnitřní hluk</b>	<b>Den (6:00-22:00) /dB/</b>	<b>Noc (22:00-6:00) /dB/</b>
Základní limit	<b>40</b>	<b>30</b>
Hluk ze silniční dopravy (neplatí pro stavby dokončené po 1. 6. 2006, u nich základní limit)	<b>45</b>	<b>35</b>
Hluk z hudby, zpěvu a řeči	<b>35</b>	<b>25</b>

Hygienická stanice může udělit časově omezené povolení překročení hygienických limitů v případě, kdy

- limity nelze dodržet z vážných důvodů,
- původce hluku prokáže, že hluk bude omezen na rozumně dosažitelnou míru.

## **Protihluková opatření**

### **Omezení hluku**

V reálném prostředí nedochází k poklesu akustických veličin pouze vlivem zvětšující se vzdálenosti. Ztráty při přenosu jsou způsobeny ještě dalšími příčinami:

- absorpcí zvuku ve vzduchu,
- vlivem mlhy, deště nebo sněhu,
- vlivem větru, teplotních gradientů, atmosférické turbulence a přízemního efektu,
- vlivem překážek zvukových vln.

### **Opatření ke snížení hluku**

V silniční dopravě kde hluk působí největší potíže, se v současnosti při snižování hlučnosti uplatňují především odvodňovací živičné směsi a rychlostavitelné protihlukové zábrany. V případě blízkosti dálnice v místech hustého osídlení se aplikují kombinace různých opatření včetně doplňkové izolace horních fasád domů. Koncepce a budování protihlukových zábran v městském prostředí vyžaduje uplatnit požadavek jejich integrace do konkrétního prostředí.

V železniční dopravě jsou protihluková opatření realizována především při rekonstrukci železničních koridorů. Při rekonstrukcích tratí dochází, použitím nových železničních spodků a svršků a pružnému upevnění kolejí, ke snížení hluku u zdroje. Při posuzování hlukové zátěže jsou uplatňovány, v rámci daných předpisů, různé druhy korekcí.

V letecké dopravě se vyskytují problémy s hlukovou zátěží obyvatel především na letišti Praha-Ruzyně při nočním provozu. Řešení si vyžádalo úpravu podmínek pro noční létání ve vztahu hmotnosti letadel a dodržování stanovených hlukových limitů při startu a přistání.

## 7 Význam ozónu v atmosféře a procesy ve stratosféře

### Molekula ozónu

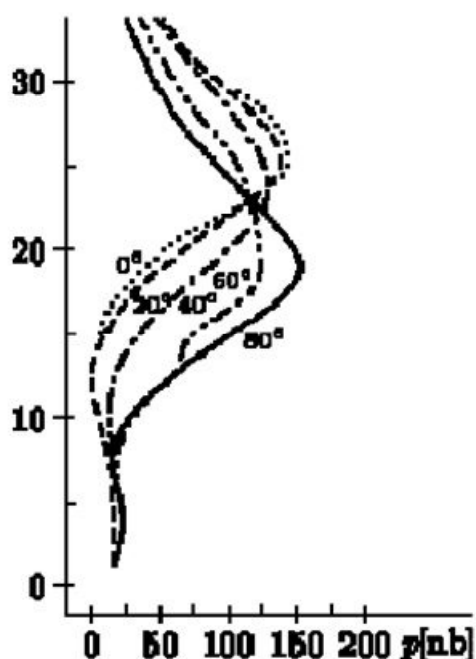
Molekula ozónu je jednou z forem molekul kyslíku. Skládá se ze tří atomů kyslíku, viz obr. 18. Za běžných podmínek se kyslík vyskytuje jako dvouatomová molekula, která je mnohem méně reaktivní než méně stabilní tříatomová molekula ozónu.

### Rozložení ozónu v atmosféře

Poprvé byl ozón objeven roku 1873 a to v přízemních vrstvách atmosféry, později bylo zjištěno, že se vyskytuje i ve vyšších atmosférických vrstvách. Pravidelná měření se začala provádět v první polovině minulého století. Postupně byla vybudována síť pozemních monitorovacích stanic a v roce 1934 byly poprvé použity balóny, které umožnily prozkoumat výškové rozložení ozónu. Později se začaly používat sondážní rakety a s rozvojem kosmonautiky metody dálkového průzkumu Země.

Pozorované rozložení ozónu v atmosféře je určeno složitým komplexem jevů a podmínek: složením atmosféry, radiačními faktory, fotochemickými a chemickými reakcemi a dynamickými procesy probíhajícími v atmosféře.

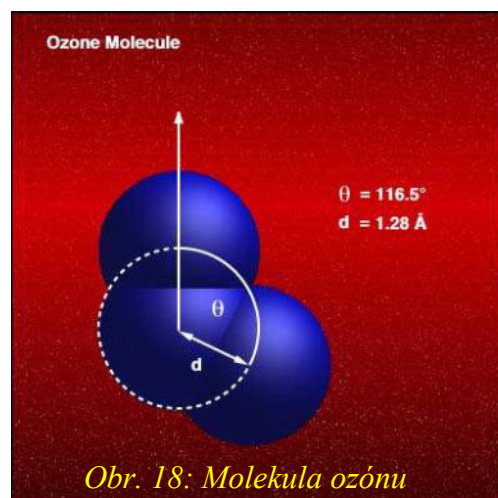
Na obr. 19 je jeden z výškových profilů ozónu pro různé zeměpisné šířky. Na svislé ose je výška v kilometrech, na vodorovné ose parciální tlak ozónu v nb ( $10^{-4}$ Pa).



Obr. 19: Rozložení ozónu v atmosféře

### Stratosférický a troposférický ozón

**Troposféra** – vrstva atmosféry nad zemským povrchem, je pro ni typické, že obsahuje velké množství vodních par, které je ovšem značně proměnlivé, její horní hranice je níže na pólech.



Obr. 18: Molekula ozónu

Nejvíce ozónu vzniká ve výškách 25-30 km nad rovníkem, v důsledku proudění je ale jeho nejvyšší koncentrace ve středních zeměpisných šířkách ( $60^\circ$ - $70^\circ$ ), směrem k pólům dochází opět k poklesu. Rovněž vertikální rozdělení není rovnoměrné, asi 90% ozónu se nachází ve vysokých vrstvách atmosféry, tzv. **stratosférický ozón**, zbytek připadá na přízemní vrstvy, tzv. **troposférický ozón**.

### Měření obsahu ozónu - Dobsonovy jednotky

**Dobsonova jednotka** (DU) se používá k určení množství ozónu ve vertikálním sloupci atmosféry. 1 DU představuje takové množství ozónu, které by za normálních podmínek, tj. tlaku 1013 hPa a teplotě 273 K, vytvořilo vrstvu o tloušťce 10 mikrometrů ( $10^{-5}$  m). Běžné hodnoty naměřené v zemské atmosféře jsou řádově 350 DU, což odpovídá vrstvě o tloušťce 1 mm.

Dochází v ní k výrazným fyzikálním jevům – proudění, změny tlaku, oblačnosti, kondenzace atd., které označujeme jako počasí.

**Stratosféra** – vrstva atmosféry nad troposférou. Její dolní hranice se pohybuje od 9 do 17 km v závislosti na zeměpisné šířce, roční době a povětrnostní situaci. Horní hranice sahá do výšky 45 –50 km.

**Ozonosféra** – oblast stratosféry (15 –50 km), kde se tvoří vlivem fotochemických procesů ozón. Největší obsah ozonu je zhruba ve výšce mezi 20 – 25 km. V tomto případě mluvíme o tzv. **stratosférickém ozónu**.

Ozón se může vytvářet také v troposféře opět převážně fotochemickými procesy, ovšem většinou prostřednictvím jiných výchozích molekul (prekurzorů), mezi něž patří zejména produkty spalování fosilních paliv ale také další nečistoty, lokální význam má vznik v důsledku elektrických výbojů při bouřkách. Tento přízemní ozón se nazývá **troposférický ozón**.

### Význam stratosférického a účinky troposférického ozónu

Ultrafialové záření (UV záření) – elektromagnetické záření s vlnovými délkami kratšími než má viditelné světlo, tj. méně než 380nm. U UV záření rozlišujeme složku A (320 – 380 nm), složku B (280 – 320 nm) a složku C (180 – 280 nm). Energie fotonů UV záření roste s klesající vlnovou délkou. Zatímco složka A se u lidí může projevit pigmentací pokožky a přispívá k tvorbě vitamínu D a A, zbývající dvě složky mají pro živé organismy škodlivé účinky. Atmosféra složku A obvykle propouští, složku B jen částečně a pro složku C je zcela nepropustná. Složka C je totiž v horních vrstvách atmosféry absorbována molekulami kyslíku, které vytvářejí molekuly ozónu.

Stupeň nebezpečí UV záření na člověka hodnotíme pomocí tzv. UV faktoru. UV faktor stupně jedna odpovídá přibližně hustotě energie 20 J/m<sup>2</sup>. UV index nabývá hodnoty v intervalu 0 až 8, na horách až 12, viz tab. 7. Hodnota UV-indexu platí pro všechny typy pokožky. Poskytuje údaj o tom, po jaké době se u určitého typu pokožky vytvoří erythem – opálení..

Tab. 7: Tabulka účinků UV záření na základě hodnot UV indexu



Lidé lze podle typu pokožky rozdělit do 4 základních skupin, viz tab. 8, kde jsou uvedeny i jejich charakteristiky a znaky.

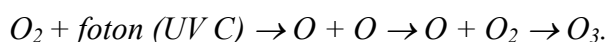
Doba doporučená na opalování závisí od typu pokožky a od použité ochrany před zářením (např. krém s ochranným faktorem). Mezi populární ochranné prostředky proti účinkům UV záření patří krémy, oleje a mléka s ochranným faktorem (SPF – Sun Protector Faktor). Číslo filtru určuje, kolikrát déle můžeme být na slunci po jeho aplikaci v porovnání s nechráněnou pokožkou, abychom dosáhli ten samý účinek.

Stratosférický ozón představuje důležitou složku atmosféry. Má schopnost absorbovat B složku UV záření. Jeho zdrojem jsou fotochemické reakce ve stratosféře, především štěpení

Tab. 8: Základní typy lidské pokožky vzhledem na účinky UV záření

Kožní fototyp	Charakteristika	Reakce kůže na slunce	Hranice zčervenání kůže bez ochrany
I 	velmi světlá kůže, ryšavé vlasy, pihy	vždy se spálí, někdy se opálí do červena, nikdy nepigmentuje	10 min
II 	světlá kůže, světlé vlasy	vždy se opálí do červena, někdy slabě pigmentuje	10 – 20 min
III 	středně světlá kůže, tmavoplavé až tmavé vlasy	někdy se opálí do červena, zřídka se spálí, vždy pigmentuje	20 – 30 min
IV 	tmavá kůže, tmavé vlasy	nikdy se nespálí, velmi dobře pigmentuje	45 min

molekul kyslíku vlivem C složky UV záření o vlnových délkách 200 – 242 nm. Vzniklé radikály kyslíku se slučují s molekulami kyslíku za vzniku ozónu. Uvedený proces můžeme zapsat pomocí rovnice



Ozón sám absorbuje záření především v oblasti 200 až 300 nm, tzv. **Hartleyův absorpční pás**, maximum pohlcení je na vlnové délce 254 nm. Na tento pás navazuje pak slabší **Hugginsův pás**, od 300 do 360 nm, složený z poměrně ostrých čar. Několik absorpčních čar můžeme najít i v infračervené části spektra. Na zemský povrch se dostává většinou pouze sluneční radiace s vlnovými délkami většími než 290 nm. Pokles intenzity UV záření se zmenšující se vlnovou délkou je velmi prudký v okolí prahových hodnot 290 - 295 nm právě díky velkým absorpčním schopnostem ozónu pro vlnové délky < 300 nm.

Intenzita B složky UV záření na zemském povrchu závisí tedy značně na stavu ozonoféry. Protože biologický efekt UV radiace o vlnové délce 290 nm je asi 10 000 krát větší než poškození radiací o vlnové délce 320 nm, zasluhuje každý úbytek stratosférického ozónu značnou pozornost. Vztah mezi poklesem ozónu a B složky UV záření není ale jednoduchý, protože tato složka B není pohlcována pouze ozónem, ale i atmosférickými aerosoly, oblaky a prachem. Znečištěná atmosféra v městských aglomeracích má např. za následek zeslabení ultrafialového záření dopadajícího na zemský povrch o 5 - 30% ve srovnání s okolím.

Pohlcováním ultrafialového záření Slunce působí ozón na teplotní strukturu stratosféry a následně na dynamické procesy, které zde probíhají a chrání život na Zemi. Narušení ozonoféry se proto může projevit změnami regionálního a globálního klimatu a může mít přímé biologické následky. Právě proto mohou mít lidské zásahy do koncentrace ozónu velmi neblahé důsledky.

**Troposférický ozón** může samozřejmě také pohlcovat UV záření, tento efekt je ale vzhledem k asi desetkrát menšímu množství troposférického ozónu v porovnání s ozónem stratosférickým méně významný. Naopak se mohou projevit nežádoucí účinky



troposférického ozónu. Ozón sám může způsobovat ve vyšších koncentracích podráždění sliznic (pálení v očích, v nose a v krku) nebo dýchací obtíže.

Působením UV záření o vlnových délkách kratších než 315 nm dochází k fotodisociaci ozónu za vzniku molekuly a volného atomu kyslíku, který následnou reakcí s vodní parou přechází v hydroxylový radikál (OH). Význam tohoto radikálu spočívá v tom, že se zapojuje do reakcí, které odbourávají některé nežádoucí látky z atmosféry, např. metan, oxid uhelnatý, oxidy dusíku. Množství vzniklého OH přitom závisí na aktuální koncentraci ozónu a vodních par.

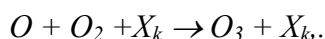
Snížení koncentrace stratosférického ozónu, způsobí snížení absorpčních schopností ozonoféry. Do troposféry se dostává více záření B složky UV záření, což vyvolá intenzivnější fotodisociaci ozónu a tedy vyšší produkci radikálu O a následně i hydroxylových radikálů, což znamená efektivnější odbourávání škodlivin v přízemních vrstvách atmosféry.

Reakce škodlivin s hydroxylovými radikály vedou ale k zvýšení produkce ozónu, což znamená, že snížení koncentrace stratosférického ozónu zvyšuje koncentraci ozónu troposférického.

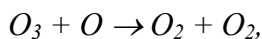
Do poloviny 90. let minulého století, se skutečně s dlouhodobým ubýváním stratosférického ozónu zaznamenal růst koncentrací ozónu troposférického. Nyní se střední koncentrace ozónu v troposféře i stratosféře stabilizovaly.

### **Procesy ovlivňující fyzikální rovnováhu stratosférického ozónu**

Dvě navazující reakce popisující vznik ozónu jsou uvedeny v předchozí kapitole, první popisovala fotodisociaci molekuly kyslíku, druhá sloučení molekuly kyslíku s atomárním kyslíkem. Druhá reakce probíhá za přítomnosti katalyzátoru, označme jej např.  $X_k$ . Tedy platí

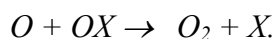
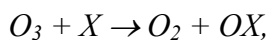


Avšak může probíhat i opačná reakce vedoucí k rozkladu ozónu. K rozkladu ozónu může docházet i vlivem fotodisociace

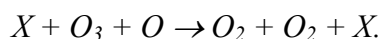


Foton vystupující v rovnici odpovídá elektromagnetickému záření s vlnovými délkami menšími než 1200 nm. Fotodisociace ozónu na rozdíl od fotodisociace kyslíku tedy může probíhat nejen vlivem UV záření, ale i vlivem viditelného a infračerveného záření.

Později bylo zjištěno, že je třeba počítat také s dalšími procesy, které lze zapsat rovnicemi



Uvedené rovnice lze zapsat jako katalyzovanou přeměnu ozónu na molekulu kyslíku



kde jako katalyzátor  $X$  působí  $NO$ ,  $H$ ,  $OH$ ,  $Cl$ ,  $Br$ . Ozón tedy v průběhu jedné reakce vzniká, ale současně v průběhu jiných procesů zaniká. Ozón vzniká především ve vyšších vrstvách atmosféry, kde je větší intenzita UV záření, naopak v nižších vrstvách, pod 30 km převažuje rozpad ozónu.

Detailní popis hlavních procesů vzniku a zániku ozónu není stále uzavřen a představuje poměrně složitý problém vlivem mnoha následných reakcí a reakcí v aerosolech.

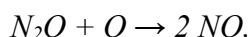
## 8 Ztenčování ozónové vrstvy, ozónová díra a její možné následky

### Ovlivnění stavu ozónu lidskou činností

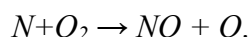
Lidská civilizace může ovlivňovat stav ozónové vrstvy v důsledku své průmyslové ale i zemědělské činnosti, nebo jen využíváním vymožeností běžné denní potřeby.

Přestože komplex chemických procesů ovlivňujících ozonoféru je složitý a není zcela probádán, předpokládá se možné narušení stavu ozónu v důsledku především následujících chemických cyklů:

- **cyklus  $NO_x$** , v němž roli katalyzátoru  $X$  hraje oxid dusnatý  $NO$ , který vzniká rozpadem troposférického oxidu dusného  $N_2O$ ,



nebo fotodisociací stratosférického dusíku  $N_2$  a jeho následnou reakcí s  $O_2$



Cyklus se uplatňuje do výšek okolo 35 km.

- **cyklus  $ClO_x$** , v němž roli katalyzátoru  $X$  hraje atomární chlór  $Cl$ . Jeho zdrojem jsou halogenované uhlovodíky, organické sloučeniny na bázi nižších alkanů (metan, etan, cyklobutan) s obsahem chlóru, fluoru a vodíku v molekule.
- **cyklus  $BrO_x$** , v němž roli katalyzátoru  $X$  hraje atomární bróm  $Br$ , je obdobou předchozího cyklu, ale je mnohem účinnější.

Zdroje látek, které ovlivňující množství katalyzátorů v případě uvedených cyklů:

### Troposférický $N_2O$ (NO)

Pochází jednak z přirozených zdrojů, např. z půdy a z moří jako důsledek činnosti živých organismů. Mezi umělé zdroje patří dusíkatá hnojiva, emise vznikající spalováním fosilních paliv a jejich produktů. Zdrojem jsou i jaderné výbuchy.

### Freony (Cl)

Freony (CFC, chlorofluorohydrodívky, též úplně halogenované uhlovodíky), jsou látky používané hlavně jako médium do chladicích zařízení např. ledniček, též jako náplně do aerosolových rozprašovačů. Jejich emise byly nejvýznamnější v 60. a 70. letech. Patří zde např.  $CFCl_3$  nebo  $CF_2Cl_2$ .

### Chlorid uhličitý $CCl_4$

Tetrachlormethan, nepřesně „tetrachlór“, vzniká např. jako vedlejší produkt výroby dichlormethanu a trichlormethanu (chloroform).

### Metylchloroform $CH_3CCl_3$

Trichlorethan, používá se jako součást čisticích prostředků na kovy a plasty.

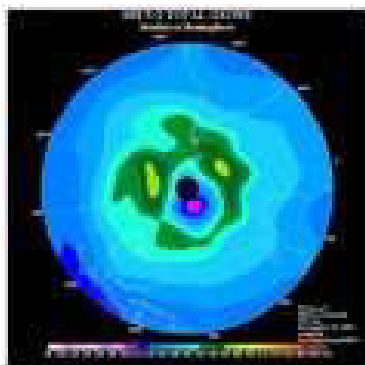
### Halony (Br)

Bromofluorohydrodívky (případně obsahují i chlór), např.  $CBrF_3$ ,  $CBrClF_2$ ,  $C_2F_4Br_2$ . Používají se např. v hasicích přístrojích. Přes zatím nižší koncentraci jsou nebezpečné vzhledem k větší účinnosti příslušného cyklu.

### Ozónová díra

Výrazný pokles koncentrace stratosférického ozónu, zvláště nad Antarktidou, je označován jako **ozónová díra**. O ozónové díře se hovoří v případě poklesu koncentrace odpovídající hodnotě pod 220-250 DU. Definice nejsou jednotné, někdy se navíc spojuje i s konkrétním poklesem střední hodnoty za delší období. Normál odpovídá hodnotám mezi 300 - 400 DU,

při větších výkyvech 250 – 500 DU. Nejnižší zjištěné hodnoty v případě ozonové díry nad Antarktidou byly pod 100 DU.



Obr. 20: Ozonová díra

Antarktická ozonová díra byla objevena v polovině 70. let díky síti pozemních pozorovacích stanic, viz obr. 20. V roce 1985 v září a v říjnu poklesla koncentrace ozonu nad Antarktidou na polovinu dlouhodobého průměru. Nejdříve bylo měření koncentrace ozonu omezeno na poměrně malé území severní polokoule a Antarktidu. Měření pomocí satelitů probíhá teprve od roku 1978.

Později byl naměřen kolísavý úbytek stratosférického ozónu nad Jižní Amerikou a Austrálií a později nad severní hemisférou. Rekordní snížení bylo v letech 1992-93. Nad nejvíce obydlenými oblastmi bylo pozorováno snižování okolo 0,5 % za rok.

### **Předpokládané následky ozónové díry**

Zvýšení intenzity toku B složky UV záření vyvolává

- přímé poškození lidského organismu (poškození očí, kůže),
- řetězové následky v ekosystémech prostřednictvím poškození živých organismů.

#### **Přímé poškození lidského organismu**

Sněžná slepota, oční zákal, spáleniny kůže, rakovina kůže.

#### **Zemědělské plodiny**

Zhoršená vitality vegetace – slabší sklizeň.

#### **Fytoplankton a zooplankton**

Fytoplankton a zooplankton tvoří tzv. kryl, který slouží jako potrava mnoha mořských živočichů. Dochází ke snížení produkce krylu a tím k narušení potravního řetězce, snížení účinnosti absorpce CO<sub>2</sub> a zvýšení skleníkového efektu.

### **Monitorování ozónové vrstvy metodami DPZ**

#### **Dálkový průzkum Země**

Obsah ozónu je nepřímými metodami, především změnou absorpce UV záření, měřen již od 20. let 20. století. Měření se prováděla na nevelkém počtu vybraných stanovišť. Měření tak nemohla dát přesnou představu o globálním stavu ozónové vrstvy.

S rozvojem kosmických letů se začali používat ke sledování povrchu Země i stavu jejího ovzduší družice. Tuto metodu označujeme jako tzv. *dálkový průzkum Země*. Někdy se pod tento pojem zahrnují ale i další prostředky a metody zejména letecký průzkum. Dálkový průzkum Země probíhá ve dvou fázích:

1. Sběr experimentálních dat (fotografie, spektrální měření, změny elektromagnetického pole aj.
2. Vyhodnocení získaných dat na základě znalosti přírodních zákonitostí a s použitím vhodných modelů.

Metodami DPZ lze např.:

- zjišťovat rozdělení teplot v atmosféře,
- zjišťovat typy a vlastnosti půd,
- mapovat teplotu půdy a půdní vlhkost,

- mapovat změny vegetace,
- mapovat časové změny rozložení pevninských i mořských ledovců,
- mapovat časové změny rozsahu a mocnosti sněhové pokrývky
- studovat mořské proudy,
- studovat atmosférické jevy,
- detekovat ropné znečištění.

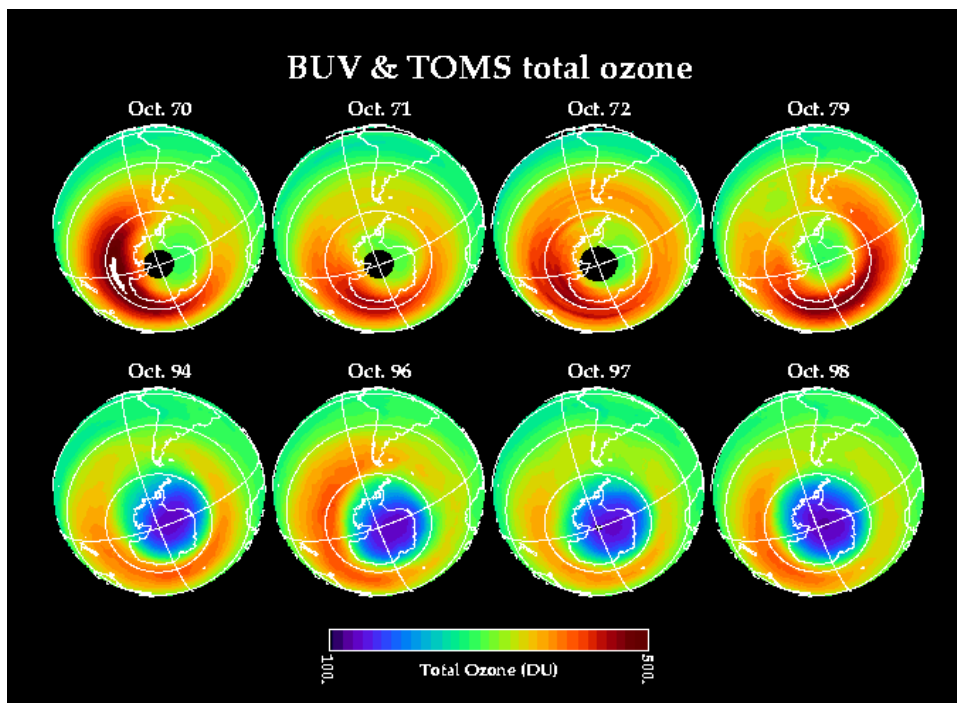
### Měření Českého hydrometeorologického ústavu

V České republice se dlouhodobým sledováním ozónové vrstvy od r. 1962 zabývá **Solární a ozónové oddělení Českého hydrometeorologického ústavu** v Hradci Králové. Sledují se zejména hodnoty maximálních výkyvů a také náhlé změny obsahu ozónu. K největším poklesům dochází především v zimním období a brzy na jaře. V letních měsících dochází naopak k mírnému vzestupu.

### Předpověď vývoje stavu ozónu – metody a slabiny

Ozónová díra nad Antarktidou měla 25. září 2006 podle NASA dosud největší zaznamenanou rozlohu 29,5 milionů čtverečních kilometrů, viz obr. 21. Úbytek ozónu byl tehdy odhadován na 40 milionů tun. V posledním desetiletí se koncentrace ozónu snižovala v celosvětovém průměru přibližně o 0,3 procenta za rok. Úměrně tomu stoupalo riziko rakoviny kůže a šedého zákalu.

Předpokládá se, že relativně velké ozónové díry se budou objevovat ještě 10 až 20 let. Přibližně kolem roku 2065 by se vrstva chránící Zemi před škodlivým ultrafialovým zářením mohla díky celosvětovému zákazu nebezpečných chemických látek zacelit. Vědci doufají, že nad severní polokoulí se množství ozónu vrátí na původní úroveň jako před rokem 1980 do poloviny tohoto století.



Obr. 21: Družicové záznamy koncentrace ozónu nad Antarktidou

Zatím se trend poklesu ozónu nezastavil. Podle některých teorií hraje významnou roli ochlazování stratosféry, které se projevuje i v Arktidě. Navzdory ročním výkyvům z měření

celkově vyplývá trend slábnutí ozónové vrstvy nad Arktidou už od roku 1980. Trend poklesu ozónu tak může být větší, než se dosud očekávalo.

### **Snahy o ovlivnění stavu ozónové vrstvy regulací faktorů pocházejících z lidské činnosti**

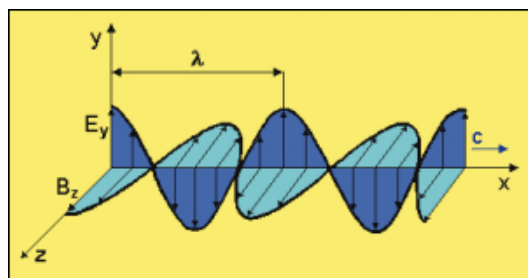
Redukce ozónové vrstvy představuje jedno z velmi vážných ohrožení globálního životního prostředí. Mezinárodní společenství se postupně shodlo na potřebě účinných opatření, která jsou přijímána v rámci *Vídeňské konvence o ochraně ozónové vrstvy* z roku 1985.

Význam zachování ozónové vrstvy pro další život na Zemi byl podtržen řadou mezinárodních úmluv, z nichž první byl tzv. *Montrealský protokol* z roku 1987. Limity týkající se omezení produkce látek narušujících ozónovou vrstvu byly dále zpřísněny úmluvami v roce 1990 v Londýně a v roce 1992 v Kodani. Další dodatky byly schváleny v roce 1999 v Montrealu a v roce 2001 v Pekingu. K úmluvě a k následným protokolům a dodatkům přistoupila většina států světa včetně rozhodujících rozvinutých průmyslových a rozvojových velmocí.

Dodatky zavádějí systém závazků, které spočívají v omezení výroby a vypouštění konkrétních látek ovlivňujících stav ozónové vrstvy. Např. od roku 1997 platí zákaz výroby “měkkých” freonů a jejich dovoz je zakázán od roku 2015. Platí zákaz výroby sprejů, u kterých by byly jako hnací plyn použity tvrdé nebo měkké freony.

Odborníci se shodují na tom, že opatření přijatá v rámci Kodaňského dodatku v roce 1992 jsou dostatečná. Jestliže jsou vědecké předpoklady správné, ozónová vrstva ve stratosféře by se měla postupně přirozenými procesy dostat na svou původní úroveň. Tento proces však potrvá několik desetiletí. Vzhledem k dlouhé době životnosti škodlivých látek v ovzduší se bude ještě dlouhou dobu poškozování ozónové vrstvy prohlubovat. Předpokládá se, že maximálního porušení dosáhne v příznivém případě asi za 10 nebo dokonce až 15 let. Poté by se měla postupně koncentrace stratosférického ozónu zvyšovat, ale normální úroveň asi nedosáhne dříve než okolo poloviny století. Prognóza záleží na očekávaném vývoji koncentrací atmosférického chloru, který je hlavním viníkem redukce ozónu.

## **9 Příjem sluneční energie, skleníkové plyny**



Obr. 22: Elektromagnetická vlna

### **Elektromagnetické záření**

Elektromagnetické záření neboli elektromagnetické vlnění je příčné vlnění, které má dvě na sebe kolmé složky – elektrickou a magnetickou. Elektromagnetické záření se šíří i vakuem, viz obr. 22.

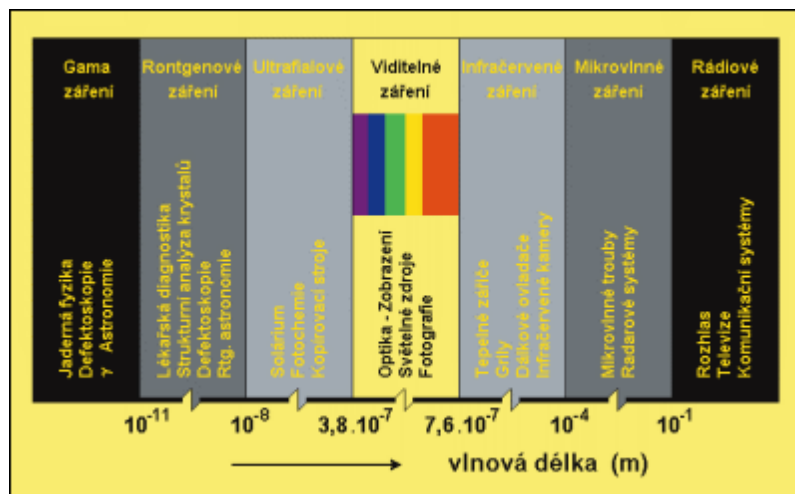
Z hlediska kvantové mechaniky představuje elektromagnetické záření tok **fotonů**.

Elektromagnetické vlny se ve vakuu šíří rychlostí  $c$  (**rychlost světla ve vakuu** je 300 000 km/s). Jsou charakterizovány **vlnovou délkou**  $\lambda$  nebo frekvencí  $f = c/\lambda$ . Fotony příslušné elektromagnetické vlně o frekvenci  $f$  mají energii  $E = h \cdot f$ , kde  $h = 6,62607 \cdot 10^{-34}$  J.s je **Planckova konstanta**.

Podle vlnové délky rozlišujeme různé typy elektromagnetického vlnění. Elektromagnetické vlnění všech délek tvoří **spektrum elektromagnetického záření**, viz obr. 23.

### **Slunce jako hlavní zdroj elektromagnetického záření**

Slunce je centrálním tělesem sluneční soustavy. Je to sférické těleso horkých plynů, především vodíku a hélia s nepatrnou příměsí jiných prvků. Základní charakteristiky Slunce jsou uvedeny v tab. 9.



Obr. 23: Spektrum elektromagnetického záření

Sídlem geoaktivních jevů je vnější část Slunce, která se skládá ze třech vrstev: **fotosféry**, **chromosféry** a **koróny**, viz obr. 24.

Nejnižší je viditelný obal Slunce – **fotosféra**, kterou je možné pokládat vzhledem na její malou průzračnost za povrch Slunce. Je to poměrně chladná oblast s teplotou přibližně 5 800 K, která produkuje největší část **slunečního záření** různých vlnových délek. Je místem vzniku slunečních skvrn.

Fotosféru obklopuje řidší plyn – **sluneční atmosféra**, která se dělí na **chromosféru** a **korónu**. Tok energie ze Slunce na Zemi činí asi 1,4 kW m<sup>-2</sup>.

### Viditelné záření

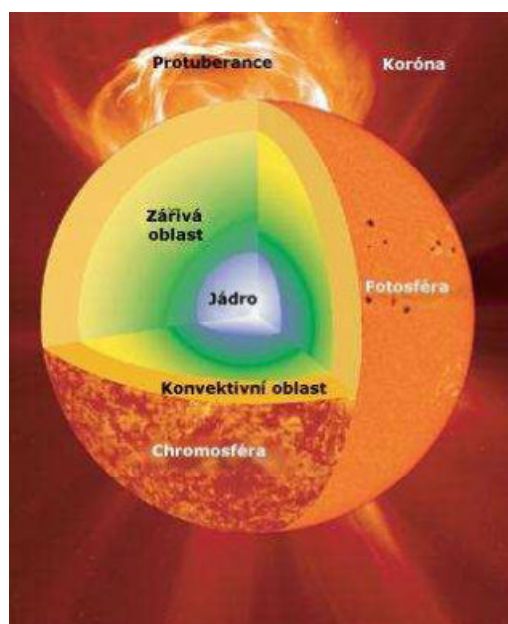
Sluneční světlo je bílé, je to dáno tím, že je to směs různých vlnových délek ve viditelné oblasti spektra elektromagnetického záření. Pokud pozorujeme jen vybranou oblast vlnových délek, jeví se nám světlo jako barevné. Bílé sluneční světlo lze rozložit na jednotlivé barvy spektra např. pomocí hranolu, podobný jev lze pozorovat jako duhu při dešti.

Tab. 9: Základní parametry Slunce

Fyzikální parametry Slunce	
Průměr /km/	1,392.10 <sup>6</sup> (109 Zemí)
Objem /km <sup>3</sup> /	1,41.10 <sup>18</sup> (1,3.10 <sup>6</sup> Zemí)
Hmotnost /kg/	1,99. 10 <sup>30</sup> (3,33.10 <sup>5</sup> Zemí)
Povrchová teplota /K/	5780
Teplota koróny /K/	5. 10 <sup>3</sup>
Teplota jádra /K/	~13,6.10 <sup>3</sup>
R <sub>Z</sub> /km/	1,5.10 <sup>8</sup> (1 AU)
T /den/	27

### Neviditelné elektromagnetické záření ze Slunce

Vzhled Slunce v jiných částech spektra než ve viditelném světle, např. v rentgenovém nebo rádiovém oboru spektra vykazuje na Slunci oblasti, které září intenzivněji, než jiné části povrchu. Při pozorování slunečního spektra speciálními přístroji, objevíme množství tmavých nebo světlých čar.



Obr. 24: Vnitřní struktura Slunce

### Časové a prostorové změny intenzity slunečního záření

Změna množství sluneční energie, která dopadá a je absorbována Zemí, závisí:

- na výstřednosti (excentricitě) eliptické oběžné dráhy Země,
- na změně úhlu dopadu slunečních paprsků vlivem sklonu zemské osy,
- na změnách slunečního výkonu,
- na zeměpisné šířce – více sluneční energie je absorbováno v oceánech v nízkých zeměpisných šířkách, méně sluneční energie je absorbováno v polárních oblastech, kde led a sníh odráží převážnou část dopadajícího záření,
- na albedu (odrazu) oblaků a povrchu Země.

Proměnlivost sluneční aktivity je způsobena změnami magnetického pole Slunce. Sluneční aktivita se mění v přibližně pravidelných cyklech, z nichž nejkratší je o délce 11 resp. 22 let. Během zvýšené aktivity Slunce jsou na Slunci pozorovány *sluneční skvrny* a *sluneční erupce*.

### Význam slunečního záření pro biosféru

Biosféru tvoří souhrn všech živých a rostlinných organismů na povrchu Země. Nezbytnou energii pro svoji existenci přijímá biosféra ze Slunce. Sluneční energie je v organismech vázána prostřednictvím *fotosyntézy* zelených rostlin a fytoplanktonu. Z celkové energie  $1,8 \cdot 10^5$  TW záření dopadajícího na naši planetu je fotosyntézou vázáno půl tisícin, tj. 90 TW. V průběhu fotosyntézy je sluneční energie chemicky vázána ve formě cukrů, škrobů a jiných organických látek. Od zelených rostlin a fytoplanktonu přejímají tuto energii ve formě potravy téměř všechny živé organismy na Zemi. Chemickou energii přijaté potravy využívají k pohybu, ohřátí, zbytek uvolňují povrchem těla či dýcháním. Zatímco fotosyntéza ukládá sluneční energii do potravy, dýchání a spalování tuto uskladněnou energii z potravy uvolňuje.

### Interakce elektromagnetického záření s atmosférou

#### Rozptyl

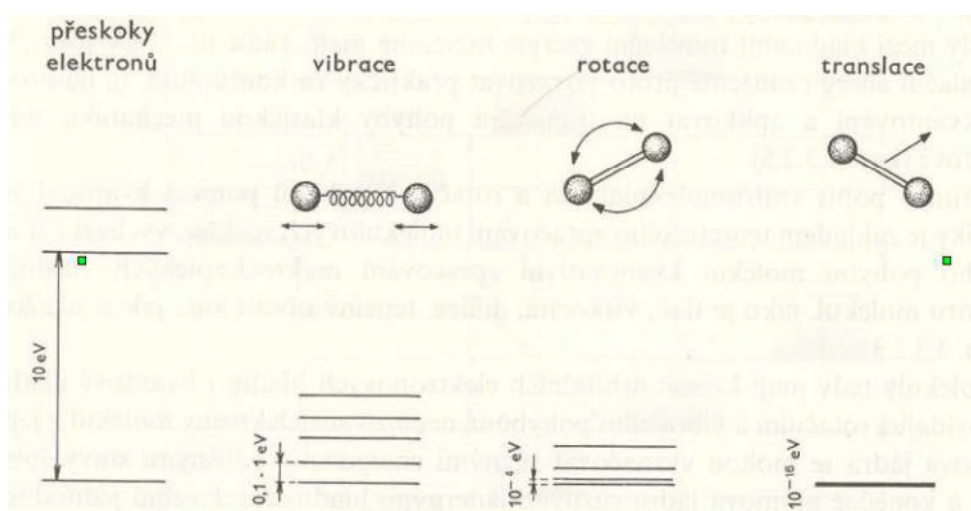
Elektromagnetické záření dopadající na látku z určitého směru, se rozptýlí do jiných směrů. Pokud přitom nedojde ke změně energie fotonu a tedy vlnové délky daného záření mluvíme o tzv. *koherentním rozptylu*. Příkladem koherentního rozptylu je *Rayleighův rozptyl*, který

můžeme pozorovat jako rozptyl bílého světla v atmosféře (nejvíc se rozptyluje modré světlo – proto je obloha modrá a Slunce při západu naopak jeví červeně). Tento jev způsobuje rozptyl světla na molekulách vzduchu.

Při nekoherentním rozptyl dochází ke změně vlnové délky, např. **Comptonův jev** (rozptyl RTG záření na volných elektronech) nebo **Ramanův rozptyl** (interakce fotonů s vibračními a rotačními stavy atomů nebo molekul).

### Absorpce

Elektromagnetické záření může být absorbováno látkou. Při tomto procesu dopadající fotony předají svoji energii absorbující látce, kterou excitují. Pro volné atomy je typické, že pohlcují záření pouze určitých vlnových délek, jejich absorpční spektrum je čárové. Pokud je atom vázán v molekule, absorpční spektrum má obvykle formu spojitých absorpčních pásů, což znamená, že jsou pohlcovány pouze určité intervaly vlnových délek z celého spektra. V případě molekul se energie pohlcených fotonů spotřebuje na excitaci elektronů v jejich atomech, ale také ke zvýšení vibrací či rotací molekul, nebo dokonce k jejich rozpadu – disociaci, viz obr. 25.



Obr. 25: Způsoby absorpce fotonu v molekule

### Skleníkový efekt

Některé plyny v atmosféře mají schopnost pohlcovat infračervené paprsky, které vyzařuje povrch Země. Tento jev, nazývaný **skleníkový efekt**, přispívá k udržování teplot vhodných pro existenci života. Plyny dusík a kyslík, které tvoří převážnou část atmosféry (99%), záření ani nepohlcují ani nevysílají. Vodní pára, oxid uhličitý a některé další plyny, obsažené v ovzduší v mnohem menším množství, určitou část tepelného záření, jež opouští povrch Země,

pohlcují; tyto plyny působí tedy na vyzařování jako částečná „pokrývka“ a způsobují rozdíl asi 21°C mezi skutečnou průměrnou povrchovou teplotou na Zemi, jež se pohybuje kolem 15°C a hodnotou – 6°C, kterou by měla atmosféra obsahující pouze kyslík a dusík, viz obr. 26

Působení této „pokrývky“ se nazývá **přirozený skleníkový efekt** a příslušné plyny se označují jako **skleníkové plyny**. Tento účinek je označen jako přirozený proto, že všechny uvedené plyny jsou přirozenou složkou atmosféry. Pozorujeme ho i u jiných planet, především na Venuši (povrchová teplota okolo 500°C), ale i na Marsu, kde způsobuje oteplení o 10°C oproti stavu bez atmosféry.





Obr. 26: Principiální schéma skleníkového efektu

Působení této „pokrývky“ se nazývá **přirozený skleníkový efekt** a příslušné plyny se označují jako **skleníkové plyny**. Tento účinek je označen jako přirozený proto, že všechny uvedené plyny jsou přirozenou složkou atmosféry. Pozorujeme ho i u jiných planet, především na Venuši (povrchová teplota okolo 500°C), ale i na Marsu, kde způsobuje oteplení o 10°C oproti stavu bez atmosféry.

O **zvýšeném skleníkovém účinku** mluvíme v případě zvýšení účinku způsobeného plyny přítomnými v atmosféře vlivem aktivit lidí, jako je např. odlesňování a spalování fosilních paliv. Pojem skleníkový efekt se užívá podle podobnosti vlastností skla ve skleníku a zemské atmosféry. Záření slunce prochází sklem do skleníku, kde je rostlinami a půdou uvnitř skleníku absorbováno. Avšak tepelné záření vyzařované ohřátou zemí rostlinami a půdou je sklem pohlcováno a zadrženo. Sklo tedy v tomto případě funguje jako „příkrývka“, která pomáhá udržet ve skleníku teplo.

Ze Slunce dopadá na Zem elektromagnetického záření, jehož nejvýznamnější část tvoří záření o vlnové délce v intervalu 300 – 2500 nm (viditelné a infračervené záření), které tvoří až 98% dopadajícího záření. Ultrafialové záření je převážně pohlceno ozonovou vrstvou. Část dopadajícího záření je odražena zemskou atmosférou a oblaky, zbývající záření proniká až na zemský povrch, kde je pohlceno. Energie pohlceného záření se transformuje na teplo, zemský povrch se ohřívá.

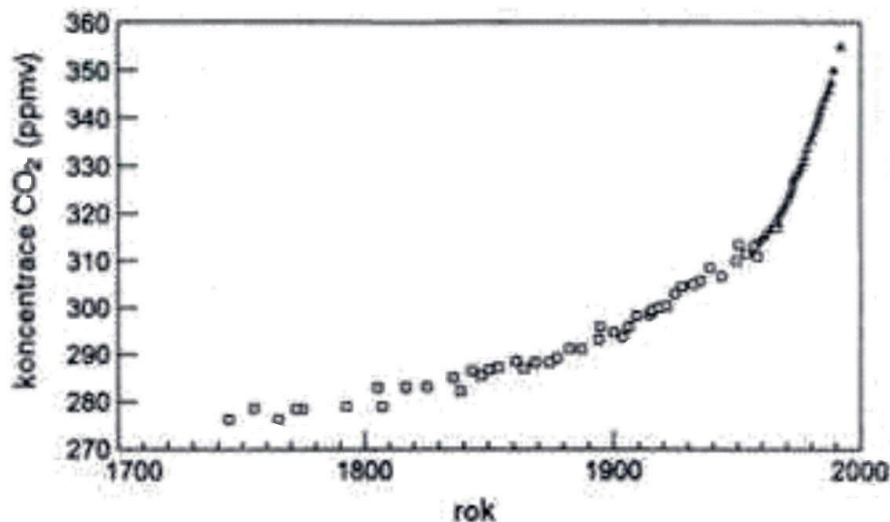
Ohřátý povrch pak vyzařuje tzv. **tepelné záření**, což je elektromagnetické záření především v infračervené oblasti spektra. Atmosféra obsahující plyny jako vodní páru, oxid uhličitý a další tzv. skleníkové plyny, toto záření nepropustí dále do kosmického prostoru, dochází k jeho absorpci a jeho energie je tak zadržena v přízemních vrstvách atmosféry nebo vyzářena zpět na zemský povrch, výsledkem je oteplení přízemních vrstev atmosféry.

Teplota zemského povrchu a spodních vrstev atmosféry je tedy jen z malé části výsledkem přímého slunečního záření, protože většina tepla pochází z tepelného vyzařování zemského povrchu. Proto jsou spodní vrstvy atmosféry teplejší a teplota směrem od zemského povrchu klesá. Průměrná energie dopadající na 1 m<sup>2</sup> vodorovného povrchu ležícího mimo atmosféru činí asi 343 W. Celková bilance záření je následující:

- 30 % z celkového dopadajícího záření se odráží zpět do vnějšího prostoru od oblaků, molekul plynů atmosféry a povrchu souše a oceánů,
- 70 % je pak pohlcováno a vyzařováno zpětně ve formě tepla ze souše a oceánů (12 %), z oblaků (10 %) a skleníkovými plyny (48 %).

### Skleníkové plyny

K nejdůležitějším skleníkovým plynům, jejichž koncentrace se zvyšuje vlivem lidských aktivit, patří oxid uhličitý, metan a oxid dusný



Obr. 27: Časový průběh změn koncentrace CO<sub>2</sub>

### Oxid uhličitý – CO<sub>2</sub>

Je jedním z hlavních zprostředkovatelů transportu uhlíku mezi mnoha přirozenými depozity uhlíku (např. biosféra – odumřelá biomasa, oceán). Na souši, kdy je vázán v horninách, jsou jeho zásoby mnohem větší, než ve vzduchu. Uvolnění pouhých 2% oxidu uhličitého uloženého v oceánech by množství atmosférického CO<sub>2</sub> zdvojnásobilo. Z měření vrtných jader z ledovců dochází přibližně od roku 1700 k narůstání množství atmosférického CO<sub>2</sub>, viz obr. 27. Předpokládá se, že jeho celkový podíl na skleníkovém jevu je asi 60%.

### Metan – CH<sub>4</sub>

Je hlavní složkou zemního plynu. V bažinatých oblastech, kde dochází k rozkladu organického materiálu, probublává k povrchu. Podle údajů z vrtných jader ledovců se koncentrace CH<sub>4</sub> za posledních 250 let více než zdvojnásobila a stoupá v průměru o 1% ročně. Přestože je koncentrace metanu v atmosféře mnohem menší než koncentrace oxidu uhličitého (175krát), není jeho skleníkový účinek zanedbatelný, vzhledem k tomu, že efekt způsobený molekulami metanu je přibližně 7,5krát větší než efekt způsobený molekulami oxidu uhličitého.

### Oxid dusný – N<sub>2</sub>O

Je v atmosféře zastoupen v menším množství (6,7krát méně než metan) a ročně stoupá o 0,25%. Významným zdrojem, který přispívá ke zvyšování jeho obsahu, jsou podle výsledků měření automobily. Životnost v ovzduší je relativně dlouhá – okolo 120 let, tedy nejvíce z uvedených plynů.

### Vodní páry – H<sub>2</sub>O

Jejich množství kolísá 0,2 do 4%, jejich zdrojem je obecně hydrosféra, oceány, moře, jezera

ale také lesy. V tomto případě nehrozí změny koncentrace. Vše by se ale mohlo změnit s příchodem vodíkového hospodářství, jedna z alternativ náhrady fosilních paliv, jeho odpadním produktem jsou právě vodní páry.

Mezi skleníkové plyny patří také **ozón** a **freony**, o nichž jsme již hovořili v souvislosti s ozonosférou.

### **Sopečná činnost**

V minulosti Země, kdy existovala rozsáhlá sopečná aktivita, byly vulkány zejména v počátcích formování atmosféry hlavním zdrojem CO<sub>2</sub>. V současném období pochází ze sopečné činnosti méně než 1 % celkového množství CO<sub>2</sub>, a proto jde o téměř zanedbatelný příspěvek ke globálním koncentracím. Sopečná činnost byla již po tisíce let součástí přírodního cyklu. Například dosud činná sopka Etna na Sicílii, emituje ročně přibližně 25 mil. t CO<sub>2</sub>. Pro srovnání, poslední erupce sopky Sv. Helena přispěla do atmosféry pouze 2 mil. t CO<sub>2</sub>. Objevují se však názory, že je podceňován vliv podmořských vulkánů, které nejsou dostatečně zmapovány.

Podle některých odhadů existuje až tři miliony podmořských vulkánů. Podle webových stránek časopisu New Scientist tento odhad vyplývá z výzkumů britských vědců. Přes 200 000 sopek vystupuje nejméně 100 metrů nad povrchem dna a asi 39 000 z nich pak dosahuje výšky přes tisíc metrů. Satelity mohou určit vulkány, které se tyčí do výše převyšující 1500 metrů nade dnem. Nižší sopky nemohou být tímto postupem rozpoznány. Identifikovány však mohou být pomocí lodních sonarů. Od konce 60. let minulého století výzkumná plavidla vybavená sonarovými aparaturami vytvořila profily 40 milionů km oceánského dna. Až dosud však nikdo nebyl schopný tyto záznamy zanalyzovat. Hillier a jeho kolegové vytvořili počítačový program pro identifikaci „sopečných“ útvarů. Software tak objevil 201 055 vulkánů vyšších než 100 metrů. Dosavadní satelitní data určila 14 164 vulkánů nad 1500 metrů.

### **Další přirozené zdroje skleníkových plynů**

Významným zdrojem CO<sub>2</sub> mohou být:

- rozsáhlé lesní požáry,
- koloběh vody v přírodě jako zdroj vodních par jen málo ovlivnitelný člověkem,
- aerobní bakterie, které se živí organickým materiálem za nepřístupu kyslíku (mokřady, rýžoviště, zaplavená území, skládky),
- metan produkovaný procesy trávení, tzv. fermentací v žaludcích býložravců.

Mnoho dalších přirozených zdrojů skleníkových plynů není dostatečně prozkoumáno.

### **Vnitřní proměnlivost klimatu a antropogenní činnost**

#### **Klima**

Tradiční definice klimatu, o něm hovoří jako o průměrném stavu ovzduší (teplota, tlak, vlhkost, síla a směr proudění) nebo počasí (déšť, sněžení, vichřice apod.) v dané oblasti. Taková definice je popisná nezahrnuje zákonitosti dynamiky, které jsou pro změny jednotlivých stavů atmosféry či meteorologických dějů podstatné. Proto se dnes klima definuje jako souhrn všech možných stavů počasí, jehož změny podléhají dlouhodobému režimu, který má své příčiny ve fyzikálních vlastnostech povrchu a stavu i dynamice ovzduší (v současnosti se počítá i s antropogenními vlivy).

**Klimatologie** je věda o klimatu, která:

- sleduje podmínky vzniku konkrétního klimatu,
- studuje příčiny, které vedou k vytvoření těchto podmínek,

- mapuje vývoj a změny zemského klimatu,
- formuluje nebo zatím ještě hledá obecné zákonitosti vývoje klimatu,
- studuje a modeluje působení klimatu na přírodu a civilizaci.

### Vnitřní proměnlivost klimatu

Je označení pro přirozené dlouhodobé výchylky klimatu, které mají svůj původ přímo v klimatickém systému samotném a ke kterým by docházelo i bez vnějšího zásahu, často se míní bez zásahu člověka. Dochází k ní vzájemným ovlivňování oceánů, povrchu a ovzduší, které je určující pro dynamiku celého systému.

V průběhu vývoje Země, docházelo k rozsáhlým změnám klimatu, např. doby ledové, měnila se teplota ovzduší a koncentrace skleníkových plynů v něm obsažených. Takové změny probíhaly i v nedávné minulosti historie Země a dochází k nim i v současné době. Jedná se ovšem o velmi pomalé změny. Proto je velmi obtížné odhadnout, jak velký podíl mají na příslušných změnách přirozené procesy a co je způsobeno lidskou činností.

Poslední sledování a modely klimatu ovšem ukazují, že pozorované změny jsou jen z části způsobeny přirozenými procesy resp. dlouhodobými trendy. Zdá se, že významný podíl na těchto změnách souvisí s lidskou činností, především pak s emisí skleníkových plynů.

### Emise skleníkových plynů způsobené lidskou činností

V tab. 10 je zobrazen vývoj změn koncentrace skleníkových plynů v atmosféře. Kromě halogenovaných uhlovodíků, souvisejících s lidskou činností, se jedná o skleníkové plyny, které v atmosféře byly i v minulosti. Samozřejmě i u nich může dojít k jejich ovlivnění lidskou činností. Lze to dokumentovat na příkladu ozónu, kterého ubývá, nebo v případě CO<sub>2</sub>, kterého naopak přibývá i v důsledku spalování fosilních paliv.

V této souvislosti je nutné poznamenat, že spalováním se mohou uvolňovat i další látky např. pevné aerosoly, které zahrnujeme mezi škodliviny, které ovšem nejsou skleníkovými plyny, např. SO<sub>2</sub>, ale naopak mohou záření kratších vlnových délek odrážet a tak způsobit ochlazování.

Tab. 10: Přehled vývoje změn koncentrace skleníkových plynů v atmosféře

Skleníkový plyn	Vzorec	Procentuální zastoupení v atmosféře	Relativní účinnost	Dosavadní nárůst	Podíl na zvýšeném skleníkovém efektu
vodní pára	H <sub>2</sub> O	0,2 - 3	1	?	kolem nuly
oxid uhličitý	CO <sub>2</sub>	0,036	1	31%	61%
metan	CH <sub>4</sub>	0,0002	50	20%	19%
oxid dusný	N <sub>2</sub> O	0,00003	310	5%	6%
ozón	O <sub>3</sub>	proměnlivé	?	spíše úbytek	0%
halogenované uhlovodíky	CFC	3 · 10 <sup>-8</sup>	asi 5000	veškeré množství v atmosféře	14% - nejisté
	HCFC	1 · 10 <sup>-8</sup>	asi 5000		
	CF <sub>4</sub>	1 · 10 <sup>-8</sup>	6500		
	HFC	10 <sup>-10</sup>	1300		

Oxid dusný uniká v řadě zemědělských procesů a emise halogenovaných fluorovodíků souvisejí s rozvojem chladírenské a klimatizační techniky. Rovněž mýcení lesů mění přirozenou rovnováhu oxidu uhličitého v systému a snižuje pohlcování oxidu uhličitého vegetací. Je nesporné, že člověk se na zesilování přirozeného skleníkového efektu atmosféry významně podílí.

## 10 Současnost klimatu a prognózy do budoucna, důsledky klimatických změn

### Monitorování oteplení

Pro kvantitativní odhad velikosti oteplování jsou obvykle využívány výsledky dlouhodobých meteorologických záznamů průměrné roční teploty vzduchu. V meteorologii se provádí tzv. *klimatická měření*, kdy se určují v daném místě okamžitá, maximální a minimální teplota vzduchu. Z archivovaných dat vyplývá, že od konce 19. století vzrostla teplota v průměru o  $0,6 \pm 0,2$  °C. Střednědobé údaje jsou dále doplňovány o výsledky výzkumů v oblasti paleoklimatologie, která odhaduje historický vývoj klimatu nepřímo rozborem hornin, ledovcových vrtů, letokruhů apod. Na základě všech dostupných dat sestavují vědci modely vývoje klimatu a pomocí počítačových modelů simulují vývoj klimatu až na několik století dopředu.

### Prognóza vývoje teploty na základě modelů

Důsledkem zvýšeného skleníkového jevu je tzv. *globální oteplování*. Globální zvýšení průměrné teploty na zemském povrchu vyvolané zdvojnásobením koncentrace CO<sub>2</sub> se odhaduje v rozpětí 1,5 až 4,5°C.

Navazujícím problémem je předpověď dalšího vývoje změn klimatického systému. Samotné procesy, které se na oteplování podílejí, nejsou jednoduché a navíc jsou propojeny složitými vazbami. V laboratoři se dají studovat samotné procesy, u vazeb už je to mnohem složitější. Proto je nutné znát také vývoj změn klimatu v minulosti. Pokud popíšeme chování klimatického systému pomocí rovnic, které popisují nejdůležitější fyzikálně chemické zákonitosti nebo alespoň jejich nejdůležitější rysy, získáme *numerický model*.

Vyřešení příslušných rovnic umožňuje získat informace o vývoji modelu, získáváme tak možnou předpověď budoucího vývoje skutečného klimatického systému. V poslední době jsou prováděny numerické simulace klimatických změn, které se snaží získat přesnější předpovědi zahrnutím dalších vlivů, např. vliv sopečných činností, nehomogenit v oceánském proudění a zejména antropogenních vlivů. Bohužel, řada z nich není dosud ještě zcela zmapována. Proto je třeba stále pracovat s předpoklady o různé důležitosti jednotlivých vlivů.

Některé z modelů dnes již zahrnují složité dynamické vnitřní i vnější časoprostorové vztahy v atmosféře, v oceánech, v ledovcích i v biosféře a jejich součinnost se zemským povrchem. Přesto však reálný klimatický systém popisují pouze přibližně. Jejich výstupy nelze považovat za předpovědi, ale pouze za projekce dalšího vývoje. S ještě většími problémy se setkáváme, chceme-li tyto výstupy použít pro regionální měřítka.

### Jaké změny můžeme očekávat?

Vývoj budoucího klimatu nelze popsat bez odhadu budoucí socioekonomické situace ve světě. Proto byl připraven soubor scénářů SRES, které reagují na předpokládaný populační nárůst, technologický rozvoj, stav energetických zásob, nové zdroje energie apod. Většina modelů se dnes shoduje v tom, že do konce 21. století by se mohla průměrná globální teplota zemského povrchu oproti současnému stavu zvýšit o 1,9 až 4,3 °C. Během první poloviny století by teplota měla vzrůst v rozpětí 1,3 až 1,9 °C. V druhé polovině století by horní hranice rozpětí 4,3 °C, mohla být dosažena v případě, že dojde k naplnění nejméně příznivého, kritického scénáře. Ten předpokládá existenci světa s nižší mírou globalizace, další přibývání obyvatel, rozdílný ekonomický růst v různých regionech a v rozvojových zemích pomalé zavádění moderních technologií. Konzervativní odhady naznačují, že je dnes již téměř vyloučené, aby během tohoto století globální teplota vzrostla o méně než 1 °C, ale na druhé straně je nepravděpodobné, že by vzrostla o více než 6 °C.

## **Nežádoucí meteorologické jevy jako možný následek klimatických změn**

V atmosféře může následkem globálního oteplování dojít k následujícím změnám:

- velké ochlazení stratosféry. Snížená koncentrace ozónu v horních vrstvách atmosféry způsobí sníženou absorpci ultrafialové složky slunečního záření a tedy snížený ohřev,
- zvýšení průměrných srážek v globálním měřítku. Zvýšené ohřívání zemského povrchu způsobí větší vypařování a zvýšené množství vodních srážek. V některých regionech by mohlo dojít naopak k úbytku srážek,
- letní kontinentální oteplení a sucho,
- vlny veder a hurikány,
- zvýšené množství srážek v pásmu vyšších zeměpisných šířek,
- snížení oteplení polárních oblastí v zimním období a snížení celkového zalednění moří,
- tání ledovců se všemi důsledky.

V důsledku tání ledovců dojde ke zvedání hladiny oceánů. Dokonce i relativně malé zvýšení hladiny oceánů způsobí neobyvatelnost některých hustě osídlených pobřežních rovin a přinese značné problémy s uprchlíky. Pokud by vzrostla hladina moře o více než 4 metry, bylo by těžce zasaženo téměř každé pobřežní město na světě s velkými potenciálními důsledky na světový obchod a ekonomiku. V současnosti IPCC (mezivládní výbor OSN pro změnu klimatu) předpovídá nárůst hladiny moře o 1 metr do roku 2100, ale také varuje, že globální oteplení během této doby může vést k nevratnému úbytku ledovců a stoupenutí hladiny moří oproti minulému miléniu o několik metrů. Odhaduje se, že změna se dotkne okolo 200 milionů lidí, zvláště ve Vietnamu, Bangladéši, Číně, Indii, Thajsku, na Filipínách, v Indonésii a v Egyptě.

### **Územní diferenciaci důsledků klimatických změn**

Nelze předpokládat, že bude oteplování klimatického systému všude na planetě stejné. Více vzroste teplota nad pevninami a ve vyšších zeměpisných šířkách, méně nad oceánem a v nižších zeměpisných šířkách. Extrémně vysoké teploty se budou vyskytovat častěji než extrémně nízké. Obtížnější je projekce srážkového režimu. Modely ještě nedokážou přesně simulovat složité mechanismy atmosférické cirkulace. Lze ale vymezit oblasti předpokládaného úbytku, nebo naopak nárůstu vlhkosti, a tedy oblasti snížených či zvýšených srážkových úhrnů. S vyšší mírou nejistot jsou spojeny odhady podrobnějšího vývoje proměnlivosti klimatu a pravděpodobnosti výskytu extrémních jevů. Zejména ve středních zeměpisných šířkách severní polokoule lze očekávat výraznější kolísání počasí. Zatím se těžko odhaduje regionální rozložení klimatických charakteristik, protože dosud není k dispozici dostatek věrohodných podkladů.

## **11 Boj se změnou klimatu a alternativní názory**

### **Česká, evropská a světová legislativa v oblasti boje proti změnám klimatu**

Problém klimatických změn nespočívá pouze v tom, že dochází k oteplení planety. Důležitější je, že se mění chování klimatického systému, v němž budou převažovat negativní jevy. Dopady klimatické změny se projeví ve vodohospodářství, zemědělství, lesnictví, na celých ekosystémech, na ekonomické prosperitě, na duševní pohodě a na lidském zdraví. Obecně platí, že ekonomicky méně vyspělé oblasti budou klimatickou změnou zranitelnější.

Nabízejí se dvě řešení. Buď se snažit vliv člověka omezovat, tj. zaměřit se na snižování emisí skleníkových plynů, zmenšování ozonové díry atd., nebo se klimatickým změnám přizpůsobit a hledat způsoby omezování negativních dopadů klimatických změn. Obě cesty mají své opodstatnění a nebylo by správné vydat se pouze jednou z nich. Měli bychom se daleko více

než dosud zaměřit na zpřesňování odhadů budoucích změn a předpovědí extrémních výkyvů počasí. Nelze podceňovat ani investice do účinných varovných systémů, které mohou ochránit lidské majetky i životy. V zájmu dodržování principu předběžné opatrnosti rozhodně není na místě nečinnost, protože klima planety se skutečně mění.

**Kjótský protokol** k Rámcové úmluvě Organizace spojených národů o klimatické změně uzavřený v roce 1997 na Třetí konferenci smluvních stran v Kjótu je základním dokumentem dlouhodobých mezinárodních snah o zamezení nebo zpomalení globálního oteplování. Je také první právně závaznou mezinárodní dohodou o ochraně klimatu založenou na tržních mechanismech, která si klade za cíl dosáhnout v relativně krátkém časovém úseku významného snížení produkce emisí skleníkových plynů.

### **Střety vědeckých názorů a využívání vědy k prosazování politických cílů**

Obecným problémem současné klimatologie a vědy vůbec je skutečnost, že vědecký výzkum je až příliš rozsáhlý. Vědci jsou pohlceni vývojem ve vlastním oboru a nedokáží svůj výzkum průběžně přizpůsobit výsledkům jiných oborů. Informací je tolik, že je velmi těžké sjednotit dostupné poznání do smysluplného celku, jako se o to pokoušely předchozí generace.

Pro vysvětlení pozorovaného nárůstu globálních teplot jsou k dispozici i jiné, alternativní názory, např.:

- velikost pozorovaného oteplování leží doposud v rozmezí přirozeného dlouhodobého kolísání teplot,
- oteplování je důsledkem odeznění předcházejícího chladného období – malé doby ledové,
- oteplování je důsledkem dlouhodobého kolísání intenzity slunečního záření,
- trend oteplování je z předkládaných dat prozatím neprůkazný a jedná se pouze o statistické kolísání hodnot,
- vliv člověka není významný, klima je chaotický systém, který se otepluje z neurčitelných příčin.

Stejně jako jiné oblasti lidské společnosti i věda se může stát předmětem politických cílů, můžeme to ilustrovat na příkladu závodu o dosažení Měsíce, ke kterému došlo mezi USA a SSSR v minulém století. Jakkoliv byly cíle zdůvodňovány dosažením pokroku ve vědě, hlavním impulsem k vyhlášení měsíčního projektu byly cíle politické – získání prestiže technologicky vyspělé velmoci.

### **Možný vliv ekonomických zájmů**

Alternativní teorie ať už z toho či onoho tábora mohou rovněž posloužit politickým cílům či hospodářským zájmům. Na jedné straně jsou to pochopitelně lobby stávajících průmyslových výrobců, jejichž zisky plynou např. z využití spalování fosilních paliv. Na druhé straně to mohou být na první pohled ušlechtilé zájmy skupin, které prosazují nové zatím drahé technologie.

### **Alternativní technologie**

O slunečních nebo větrných elektrárnách a biopalivech jsme již pojednali v souvislosti s jadernou energetikou v kapitole 3. Podívejme se blíže na tzv. **vodíkové hospodářství**.

**Vodík** – lehký a prakticky všudypřítomný plyn, je schopen transformovat po snadném přenosu a rozvodu potrubím nebo v kapalném stavu svou energii nejen spalováním, ale i přímou přeměnou v palivových článcích na elektřinu. V kterémkoliv stavu je schopen akumulovat velké množství elektrické energie např. ze slunečních článků nebo z větrných elektráren. Je schopen pohánět spalovací i turbínové motory. Není jedovatý a odpadním produktem jeho

spalování je jen voda nebo pára. Dílčí technologie byly již v několika průmyslových projektech vyzkoušeny. Otázka, kdy a jak s nimi začít v praxi, je vázána na jeho levnou výrobu. V současné době svět je roční spotřeba průmyslového vodíku asi 250 mil. tun. Získává se převážně ze zemního plynu, štěpením ropy v petrochemických kombinátech nebo konverzí fosilních paliv paro-kyslíkovou směsí. Zavádějí se i technologie využívající termochemické procesy na katalyzátorech.

Nejčistější vodík se získává rozkladem vody elektrickým proudem – elektrolýzou. Je to děj, při kterém se na elektrodách připojených na stejnosměrné napětí a ponořených do vodného roztoku (voda s hydroxidem draselným nebo sodným) uvolňuje na anodě kyslík a na katodě dvojnásobné množství vodíku. Současné pokročilé tlakové elektrolyzéry používají jako elektrody iontové membrány, nebo rozkládají vodní páru na keramickém elektrolytu z oxidu zirkoničitého. Na výrobu 1 kg H<sub>2</sub> spotřebují 45 kWh.

Účinnost výroby vodíku se podle použité metody pohybuje od 40 do 60 %. Cena kg vodíku je ve většině zemí srovnatelná s kg propanu nebo ropy. Ke zkapalnění kilogramu vodíku je třeba vynaložit 40 až 50 MJ. Vodík lze přepravovat při dodržení příslušných bezpečnostních opatření potrubím pod tlakem jako zemní plyn. Přepravuje se i v tlakových nádobách pod tlakem 20 až 35 MPa. V kapalném stavu, při teplotě -253 °C, se dopravuje trajlery nebo speciálními tankery a uchovává se v kryogenních, dobře izolovaných nádržích, obvykle při mírném přetlaku 0,4 MPa. Problém s jeho uložením v palivových nádržích dopravních prostředků s vodíkovými motory vyřešilo vázání vodíku na kovy v podobě hydridů kovů. Nádobu vyplněná porézním kovem ve formě slinutého kovového prášku, např. na bázi lanthanu a niklu při tlaku 0,5 MPa pohltí tolik vodíku, jako tisíckrát objemnější nádrž plynu. V 10 cm<sup>3</sup> titanových třísek se dá takto uskladnit 160 litrů vodíku. Když se náplň mírně zahřeje, vodík se uvolní.

### **Využití vodíku**

V palivových člancích vydá čistý plynný vodík spolu s kyslíkem např. ze vzduchu, elektrochemickou reakcí za mírné nebo vyšší teploty, stejnosměrný elektrický proud přímou přeměnou s účinností 70 až 90 %, bez hluku a exhalací.

Při přímém spalování vykazuje dvojnásobnou výhřevnost než např. benzín. Hoří pětikrát rychleji než zemní plyn. Katalytické spalování probíhá při teplotách pod 500 °C s mírnými emisemi NO<sub>x</sub>. Jestliže se do hořícího plynu s teplotou 1000 - 3000 °C vstříkne voda, která předtím chladila stěny spalovací komory, mění se hořák v generátor páry. Tzv. vodíko-kyslíkové vyvíječe páry mohou být i levnější než klasické kotle pro spalování fosilních paliv.

Vodík se hodí jak k pohonu pístových motorů s vnitřním spalováním, tak k pohonu plynových turbín. V pístových motorech hoří rychle, maximální emise NO<sub>x</sub> jsou srovnatelné s benzínovými motory. U leteckých turbín se příznivě uplatňuje vysoká energetická hustota vodíkového paliva, nižší hmotnost motoru a fakt, že lopatky jsou obtékány mnohem méně agresivními plyny.

### **Prognóza možných negativních důsledků alternativních technologií**

Jako příklad uveďme opět možné důsledky vodíkového hospodářství. Je třeba si uvědomit, že vodíkové technologie jsou pouze tak ekologicky čisté, jak čisté jsou zdroje energie a suroviny, které jsou při jeho výrobě využity. Při některých způsobech výroby mohou být produkovány škodliviny. Možným velkým problémem přímého využití vodíku, jak ukazují některé poslední studie, je schopnost uniklého vodíku (při výrobě, dopravě, přečerpávání) napomáhat likvidaci ozónové vrstvy. Vodíkové spalovací motory používané v masovém měřítku lokálně ovlivní obsah vody v atmosféře.