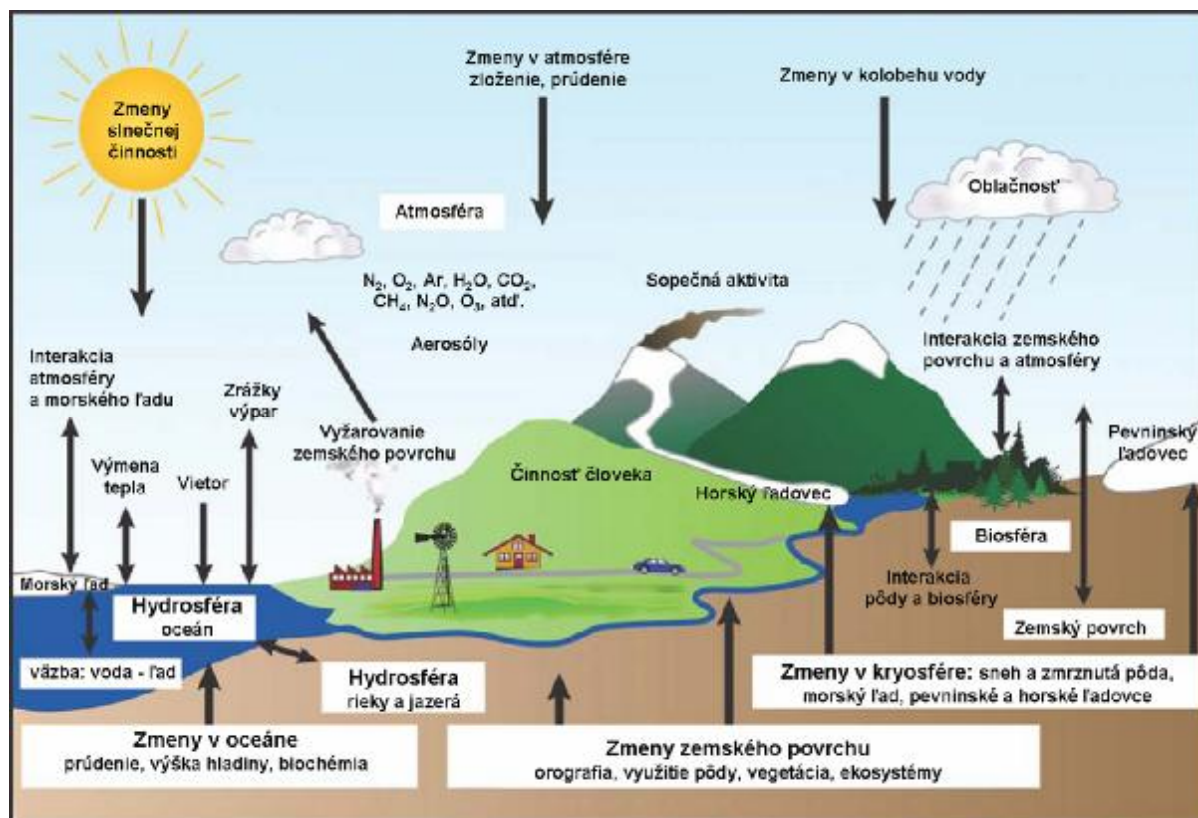


## Klimatický systém Zeme

Hrozba zmeny klímy a jej negatívnych dôsledkov predstavuje v súčasnosti veľmi vážny a bezprostredný problém. Najnápadnejším prejavom klimatickej zmeny je bezpochyby **globálne otepľovanie**, prejavujúce sa tak na pevninách ako aj na oceánoch. Otepľovanie na pevninách so sebou prináša celý rad pozoruhodných, predovšetkým negatívnych dôsledkov. Zvyšovanie priemernej teploty vzduchu nepriaznivo ovplyvňuje predovšetkým prírodné ekosystémy, ktoré sa len veľmi ťažko tejto zmene prispôbujú. Popri čoraz častejších extrémnych prejavoch počasia (vlny horúčav, dlhšie trvajúce a intenzívnejšie sucho, silnejšie a prudšie búrky, a pod.) treba do budúcnosti počítať najmä s rozšírenejším výskytom hmyzích a iných škodcov ako aj ľudských patogénov. Ďalším významným dôsledkom klimatickej zmeny bude zásadné ovplyvnenie vodných zdrojov všade na svete. Mimoriadne ohrozené sú najmä horské ľadovce, ktorých výrazný ústup, pozorovaný v súčasnosti, ovplyvní dostupnosť vodných zdrojov predovšetkým v Ázii a Latinskej Amerike. Závažnú hrozbu predstavuje, a to aj v našich zemepisných šírkach, častejší výskyt nebezpečných poveternostných javov, akými sú búrky, víchrice, povodne a v tropických oblastiach najmä hurikány a tajfúny. V bezprostrednom ohrození sú taktiež pobrežné a ostrovné oblasti, ktoré už v súčasnosti musia riešiť mnohé problémy spojené s nárastom hladiny svetových oceánov.

Pri posudzovaní a hodnotení klimatických zmien treba odlišovať prirodzené zmeny klímy a ľuďmi podmienenú zmenu klímy. Klimatickými zmenami nazývame len klimatické zmeny prirodzeného charakteru, teda najmä zmeny v minulých geologických dobách Zeme, ľadové doby, sekulárne zmeny, niekedy aj nízkofrekvenčné kolísanie klímy. V minulosti však prebiehali za podstatne dlhšie obdobia ako dnes. V súčasnosti pozorujeme nezvyčajné a extrémne počasia, ako horúce letá a teplé zimy. Tieto anomálie počasia s najväčšou pravdepodobnosťou súvisia s klimatickou zmenou, resp. globálnym otepľovaním. Pod pojmom "**zmena klímy**" (klimatická zmena) rozumieme iba tie zmeny v klimatických pomeroch, ktoré súvisia s antropogénne podmieneným rastom skleníkového efektu atmosféry od začiatku priemyselnej revolúcie (asi od r 1750), ak ich vieme odlíšiť od zmien prirodzených.

Treba zdôrazniť, že podnebie alebo klíma nie je to isté ako počasia. Pod pojmom počasia rozumieme aktuálny stav atmosféry charakterizovaný súborom vybraných meteorologických prvkov (teplota vzduchu, oblačnosť, tlak vzduchu a jeho vlhkosť, smer a rýchlosť vetra, atď.). Na rozdiel od počasia je **klíma (podnebie)** charakteristický režim počasia v danej oblasti hodnotený v rámci dlhšieho obdobia. Za účelom charakterizovať klímu daného regiónu sa pre celý rad meteorologických prvkov (teplota vzduchu, atmosférické zrážky, vlhkosť vzduchu, tlak vzduchu, smer a rýchlosť vetra, snehová pokrývka a pod.) počítajú štatistické charakteristiky (priemery, extrémny, denný a ročný chod, premenlivosť, početnosť dní a pod.) za dostatočne dlhé obdobie, spravidla za najmenej 30 rokov. Premennosť klímy, teda dlhodobých charakteristík, je podstatne menšia ako premenlivosť počasia. Klimatický systém Zeme sa skladá z atmosféry, hydrosféry, kryosféry, litosféry, biosféry a noosféry (aktivity človeka), preto aj zmeny klímy sú veľmi komplexné a podieľa sa na nich viacero činiteľov a faktorov (synergický efekt).



Obr. 1 Schéma základnej časti klimatického systému Zeme. Zdroj: Le Treut et al. (2007)

**Klíma** je výsledkom vzájomnej interakcie viacerých faktorov. Z najvýznamnejších je možné uviesť napríklad faktory mimozemské (slnéčné žiarenie, zmeny parametrov orbitálnej dráhy Zeme), vlastnosti zemského povrchu (rozloženie pevnín a oceánov, sopečná činnosť, vegetácia) a samozrejme aj zmeny vo vnútri samotného klimatického systému (chemické zloženie, biologické procesy a zmeny, zmeny vo využívaní pôdy, emisie skleníkových plynov). Prírodné faktory sa v priebehu 20. storočia podieľali asi len 40 % na globálnom náraste teploty vzduchu (približne 0,3 °C z celkového nárastu 0,8 °C za posledné storočie možno vysvetliť pôsobením prírodných faktorov).

Dôležitou vlastnosťou klimatického systému Zeme sú tzv. **spätne väzby**, v dôsledku ktorých sa môžu niektoré počiatkové poruchy zosilňovať (kladné spätne väzby) alebo naopak zoslabovať (záporné spätne väzby). Klasickým príkladom **pozitívnej spätnej väzby** je vzťah medzi teplotou vzduchu a rozsahom polárneho zaľadnenia. Pokles teploty vzduchu môže znamenať zväčšenie rozsahu snehovej a ľadovej pokrývky, čo vedie k výraznejšej schopnosti zemského povrchu odrážať slnečné žiarenie a teda k ďalšiemu poklesu teploty vzduchu v okolí. Naopak príkladom **negatívnej spätnej väzby** môže byť väzba medzi teplotou vzduchu a vývojom kopovitej oblačnosti v lete. Slnéčné žiarenie dopadajúce na zemský povrch spôsobuje ohrievanie prízemných vrstiev vzduchu a vznik výstupného prúdenia (konvekcie), čo vedie k tvorbe kopovitej oblačnosti. Kopovitá oblačnosť však po svojom vzniku začne časť dopadajúceho slnečného žiarenia odrážať a tým preniká k zemskému povrchu menej slnečného žiarenia. Ohrievanie prízemných vrstiev vzduchu sa tým zmierni, čo

utlmí aj samotný proces vzniku kopovitej oblačnosti. Všeobecne sa dá povedať, že pozitívne spätné väzby podporujú nestabilitu klimatického systému, naopak negatívne jeho stabilitu zvyšujú. Miera pôsobenia pozitívnych a negatívnych spätných väzieb sa v klimatickom systéme v priebehu dňa a roka, ako aj od miesta k miestu neustále mení. Z tohto dôvodu je chovanie klimatického systému veľmi zložitá.

## Prejavy klimatickej zmeny na globálnej úrovni

### Teplota vzduchu

Z výsledkov Svetovej meteorologickej organizácie, ktorá vyhodnocuje záznamy zo všetkých meteorologických staníc na svete od roku 1866 vyplýva, že priemerná teplota zemského povrchu je o 0,74 °C vyššia ako bola pred 100 rokmi. Najnovšie analýzy potvrdzujú fakt, že za posledných takmer 160 rokov sa globálna teplota vzduchu zvýšila o 0,8 °C. Desať najteplejších rokov bolo zaznamenaných od roku 1983, pričom 8 najteplejších sa vyskytlo od roku 1990, a to aj napriek erupcii sopky Mt. Pinatubo (1991), ktorá v dôsledku uvoľnenia obrovského množstva prachových častíc do atmosféry spôsobila zníženie intenzity slnečného žiarenia.

V roku 1995 Národné Klimatické Centrum USA oznámilo, že z analýzy počasia v USA za niekoľko desaťročí vyplýva, že teplotné a zrážkové extrémny sú oveľa častejšie v poslednom období ako to bolo v minulosti a sú v zhode s nárastom koncentrácie skleníkových plynov v atmosfére. Podľa správy National Oceanic and Atmospheric Administration sa stal október roku 2001 najteplejším mesiacom v histórii merania teplôt od roku 1880 v USA. Októbrové teploty boli nadpriemerné v 23 rokoch z posledných 25 rokov. Z celosvetového hľadiska bolo obdobie od januára do októbra v roku 2001 druhým najteplejším v histórii. Popri globálnom náraste teploty vzduchu sa výrazne ohrievajú najmä polárne oblasti.

### Horúčavy a sucho

V prvých desaťročiach 20. st. sa v severozápade USA stále viac prejavovalo sucho, ktoré kulminovalo v 30-tych rokoch a od tohto obdobia sa postupne zmiernovalo. V súčasnosti sa sucho prejavuje hlavne v Sahelskej oblasti, kde od 70-tych rokov úbytok vlhky predstavuje až 20 % v porovnaní s predchádzajúcimi 70 rokmi v tejto africkej oblasti.

Päťročné sucho (1986-90) v Kalifornii bolo najdlhším v minulom storočí. Vlna horúčav zasiahla v lete roku 2000 aj južnú Európu, pričom rekordné teploty dosahujúce až 43 °C boli dosiahnuté na viacerých miestach. Takýmito teplotami boli postihnuté Turecko, Grécko, Rumunsko a Taliansko. V Bulharsku bol dosiahnutý 100-ročný teplotný rekord na viac ako 75% meracích staniach. Grécko zasiahlo v roku 2000 niekoľko požiarov počas vlny horúčav, pričom najviac postihnutý bol ostrov Samos, kde oheň zasiahol pätinu jeho rozlohy. Ničivé suchá postihli Európu aj v ďalších rokoch (2003, 2006 a 2007). Austrália bojuje

s dlhodobým suchom už od roku 2003 a len v minulom roku si vyžiadalo viac ako 200 ľudských životov.

## **Povodne**

Jedným z najdaždivejších rokov bol rok 1991 kedy boli najväčšie záplavy v histórii v celej juhovýchodnej Ázii a v Bombaji. Veľké záplavy boli tiež v Egypte, Izraeli, Číne a dokonca aj vo Viedni. V rokoch 1994 a 1995 bola Európa zasiahnutá "storočnými" záplavami, najviac zasiahnutými krajinami bolo Holandsko, Nemecko, Belgicko a Francúzsko. Záplavy boli spôsobené nezvyčajne dlhým obdobím dažďa. Mimoriadne povodne sa vyskytli v priestore strednej Európy aj v rokoch 1997, 1999 a 2002.

## **Stúpanie morskej hladiny**

Z celosvetových pozorovaní vyplýva, že morská hladina stúpala za posledných 100 rokov o 10 až 25 cm. Od roku 1992 do roku 1995 bolo vďaka satelitným meraniam zistené, že hladina morí sa zvýšila o 3 milimetre, čo je trend zodpovedajúci nameranému otepľovaniu atmosféry.

O tom, že stúpanie hladiny mora sa stáva vážnym problémom svedčí aj správa, ktorú vydala agentúra BBC 6. októbra 2001. Podľa tejto informácie na základe zmluvy poskytne Nový Zéland útočisko obyvateľom Pacifického súostrovia Tuvalu, pretože obyvatelia týchto ostrovov v Tichom oceáne sú stále viac ohrozovaní narastajúcou morskou hladinou.

Jednou z ohrozených krajín je aj Holandsko, kde pred morskou hladinou sa ľudia chránia vysokými valmi. Výšku valu v upravovali napr. v obci Pettener už niekoľkokrát od roku 1976, kedy bola len polovičná v porovnaní s dneškom. Avšak ani to nemusí byť dosť. Viac ako polovica územia Holandska sa nachádza pod úrovňou morskej hladiny a väčšia časť ostatného územia je ohrozovaná eróziou pobrežia alebo záplavami. Klíma a jej kolísanie ovplyvňuje ľudí aj ekonomiku. Väčšie výkyvy prirodzene prinášajú aj horšie dôsledky. V posledných rokoch je možné sledovať na Zemi veľké množstvo dopadov prebiehajúcej klimateckej zmeny. Medzi najzávažnejšie dôsledky patria:

1. **výrazný ústup a deštrukcia horských ľadovcov, v dôsledku čoho sa bude zhoršovať dostupnosť vody v riekach,**
2. **výrazný ústup rozšírenia morskeho polárneho ľadového čiapka Arktídy, a to najmä v letných mesiacoch severnej pologule, ďalším negatívnym dôsledkom je zmenšovanie hrúbky morskeho ľadu,**
3. **roztápanie kontinentálnych ľadovcov (Antarktída, Grónsko) a zvyšovanie teploty morskej vody má za následok nárast hladiny svetového oceánu (v súčasnosti o viac ako 3 mm ročne),**
4. **zhoršenie dostupnosti vodných zdrojov v miernych zemepisných šírkach a v suchých subtrópoch, na druhej strane sa zväčší množstvo dostupnej vody vo vyšších zemepisných šírkach a vlhkých oblastiach tropického pásma,**
5. **postupné zväčšovanie plochy územia pravidelne postihovaného suchom a extrémnymi zrážkami, povodňami,**

6. poľnohospodárske výnosy sa vo vyšších zemepisných šírkach, pri náraste globálnej teploty o 1-3 °C, zväčšia (pri výraznejšom náraste teploty však poklesnú aj tam); poľnohospodársku produkciu však celkovo znížia najmä častejšie záplavy a dlhšie obdobia sucha,
7. v teplejšom podnebí možno očakávať väčšie rozšírenie infekčných chorôb, zväčšia sa zdravotné riziká v dôsledku častejšieho výskytu horúčav, sucha a povodní,
8. v dôsledku väčšieho teplotného stresu dôjde k celkovému zníženiu stability prírodných spoločenstiev, napríklad aj v dôsledku častejších požiarov a pod.,
9. očakávaná vyššia kyslosť oceánov bude mať zásadný - negatívny vplyv na morské spoločenstvá,
10. zmeny v kvalite ekosystémov bude mať priamy dopad na pokles druhovej rozmanitosti; pri zvýšení priemernej globálnej teploty vzduchu o 1,5 až 2,5 °C hrozí bezprostredné vymretie približne 20-30 % druhov rastlín a živočíchov;
11. vyššia intenzita a pravdepodobne aj vyššia početnosť výskytu extrémnych a nebezpečných javov počasia, akými sú búrky, povodne, víchrice, prípadne tropické cyklóny;
12. rýchlejší ústup a deštrukcia permafrostu (trvalo zamrznutá pôda) zväčšuje nestabilitu pôdy, v ktorej sa obnovujú hnilobné procesy vedúce k nárastu emisiám metánu (prevažne vo oblasti lesov severného mierneho a subarktického pásma),
13. ústup rozšírenia trvalej snehovej pokrývky zhoršuje hydrologický režim (najmä dostupnosť vody v priebehu roka) v mnohých oblastiach sveta,
14. predlžovanie dĺžky vegetačného obdobia, jarné obdobie nastupuje čoraz skôr, zrýchľuje sa migrácia mnohých živočíšnych druhov.

### Prejavy klimatickej zmeny na Slovensku

Globálne otepľovanie sa na Slovensku prejavilo nárastom priemernej ročnej teploty vzduchu za posledných 100 rokov o 1,1 °C, k čomu sú podkladom najmä pozorovania z observatória v Hurbanove, prebiehajúce od roku 1871, od roku 1901 kontinuálne. Najteplejších 12 rokov bolo zaznamenaných od začiatku 90-tych rokov. Zároveň došlo k poklesu atmosférických zrážok v priemere o 5,6 %. Regionálne rozdiely boli zaznamenané medzi južnou a severnou časťou územia. Na juhu Slovenska bol tento pokles 10 %, kým na severe a severovýchode 5%. Prejavom klimatických zmien je najmä výrazný pokles relatívnej vlhkosti vzduchu (do 5%). Podobne poklesla snehová pokrývka takmer na celom území Slovenska. Podrobnejšie výsledky analýz možno nájsť v prácach Lapin *et al.* (2007, 2008, 2009), Faško *et al.* (2009a, b), Pecho *et al.* (2008, 2009).

Podľa Územnej štúdie Slovenska o zmene klímy sa globálne otepľovanie môže prejavovať na našom území rastom priemerov teploty vzduchu do roku 2075 o 2 až 4 °C. Takéto klimatické zmeny neboli u nás zaznamenané počas celého holocénu a v praxi znamenajú presun teplotných pomerov Podunajskej nížiny na Liptov. Je vysoko pravdepodobné, že negatívne ovplyvnia vodnú bilanciu, biologické výroby ako sú poľnohospodárstvo, lesné hospodárstvo a rybníctvo, zvýšia ohrozenie biodiverzity a rovnako ohrozenie ľudského zdravia.

## **Následky globálneho otepľovania, poveternostné katastrofy**

Ostatných 10-12 rokov je aj na Slovensku zaznamenaný rast výskytu extrémnych denných úhrnov atmosférických zrážok, čo vedie k miestnym povodňam v rôznych častiach republiky. Od roku 1996 až 2004 patrili na Slovensku k rokom s rozsiahlymi privalovými povodňami. Povodne na riekach Váh, Hron, Morava, Kysuca, Orava, Torysa a ďalšie. Najničivejšie povodne boli v roku 1999, kedy bolo zaplavených 181 433 ha územia a spôsobené škody dosiahli výšku takmer 4,5 miliardy Sk.

S globálnym otepľovaním do určitej miery pravdepodobne súvisí aj víchrica z 19. novembra 2004, padavý vietor - bóra, ktorý sa prehnal Tatrami a na rozlohe 12 600 ha spôsobil vyvrátenie a vylámanie lesných porastov v páse lesa širokom 3-4 km a dlhom 40 km. Je možné predpokladať, že frekvencia výskytu poveternostných javov bude narastať, čo bude mať za následok zhoršenie kvality ľudského života a bezpečnosť obyvateľstva, hospodársku produkciu (Pecho a Polčák, 2009) a (Pribullová a Pecho, 2008).

## **Znižovanie zásob vodných zdrojov**

Synergické pôsobenie poklesu atmosférických zrážok a rastu teploty narúša prirodzený vodný cyklus. Dlhodobé prietoky riek majú klesajúcu tendenciu od roku 1980, s výnimkou Dunaja. Podľa scenárov pre časové horizonty rokov 2010, 2030 a 2075 kapacita zásob povrchovej vody poklesne na 12,05, 11,05 a 9,42 miliárd m<sup>3</sup>, pri znížení prietokov o 4, 12 a 25 % (Marečková, 1997). Miestne zvýšenia vodnatosti pri privalových dažďoch sú dočasné a vodné toky budú výrazne znížené najmä počas jarných a letných mesiacov. To znamená negatívny vplyv na biodiverzitu riečnych a potočných ekosystémov. Najmenej bude ovplyvnený sever a najviac juh Slovenska. Významné zníženie sa predpokladá pre zásoby podzemných zdrojov vody. So znížením zásob podzemnej vody, postupným ubúdaním atmosférických zrážok na strednom a južnom Slovensku, otepľovaním a ďalším používaním hnojív sa môže začať prejavovať zvýšená eutrofizácia vodných tokov a nadrží. Zvýšené znečistenie vody môže mať za následok zmenu a úbytok vodnej fauny a flóry.

## **Zmena lesných spoločenstiev a ohrozenie biodiverzity lesov**

Podľa predpokladov (Marečková, 1997) spôsobí klimatická zmena do r. 2075 posun vegetačných pásiem o 200 až 300 km na sever, resp. o 150 až 300 m do vyšších polôh. V lesných spoločenstvách sa očakávajú rozsiahle zmeny. V oblasti horských smrekových lesov sa výrazne zvýši zastúpenie buka a javora horského, zníži sa zastúpenie smreka. V oblasti stredohorských zmiešaných lesov nastane úplná absencia ihličnatých drevín, zhoršia sa podmienky pre buk, výrazne sa zvýši zastúpenie dubov, javorov a jaseňa.

## **Vplyv na poľnohospodársku produkciu**

Aj tu sa očakávajú zmeny pomerov v jednotlivých fázach vegetačného obdobia, napr. sumy denných teplôt, sumy fotosynteticky aktívneho žiarenia. Kritickými následkami pre

poľnohospodárstvo SR môže byť nedostatok vody a výkyvy počasia, prívalové dažde a dlho trvajúce periódy sucha. Najodolnejšími pôdami voči klimatickej zmene budú predovšetkým najkvalitnejšie a najúrodnejšie pôdy, černoze, čiernice a hnedozeme. Dlhé periódy sucha zvýšia tlak na zavlažovanie ornej pôdy, čo zvýši nápor na riečne ekosystémy a na zásoby podzemných vôd. Zvyšovanie priemernej teploty vzduchu uľahčuje tiež šírenie patogénov rastlín, prezimovanie poľnohospodárskych škodcov, čo môže zvýšiť tlak na chemizáciu.

## Príčiny

Na dlhodobé zmeny klímy, ako aj krátkodobé kolísanie a premenlivosť majú významný vplyv tak **prírodné** a v poslednom období aj **antropogénne vplyvy**. Medzi významné prírodné faktory môžeme zaradiť **(i)** zmeny intenzity slnečného žiarenia, **(ii)** zmeny orbitálnych parametrov planéty Zeme, **(iii)** zmeny rozloženia kontinentov a oceánov, **(iv)** zemyn oceánskeho prúdenia, **(v)** intenzívnu vulkanickú činnosť a **(vi)** dopady veľkých asteroidov alebo komét.

### Prírodné faktory ovplyvňujúce zmeny klímy

#### (i) Intenzita slnečného žiarenia

Kľúčovým zdrojom energie pre Zem je Slnko. Relatívne malé zmeny energie, ktorá dopadá zo Slnka na povrch Zeme, môžu vyvolať zmeny klímy na Zemi. Jednou z najlepšie zdokumentovaných prejavov slnečnej aktivity je tzv. 11-ročný slnečný cyklus. V čase výskytu väčšieho množstva slnečných škvŕn stúpa množstvo energie vyžiarenej Slnkom. Táto zmena je nezanedbateľná najmä v spektrálnej oblasti s najkratšími vlnovými dĺžkami žiarenia (UV oblasť spektra). Intenzita slnečného cyklu sa v čase mení. V období 1645 - 1715 na Slnku neboli pozorované takmer žiadne slnečné škvŕny (Maunderovo minimum slnečnej aktivity) a v tomto období bol zaznamenaný aj pokles globálnej teploty Zeme (Malá doba ľadová). Mechanizmus, akým by dlhodobé zmeny slnečnej aktivity mohli ovplyvniť klímu Zeme nie je zatiaľ známy.

#### (ii) Zmeny orbitálnych parametrov Zeme

Nebeská mechanika umožňuje presne vypočítať, ako sa vzhľadom na usporiadanie planét v Slnčnej sústave menia astronomické parametre Zeme - tvar jej obežnej dráhy okolo Slnka, sklon osi rotácie a jej smerovanie v priestore. Vplyv periodických zmien týchto parametrov na klímu Zeme si ako prvý uvedomil srbský vedec Milutin Milankovič (Pribullová, 2004).

Zmena excentricity obežnej dráhy Zeme sa mení s periódou asi 100 tisíc rokov. Počas jednej periódy sa obežná dráha Zeme zmení z kruhovej dráhy na eliptickú s excentricitou 0,06. V súčasnosti je obežná dráha Zeme veľmi podobná kruhovej (excentricita dráhy Zeme je 0,01). Zem je najbližšie k Slnku v čase zimného slnovratu (zima na severnej pologuli). To prispieva k miernejším zimám a nie príliš horúcim letám na severnej pologuli. Množstvo energie

dopadajúcej na hornú hranicu atmosféry sa kvôli excentricite obežnej dráhy Zeme mení o  $\pm 3,5\%$ . Keby excentricita dráhy Zeme dosahovala najväčšiu hodnotu, množstvo slnečnej energie dopadajúcej na hornú hranicu atmosféry by sa počas roka menilo v rozsahu  $\pm 10,0\%$ . Zmena sklonu osi rotácie Zeme voči ekliptike súvisí opäť s existenciou ročných období. V súčasnosti je os rotácie Zeme sklonená voči ekliptike o  $23,5^\circ$ , s periódou cca 41 tisíc rokov sa mení od  $22,5^\circ$  do  $24,5^\circ$ . Väčší uhol sklonu znamená výraznejšie vyjadrené ročné obdobia vo vysokých zemepisných šírkach. Predpokladá sa, že počas období s malým sklonom osi rotácie Zeme voči ekliptike by v miernom a polárnom pásme prevládali miernejšie zimy, v teplejšom vzduchu by sa udržalo väčšie množstvo vodnej pary, čo by malo za následok viac snehových zrážok v polárnej oblasti a výraznejší rast polárnych ľadovcov. Letá by boli v takomto prípade vo vysokých zemepisných šírkach chladnejšie.

Zemská os vykazuje taktiež tzv. precesný pohyb, čo spôsobuje periodické zmeny jej smerovania (perióda precesného cyklu zemskej osi je cca 23 tisíc rokov). V súčasnosti je v januári severná pologuľa vďaka precesnému cyklu bližšie k Slnku a v júli je vzdialenejšia. Ak by sa nemenili ostatné astronomické parametre, tak o 11 tisíc rokov by sme na severnej pologuli boli v zime ďalej od Slnka, čím by sa zvýšili rozdiely medzi zimou a letom. Zmeny všetkých astronomických parametrov pôsobia súčasne. Terajšia konštelácia Milankovičových parametrov praje skôr globálnemu ochladzovaniu (Pribullová, 2007).

### **(iii) Zmeny rozloženia kontinentov a oceánov**

Pri skúmaní klímy Zeme za jej geologické obdobie je potrebné zohľadniť zmeny v rozložení oceánov a kontinentov, ktoré v minulosti nastali a prebiehajú aj v súčasnosti. Teória tektoniky kontinentálnych platní (teória kontinentálneho driftu) predpokladá, že povrch Zeme je tvorený platňami pevniny, ktoré sa posúvajú po kvapalnom podklade. Pri tomto pohybe sa niektoré dosky kontinentov od seba vzdávajú, iné sa pod seba podsúvajú. Sústreďenie veľkých kontinentálnych oblastí v polárnom a miernom pásme predstavuje lepšie podmienky pre vznik globálneho zaľadnenia, rozloženie kontinentov tiež vplýva na oceánsku cirkuláciu a tak nepriamo aj na klímu, vznik a zánik pohorí ovplyvňuje regionálnu cirkuláciu atmosféry, čo sa môže odraziť aj na globálnej klíme Zeme (vysoké pohoria v miernom a polárnom pásme tiež umožňujú rýchlejšie vytvorenie kontinentálnych ľadovcov), rozhrania medzi kontinentálnymi platňami sú oblasťami s intenzívnou sopečnou činnosťou.

### **(iv) Zmena oceánskeho prúdenia**

V oceánoch existujú po tisícročia viac-menej stabilné povrchové a hlbokomorské prúdy, ktorých charakter je určený mnohými faktormi. Výsledkom je charakteristické pole teploty povrchu oceánu. V priestore dotyku studeného Labradorského a teplého Golského prúdu (ale aj inde v podobných prípadoch na Zemi) je dôležitý vzťah hustoty studenej ale máloslanej a teplej ale viac slanej morskej vody. Čím je voda chladnejšia, tým má väčšiu hustotu (najväčšiu hustotu má ale pri  $4^\circ\text{C}$ , pri ďalšom ochladení opäť jej hustota klesá), na druhej strane aj čím je slanšia, tým má tiež väčšiu hustotu. Tak sa môže stať, že máloslaná voda s teplotou  $2^\circ\text{C}$  má rovnakú hustotu ako najslanšia morská voda s teplotou  $20^\circ\text{C}$ . Ak by k tomu došlo v priestore dotyku Labradorského a Golského prúdu, tak by Labradorský prúd neklesal pod teplý Golský ako teraz, ale by ho odtlačil na inú (južnejšiu) dráhu. Teplý



Golfský prúd by mohol smerovať k Portugalsku a otáčať sa na juh, čo by malo za následok ochladenie Británie asi o 5 °C a severu Nórskeho mora aj o viac ako 10 °C. Terajšie rozloženie plávajúceho morského ľadu na konci zimy by sa dramaticky zmenilo (Nórske more by bolo až po Island pokryté ľadom a aj v strednej Európe by mohlo byť napriek globálnemu otepleniu o 2,5 °C o málo chladnejšie ako v posledných desaťročiach). To isté sa môže stať aj na severe Pacifiku, no vzhľadom na iné termo-halinné podmienky by bol konečný efekt oveľa menší. Treba tiež dodať, že čím rýchlejšie bude rásť teplota morskej vody okolo rovníka, tým bude tam aj väčší výpar a tým bude rýchlejšie rásť aj salinita (koncentrácia soli) v teplých morských prúdoch. Globálne oteplenie bude tiež znamenať rast úhrnov zrážok v polárnych oblastiach (pri vyššej teplote je v atmosfére v stave nasýtenia viac vodnej pary), pričom takmer všetky budú tam padať vo forme snehu a budú znamenať rast objemu polárnych pevninských ľadovcov. Pevninské polárne ľadovce postupne „stekajú“ (putujú) k pobrežiu mora, tam sa roztápajú a znižujú salinitu studených morských prúdov. Globálne oteplenie tak môže urýchliť proces termo-halinného kolapsu morskej cirkulácie. Odozva bude však trvať niekoľko desaťročí až storočí, lebo rýchlosť stekania pevninských polárnych ľadovcov k pobrežiu morí je od niekoľkých metrov do niekoľkých stoviek metrov za rok. K znižovaniu salinity morskej vody v polárnych oblastiach prispievajú aj padajúce zrážky na morskú hladinu, voda pritekajúca v riekach a nepriamo aj nepatrný výpar v porovnaní s tropickým pásmom. Globálnu termo-halinnú cirkuláciu ovplyvňuje teda predovšetkým po stáročia veľmi stabilný celkový režim teploty a salinity morskej vody v polárnych a tropických šírkach. Za kolaps tejto cirkulácie považujeme jej relatívne náhlu zmenu, náhle spomalenie alebo aj zastavenie. Preto je vznik uvedeného kolapsu do roku 2020 veľmi málo pravdepodobný.

#### **(v) Intenzívna sopečná činnosť**

Spôsobila pravdepodobne tiež vymieranie na konci prvohôr. K najväčším známym erupciám patrí zaplavenie západnej časti Sibíri lávou s rozlohou asi 2,5 milióna km<sup>2</sup>. Vtedy zahynulo asi 95 % druhov organizmov na Zemi. Na konci druhohôr to bola zasa erupcia čadičov v Indii, ktorá zanechala za sebou 2 km hrubú vrstvu čadiča s rozlohou asi 500 tisíc km<sup>2</sup>. Táto udalosť mohla súvisieť s dopadom asteroidu v Mexiku, ktorý vyvolal napätie na opačnej strane Zeme. Sopečné erupcie zasahovali i do histórie ľudstva. Pred 75 tisíc rokmi bola najmohutnejšia explózia počas štvrtohôr. Sopka Tumbo na Sumatre vyvrhla asi 1 000 km<sup>3</sup> popola a 2 000 km<sup>3</sup> lávy. Erupcia zanechala kráter s priemerom 170 km. Znamenala výrazné klimatické zmeny a teplota klesla o 5 °C na tisíc rokov. Táto udalosť koinciduje s redukciou populácie človeka. 1600 rokov pred Kr. vybuchla sopka Thera v Egejskom mori, ktorá pravdepodobne spôsobila zánik minojskej civilizácie na Kréte. V roku 1783 sa odohrala trhlínová erupcia Laki na Islande, ktorá vytvorila najväčší lávový prúd na Zemi pozorovaný v historickom období. Táto udalosť pravdepodobne vyvolala kruté zimy a veľké neúrody vo Francúzsku, čo mohlo viesť k Francúzskej revolúcii. V roku 1815 vybuchla sopka Tambora v Indonézii, ktorá vyvrhla 50 km<sup>3</sup> materiálu. Bola to najvýbušnejšia explózia za posledných 10 tisíc rokov. Na tri dni nastala úplná tma v okruhu 300 km. Nasledoval „rok bez leta“. Priemerná globálna teplota klesla o 1 °C, niekde až o 2,5 °C. V mnohých krajinách boli neprestávajúce dažde, sneh a mráz aj v letných mesiacoch. V spoločnosti ľudí nasledovali hladové búrky a nepokoje.

#### **(vi) Dopady asteroidov a komét**

V prvej fáze vývoja Zeme boli veľmi časté. Pred 65 mil. rokov na rozhraní kriedy a tret'ohôr sa udiala katastrofa, spôsobená dopadom kométy (asi 10 km v priemere) neďaleko polostrova Yucatán v Mexiku. Materiál vymrštený pri dopade zatienil Slnko, teplota klesla pod bod mrazu na niekoľko mesiacov a vznikli obrovské vlny - tsunami. Spôsobilo to vyhynutie mnohých druhov živočíchov.

### Lud'mi podmienené faktory

Zemský klimatický systém sa v posledných rokoch výrazne mení a tieto zmeny sa pripisujú najmä vplyvu človeka - osobitne zvýšeniu emisií skleníkových plynov - výsledkom je globálne otepľovanie prízemných vrstiev atmosféry.

Atmosfére predstavuje zmes plynov, ktorých relatívny podiel sa až do výšky 100 km nad zemským povrchom takmer nemení. Niektoré z týchto plynov majú zásadný vplyv na tzv. energetickú bilanciu zemskej atmosféry - sú to tzv. **skleníkové plyny** - svojimi fyzikálnymi vlastnosťami udržiavajú na Zemi teplo slnečného žiarenia - ide o tzv. **skleníkový efekt**.

**Prirodzený skleníkový efekt** atmosféry tu bol od počiatku existencie Zeme. Funguje v zjednodušenej interpretácii tak, že atmosféra prepúšťa prichádzajúce, prevažne viditeľné slnečné žiarenie (s vlnovou dĺžkou okolo 460 nm) na zemský povrch iba s malou absorpciou atmosférou, aerosólmi a oblačnosťou. Podstatná časť slnečného žiarenia preto dopadá na zemský povrch, ten sa zahrieva a vyžaruje smerom nahor tepelné žiarenie s väčšou vlnovou dĺžkou (s maximom hustoty toku okolo vlnovej dĺžky 12 000 nm v závislosti od teploty vyžarujúceho povrchu v súlade so Stefan-Boltzmannovým zákonom). Toto odchádzajúce dlhovlnné žiarenie skleníkové plyny v atmosfére takmer úplne pohlcujú, ohrievajú sa a vyžarujú tiež tepelné žiarenie smerom k Zemi. Je zaujímavé, že jednotlivé skleníkové plyny sa vzájomne dopĺňajú tak, že cez atmosférické okno vodnej pary (vlnová dĺžka 8500 až 12 000 nm) uniká priamo do kozmického priestoru iba malé množstvo vyžarovania zemského povrchu (asi  $40 \text{ W.m}^{-2}$  z celkového toku  $390 \text{ W.m}^{-2}$ ). Tak sa udržuje pri zemskom povrchu charakteristická priemerná teplota vzduchu. Čím je v atmosfére skleníkových plynov viac, tým je pri zemskom povrchu vyššia teplota vzduchu. Prirodzený skleníkový efekt predstavuje oteplenie o  $33 \text{ }^\circ\text{C}$ . Ak by vzrástlo iba množstvo oxidu uhličitého ( $\text{CO}_2$ ) na dvojnásobok, zosilnel by skleníkový efekt atmosféry na asi  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ , teda asi o  $2 \text{ }^\circ\text{C}$ . Dôležité je teda zosilňovanie skleníkového efektu atmosféry vplyvom emisie skleníkových (radiačne aktívnych) plynov. Bez skleníkových plynov by bola teda priemerná globálna teplota vzduchu pri zemskom povrchu o približne  $33 \text{ }^\circ\text{C}$  nižšia ako je dnes. Zem by pravdepodobne nebola vôbec vhodná pre život, ako ho poznáme, bola by pokrytá snehom a ľadom od rovníka až k pólom.

Skleníkový efekt je prirodzený jav, ktorý umožňuje život na Zemi. Príčinou globálneho otepľovania teda nie je existencia skleníkového efektu, ale jeho **zosilnenie zvýšením koncentrácie skleníkových plynov v dôsledku ľudskej činnosti**. Uvoľnené skleníkové plyny zachytávajú a k zemskému povrchu vracajú väčšiu časť emitovaného infračerveného žiarenia, ako v prípade prirodzeného skleníkového efektu.

Aktivitou človeka sa zvyšuje množstvo plynov v atmosfére, najmä CO<sub>2</sub>, metánu a oxidu dusného. Do atmosféry sa dostáva ročne takmer 10 miliárd ton fosílného uhlíka. Biosféra s takýmto prísunom nepočítala a nevie ho rovnako rýchlo vrátiť späť do podzemných rezervoárov ako fosílie. To je hlavná príčina, že koncentrácia CO<sub>2</sub> a metánu rastie v atmosfére v podstate paralelne s objemom spotreby fosílného uhlíka rôznymi ľudskými aktivitami (Obr. ). Ako pôsobia jednotlivé ľudské činnosti na zvyšovanie koncentrácie CO<sub>2</sub> v zemskej kôre? Spaľovanie fosílnych palív pridávalo do ovzdušia v druhej polovici 90-tych rokov asi 6Gt uhlíka. Odvtedy neustále rastie.

Podľa správy Európskej environmentálnej agentúry o stave životného prostredia (European Environment Agency, 2005) sa dnes uvoľňuje do atmosféry až 25 miliárd ton CO<sub>2</sub> ročne (v súčasnosti je toto číslo ešte vyššie). Polovicu tohto množstva dokážu zatiaľ odbúrať oceány. K zvyšovaniu koncentrácie CO<sub>2</sub> prispievajú najmä vyspelé krajiny, z nich najviac USA (viac ako 30%), nasledujú západná a stredná Európa (spolu takmer 28%), potom Ázia (bez Ruska) prispieva 14% a samotné Rusko 12%.

K zvyšovaniu koncentrácie CO<sub>2</sub> v ovzduší vedie aj postupné **vypaľovanie lesov**. Tým sa znižuje aj kapacita absorbérov CO<sub>2</sub>. V miernom pásme sa rozloha lesov nezmenšuje, treba vedieť, že tropické pralesy nie sú len biocentrami života, ale aj významné absorbéry CO<sub>2</sub> a tým aj stabilizátormi klímy. Ich súčasné nivočenie 20- 24 mil. ha ročne teda nepriamo zvyšuje koncentráciu CO<sub>2</sub> v atmosfére. Toto neustále zvyšovanie CO<sub>2</sub> v ovzduší je podľa vedeckých odhadov zodpovedné asi za 70% rastu teploty zemskeho povrchu. Významné sú aj ďalšie plyny, ktoré sú v atmosfére v oveľa menších koncentráciách. Patria k nim metán, oxid dusný a chlórfluórované uhl'ovodíky.

Metán je zodpovedný asi za 20% celkového otepľovania. Je hlavnou zložkou zemného plynu, bol známy ako bahenný plyn. Človek prispel k zvyšovaniu jeho koncentrácie v ovzduší najmä ťažbou fosílnych palív, distribúciou ropy, zemného plynu, ďalej rozvojom chovu hovädzieho dobytky - v jeho zažívacom trakte vzniká metán fermentáciou. V menšej miere metán uniká z komunálnej kanalizácie a zo skládok odpadu, uvoľňuje sa tiež pri pálení biomasy. V troposfére ostáva 9 až 15 rokov, pričom jedna molekula CH<sub>4</sub> zachytáva až 23- násobne viac tepla ako molekula CO<sub>2</sub>. Oxid dusný (N<sub>2</sub>O) môže vstúpiť až do stratosféry, kde poškodzuje ozónovú vrstvu. V troposfére je účinným skleníkovým plynom, jeho životnosť v ovzduší je asi 120 až 150 rokov. Jeho molekula zadržiava asi 296- násobne viac tepla ako molekula CO<sub>2</sub>. Zdrojom tohto plynu je chemický priemysel, poľnohospodárstvo, odpady z chovu dobytky, fosílna palivá bohaté na dusík, dokonca katalytické konvertory v autách.

Významným skleníkovým plynom je aj ozón. Od roku 1750 vzrástla jeho koncentrácia približne o jednu tretinu. Produkcia prízemného ozónu vykazuje veľké regionálne rozdiely. Syntetické skleníkové plyny - freóny sú látky poškodzujúce ozónovú vrstvu a súčasne sú významnými skleníkovými plynmi. Sú to syntetické látky, ktoré sa v prírode prirodzene nevyskytujú. Unikajú z chladiacich náplní starých chladničiek a klimatizačných zariadení. Ich

zdrojom je aj vyparovanie čistiacich prostriedkov a rozpúšťadiel. V troposfére zotrávajú 10 až 20 rokov, počas ktorých účinne zachytávajú infračervené žiarenie emitované zemským povrchom. Jedna molekula freónu zachytí od 900 až po 8300 krát viac tepla ako molekula CO<sub>2</sub>. Globálne otepľovanie je nehomogénny jav - severný a južný pól sa otepľujú rýchlejšie ako rovníkové oblasti, pričom kontinenty sa otepľujú rýchlejšie ako oceány.

Podľa IPCC existujú dôkazy o tom, že klimatické zmeny sa už začali. Zemská klíma sa prirodzene mení, čo sťažuje určenie účinku narastajúcej koncentrácie skleníkových plynov. Avšak trend nárastu globálnej teploty sa zhoduje s trendom predpovedaným na základe počítačového modelovania klímy. Zdá sa veľmi nepravdepodobné, že nárast teploty by bol spôsobený výlučne prirodzenými zmenami. Hoci tu zostáva viacero neistôt, klimatológia veria, že váha dôkazov podporuje teóriu vplyvu ľudskej činnosti na klímu.

Je evidentné, že uplynulé dve desaťročia boli najteplejšími v uplynulom tisícročí, morská hladina stúpa a mení sa charakter zrážkovej činnosti. Arktický ľad sa stenčuje a výskyt a intenzita javu El-Niño narastá. Svet na mnohých miestach trpí vlnami horúčav, sucha, záplav a extrémne výčiny počasia viedli k obrovským škodám na ľudských životoch i na majetku. Hoci individuálne extrémne javy nemôžu byť priamo spájané s človekom vyvolanými klimatickými zmenami, výskyt a rozsah týchto javov sú pravdepodobnejšie počas teplejšej klímy.

## Klíma v histórii Zeme

Klíma sa v minulosti vždy menila, prirodzené zmeny podnebia prebiehajú aj dnes a naďalej aj prebiehať budú. Rekonštrukciou podnebia pred érou prístrojových meraní a pozorovaní sa zaoberá historická klimatológia a **paleoklimatológia**. Prispieva k poznaniu stavu a chovania klimatického systému v dobách, kedy jednoznačne prevažoval vplyv prírodných faktorov: zmeny orbitálnej dráhy Zeme, slnečnej aktivity, rozloženia pevnín a oceánov, či vegetácie a sopečnej činnosti.

V geologickej minulosti neustále dochádzalo k zmenám klímy - teplejšie obdobia striedali tie chladnejšie a obdobne aj vlhšie striedali suchšie. Avšak porovnávanie súčasnej klímy s tou historickou predstavuje ešte stále veľký problém. Je to jednak preto, že nemáme k dispozícii dostatočné množstvo kvalitných a spoľahlivých údajov a jednak aj preto, že geologické podmienky sa na Zemi výrazne odlišovali od tých súčasných. Iné rozloženie pevnín a oceánov malo za následok iný systém morského prúdenia a tým aj iné podmienky pre prenos tepla z tropických oblastí do vyšších zemepisných šírok. Pre súčasné štúdium historickej klímy majú najväčší význam štvrtohory (kvartér), počas ktorých dochádzalo k pravidelnému, periodickému striedaniu chladných dôb ľadových (tzv. glaciálov) a teplejších dôb medziľadových (tzv. interglaciálov). Priemerná globálna teplota vzduchu bola v období vrcholenia poslednej doby ľadovej oproti dnešnej rádovo nižšia o niekoľko stupňov Celzia (do 10 °C). Polárne oblasti boli naposledy zreteľne teplejšie než dnes v období zatiaľ posledného interglaciálu, pred 125 000 rokmi.

### Indikátory historickej klímy

Základným problémom **paleoklimatológie** je zväčšujúci sa nedostatok relevantných historických zdrojov a indikátorov vo vzdialenejšej histórii Zeme. Ak sa pri rekonštrukcii historickej klímy dostávame späť v čase pred obdobie prístrojových pozorovaní je nevyhnutné použiť tzv. **proxy údaje** - sú to akékoľvek údaje (kvalitatívneho alebo kvantitatívneho charakteru), ktorých hodnoty a zmeny dostatočne významne korešpondujú s klimatickými podmienkami a ich zmenami. Využitie proxy údajov je limitované schopnosťou paleoklimatológa presne kvantifikovať vzťah medzi hodnotami proxy údajov a hodnotami vybraných klimatických elementov, ako napríklad priemernou ročnou alebo sezónnou teplotou vzduchu, prípadne atmosférickými zrážkami a ich režimom a pod. Definovanie týchto nevyhnutných vzťahov sa darí dosiahnuť pomocou jednak laboratórnych alebo iných experimentov (napr. závislosť pomeru izotopov kyslíka  $^{18}\text{O}$  a  $^{16}\text{O}$  od teploty vzduchu, závislosť veľkosti úrody od teploty a zrážok a pod.). Akonáhle dokážeme presne definovať uvedené vzťahy - korelácie, je potrebné ich testovať na vzorkách odpozorovaných klimatických údajov, odlišných od tých, ktoré boli použité pri vytvorení týchto zákonitých vzťahov. Následne sa môžu proxy údaje použiť na kvantifikáciu klimatických elementov vo vybranom časovom období a pre vybranú lokalitu. Zvyčajne si paleoklimatologická rekonštrukcia vyžaduje dlhodobú prax - objaviť a správne interpretovať klimatický signál z časových radov proxy údajov je mimoriadne náročné.

Proxy údajov, ktoré je možné pri paleoklimatickej rekonštrukcii použiť je nepreberné množstvo a majú rôznu povahu a charakter, prípadne schopnosť špecifikovať všeobecné klimatické podmienky v rôznych časových škálach. Tu je ich zjednodušený výber a kategorizácia:

1. **Historické záznamy** - ide prevažne o písomné záznamy z obdobia stredovekej Európy a dynastického obdobia Číny - najčastejšie obsahujú informácie týkajúce sa veľkosti úrody obilnín (zvyknú byť uvádzané príčiny zlých úrod a pod.), kvality vinnej révy a objemu zozbieraného hrozna - medzi najstaršie záznamov tohto charakteru patria záznamy dátumov kvitnutia čerešní (Čína).
2. **Záznamy letokruhov stromov** (dendrochronológia) - ide o jedny z najkvalitnejších proxy záznamov dostupných v prírode - každoročne závisí hrúbka novovytvoreného dreva v kmeni stromu od priebehu poveternostných podmienok vo vegetačnom období, v suchých regiónoch sveta závisí hrúbka nového dreva (jedného letokruhu) od veľkosti zrážok, naopak v chladných regiónoch závisí viac od letných teplôt a pod.
3. **Jazerné sedimenty** - ide o významné zdrojové proxy údaje, a to predovšetkým v oblastiach s zreteľným striedaním suchších a vlhších sezón, počas ktorých dochádza k zmenám sedimentačnej činnosti riek a vodných tokov - jazerné sedimenty sa vytvárajú každoročne, sú v nich obsiahnuté, okrem hornín, aj ďalšie významné elementy, akými sú napríklad semená tráv, peľové zrnká, kmene stromov a pod.
4. **Ľadovcové jadrá** - sú významným zdrojom informácií pri rekonštrukcii ročných priemerov teploty vzduchu, zrážok, prípadne chemického zloženia vzduchu pochádzajúceho zo starších geologických dôb.
5. **Peľové zrnká (palynológia)** - podobne ako v prípade jazerných sedimentov ide aj v tomto prípade o významný zdroj klimatických informácií - sedimentácia peľových zrn však nie je obmedzená len na jazerné panvy - vďaka objektom palynologických analýz môže byť akákoľvek sedimentačná oblasť (panva) v horninovom prostredí (nivné a terasové akumulácie vodných tokov, akumulácie spraší, piesku a pod.) Peľové zrná sú najčastejšie datované pomocou rádiokarbónovej metódy (študuje sa pomer rádioaktívneho uhlíka k jeho inertným formám) - na základe tohto pomeru je možné potom vypočítať približný vek vzorky.

6. **Sedimenty spraší** - usadzovanie jemného, pieskovitého až prachovitého materiálu mimo územia pôvodu tohto materiálu (prevažne v zrážkovo bohatších regiónov) - na základe vrstiev spraší je možné určiť paleomagnetickou analýzou ich vek a pôvod.
7. **Oceánske vrty** - sedimenty získavané z hĺbky okolo 5000 metrov nám poskytujú významné informácie o dávných podmienkach povrchových vôd oceánov, predovšetkým o teplote vody a jej salinite (pomocou analýzy pomeru izotopov kyslíka v karbonátoch lastúr a vápnitých schránok dierkavcov, ktoré pôvodne žili v povrchových vodách oceánov).
8. **Koraly** - ich rozšírenie je limitované veľmi špecifickými klimatickými podmienkami - teplotou morskej vody, salinitou a pod. O prítomnosti koralových schránok v horninových vrstvách môžeme povedať, že v období odpovedajúcemu danej vrstve prevládalo veľmi teplé podnebie.
9. **Paleoaerosoly** - sedimentované v paleopôdach uchovaných v horninovom prostredí sedimentárnych vrstiev - poskytujú dôležité informácie o klimatických podmienkach a poveternostných podmienkach ich vzniku a uloženia.
10. **Geomorfologické útvary** - vytváranie a genéza veľmi špecifických tvarov reliéfu nám poskytuje významný informačný kľúč k identifikácii dlhodobých klimatických podmienok, počas ktorých tieto formy reliéfu vznikali (napríklad: glaciálne formy reliéfu môžu vznikali len za určitých teplotných a vlhkosťných podmienok, kedy podnebie umožňuje vytváranie ľadovcových polí a horských ľadovcov)

### Zmeny klímy v geologickej dobe

V **najstarších geologických dobách** boli klimatické podmienky na Zemi relatívne stabilné, až na obdobia globálnych ľadových dôb, ktorých počiatok možno vsadiť do obdobia okolo 2,3 mld. rokov. Teplota vzduchu ako aj iné klimatické prvky podliehali dlhodobým cyklom zmien, ktoré boli ovplyvnené najmä chemickým zložením zemskej atmosféry, predovšetkým oxidu uhličitého, ktorého úroveň závisela nielen od geofyzikálnej aktivity Zeme alebo aj od rozsahu a charakteru biosféry v oceánoch (neskôr aj na pevninách). Geologické informácie a proxy údaje v podobe sedimentárnych hornín, skamenelín a pod. sú jediným známym zdrojom údajov pre paleoklimatickú rekonštrukciu tohto obdobia.

V **prekambrickom období** sa geologické informácie viažu prevažne do období ľadových dôb - prvá z nich pravdepodobne nastala pred 2.9 mld. rokmi, avšak o prvej tzv. globálnej dobe ľadovej možno hovoriť až medzi obdobím od 2.5 do 2.3 mld. rokov. Ďalšie chladné obdobie dejín Zeme zrejme nastalo pred 1.9 mld. rokmi - je však možné, že obe doby ľadové predstavujú vlastne jedno a to isté obdobie - teda dobu ľadovú trvajúcu približne 600 mil. rokov. Posledná globálna doba ľadová skončila približne pred 600 mil. rokmi a trvala približne 300 mil. rokov.

**Začiatok prvohôr** (Paleozoikum) sa niesol v znamení vysokých globálnych teplôt vzduchu. Prevládalo tropické podnebie - tento fakt bol odvodený predovšetkým z vysokých úrovní chemického zvetrávania hornín, ktoré v tomto období prevládalo. Vysoké globálne teploty vzduchu boli spôsobené najmä vysokými koncentráciami CO<sub>2</sub> v zemskej atmosfére.

Z obdobia **ordoviku** je známa ďalšia ľadová doba (450-430 mil. rokov). Toto ochladenie pravdepodobne postihlo väčšiu časť vtedajšieho tropického pásma v rámci superkontinentu Gondwana (južný kontinent). Ďalšie obdobie ochladenia nasledovalo na rozhraní

geologických období Karbónu a Permu (známe ako Permo-karbónske zaľadnenie) pred 300 mil. rokmi.

Klíma **druhoohôr** sa vyznačovala prevažne teplým charakterom. Spôsobovala to predovšetkým rýchla výmena oceánskych vôd medzi rovníkom a oboma pólmi (vhodná konfigurácia kontinentov v južno-severnom, poludníkovom smere - nevznikli cirkumpolárne morské prúdy). Obdobie Kriedy bolo pravdepodobne jedno najteplejších a najsuchších období od konca Prekambria.

Veľmi teplá a navyše aj veľmi vlhká klíma panovala na začiatku **tret'ohôr** v období Paleocénu. Avšak pred 55 mil. rokmi, v období **Eocénu** sa globálne začalo postupne ochladzovať a asi pred 35 mil. rokmi dochádza k prvému významnejšiemu zaľadneniu Antarktídy (v tomto období došlo k výraznému zníženiu povrchovej teploty vody v oblasti Antarktídy). K ďalšiemu ochladeniu došlo v priebehu **Oligocénu**, kedy sa začal okolo Antarktídy formovať tzv. cirkumpolárny studený morský prúd (po oddelení Austrálie od Antarktídy pred približne 30 mil. rokmi). Je potvrdené, že už v období pred 25 mil. rokmi bola celá Antarktída pokrytá mohutnou vrstvou ľadu. V **Miocéne** panovalo v nízkych a stredných zemepisných šírkach veľmi teplé tropické alebo subtropické podnebie (výnimkou bola iba Antarktída). Počas stredného **Miocénu** (okolo 15 až 10 mil. rokov) sa však začína ochladzovať aj na severnej pologuli, formujú sa prvé zaľadnenia okolo severného pólu a Grónska. V období **Pliocénu**, pred približne 5 mil. rokmi, dochádza na južnej pologuli k ďalšiemu postupnému ochladzovaniu. Objem antarktického polárneho zaľadnenia je už identický s jeho súčasným rozsahom. V približne rovnakom období dochádza k zaľadneniu horských oblastí novo vyzdvihnutých alpínskych pohorí (Himaláje, Alpy, Kaukaz, Altaj, Pamír,...). Pred asi 3 mil. rokmi dochádza k trvalému zaľadneniu Grónska.

Počas obdobia zatiaľ poslednej geologickej doby - **štvrtohôr (Pleistocén a Holocén)** - došlo predovšetkým na severnej pologuli k cyklickému striedaniu chladnejších (glaciály) a teplejších (interglaciály) období. Podľa niektorých vedcov je možné, že sa za obdobie posledných 2 mil. rokov vystriedalo až okolo 20 ľadových dôb. Isté je však to, že aspoň sedem ich bolo potvrdených. Každý interglaciál, trvajúci približne 10 000 rokov  $\pm$  2 000 rokov, strieda chladnejšiu dobu ľadovú v intervale približne 100-120 tis. rokov. Zatiaľ posledným interglaciálom, ak nerátame Holocén, bolo obdobie približne pred 125 tis. rokmi, emský interglaciál.

### Zmeny klímy za obdobie posledného milióna rokov

S vysokom mierou istoty môžeme povedať, že za posledných približne 700 000 rokov bolo globálne na Zemi rovnako teplo alebo ešte teplejšie ako dnes len v priebehu 8 % uvedeného časového intervalu. Zvyšujúca sa istota paleoklimatickej rekonštrukcie je výsledkom využívanie väčšieho množstva dostupných metódik.

**Posledná doba ľadová (koniec Pleistocénu)** dosiahla svoj vrchol v období medzi 22 000 - 14 000 rokmi. V tomto období sa na severnej pologuli rozprestierali dva rozsiahle pevninské ľadovce - tzv. Laurentský a Škandinávsky. Počas vrcholenie tejto chladnej etapy **Pleistocénu** sa pohybovali priemerné ročné teploty v stredných šírkach okolo hodnoty 0°C (teda boli až

o 10°C nižšie ako v súčasnosti, v oblasti Karibiku to bolo asi o 3°C menej ako dnes). Hladina svetového oceánu bola približne o 85 m nižšie ako dnes. V období pred 14 000 rokmi došlo k náhlemu otepleniu a masívnemu ústupu ľadovcov na severnej pologuli. Najskôr ustúpil ľadovec v oblasti dnešných Rocky Mountains a Aljašky (pred asi 10 000 rokmi), ľadovce v Škandinávii ustúpili len o niekoľko storočí neskôr, zatiaľ čo zaľadnenie v Kanade a v priestore medzi Severnou Amerikou a Grónskom definitívne zmizlo asi pred 8 000 rokmi. V strednej Európe sme mali už okolo roku 8 500 klimatické podmienky podobné tým súčasným, v Severnej Amerike to bolo asi o 1 500 rokov neskôr. Jedno z najznámejších postglaciálnych chladných období bol **Mladší Dryas** (pred 10 800 - 10 100 rokmi). **Postglaciálne klimatické optimum** nastalo približne pred 7 000 až 5 000 rokmi, kedy sa priemerné letné teploty v strednej Európe pohybovali na úrovni okolo 12-13°C (dnes 10°C).

### Zmeny klímy v historickej dobe a v 20. storočí

Doba železná (900 až 300 p.n.l.) bola všeobecne dosť vlhká a vo svojej druhej polovici aj dosť chladná (500 až 300 p.n.l.). V Európe došlo napríklad k zväčšeniu rozlohy močiarov. Obdobie od roku približne 1000 až do 1200 n.l. sa označuje ako **stredoveké teplé obdobie** alebo **druhé klimatické optimum Holocénu** (jeho presné vymedzenie je však aj dnes značne neisté). Priemerné teploty v tomto období boli o niečo vyššie než v ďalších storočiach, ale nie o viac ako 1-2 °C, a v mierke pologulí neboli vyššie ako v druhej polovici 20. storočia. Okrem toho najnovšie výskumy naznačujú, že toto teplé obdobie nezasiahlo celú planétu súčasne, skôr išlo o sériu lokálnych a regionálnych oteplení, ktoré prichádzali do rôznych oblastí v rôznom čase. Napríklad v období rokov 900 až 1100 n.l. panovali v priestore severného Atlantiku pomerne priaznivé klimatické podmienky, ktoré umožnili Vikingom osídlenie Islandu, juhozápadného Grónska, Labradoru a Newfoundlandu.

Medzi obdobím rokov 1430 až 1850 došlo k všeobecnému ochladeniu, a to predovšetkým v druhej polovici 15. a 17. storočia. V Európe, Severnej Amerike a Ázii došlo k rozšíreniu horského zaľadnenia, v Anglicku sa prestala pestovať vinná réva a skončilo sa osídlenie Grónska. V období rokov 1780 až 1820 boli teploty v priestore Atlantického oceánu, na sever od 50. rovnobežky, približne o 1 až 3°C nižšie ako dnes. Od polovice 19. storočia sa na severnej pologuli postupne otepľovalo, najmä v období rokov 1880 až 1940. Južná pologuľa sa naopak ochladzovala. Od štyridsiatych rokov 20. storočia do polovice 60. rokov sa naopak na prevažne časti severnej pologule (najmä v polárnych regiónoch) mierne ochladilo. Od 70. rokov sa opätovne otepľuje, po roku 1980 veľmi výrazne.

## Scenáre budúcej klímy

Klimatológovia dokážu v súčasnosti, s určitou mierou neistoty, odhadnúť možný vývoj klimatického systému Zeme - používajú k tomu **počítačové modely klímy**, ktoré sú založené na preverených fyzikálnych princípoch. Okrem tzv. globálnych modelov sa používajú aj tzv. regionálne modely klímy, ktoré nepočítajú vývoj atmosféry na celej Zemi, ale len v rámci určitej obmedzenej oblasti. **Klimatické modely** sú veľmi zložité, na globálnej úrovni sa počítajú pre niekoľko miliónov tzv. gridových bodov, preto je potrebné pre ich efektívny chod používať veľmi výkonné počítače. Klimatický systém samozrejme neobsahuje len atmosféru.



Tvoria ho aj oceány, biosféra alebo snehový a ľadový povrch, a rovnako aj litosféra. Dobrý klimatický model preto okrem modelu atmosféry musí obsahovať aj model pre oceány, biosféru, kryosféru (sneh a ľad), pričom veľmi dôležité sú najmä fyzikálne väzby medzi jednotlivými modelmi.

Narastajúce koncentrácie skleníkových plynov evidentne spôsobia zmeny v celom klimatickom systéme Zeme. Akým konkrétnym spôsobom, na to aspoň čiastočne dávajú odpoveď práve klimatické modely. Pre každý konkrétny trend budúcich emisií (podľa tzv. emisných scenárov SRES) skleníkových plynov sa pripravuje celý rad scenárov budúceho vývoja klímy. Získavame teda vždy určité rozpätie výsledkov, nie teda len jednu konkrétnu hodnotu. Rast priemernej globálnej teploty vzduchu sa pre scenáre s vysokými emisiami (A1FI) vôbec neprekryva s výsledkami optimistickejších scenárov (B1). Z toho vyplýva, že vývoj globálnych teplôt, a to najmä v druhej polovici 21. storočia, bude do značnej miery závisieť na hodnotách emisií.

Ak bude aj naďalej pokračovať rast emisií skleníkových plynov, celkom určite nás už do konca 21. storočia čakajú závažné zmeny klimatických podmienok na celej Zemi. V závislosti od toho, koľko fosílného uhlíka do atmosféry vypustíme, môže globálna teplota vzduchu do konca tohto storočia vzrásť o ďalších **1,1 až 6,4 °C**, čo znamená, že v porovnaní s predindustriálnym obdobím to bude predstavovať nárast o **2 až 7 °C**. Len pre porovnanie, v najchladnejších obdobiach posledných dôb ľadových bol celosvetový priemer teploty vzduchu asi o 4 až 7 °C nižší ako v súčasnosti. Dôsledkom tohto oteplenia môžeme očakávať významné zmeny v celom klimatickom systéme Zeme - niektoré je možné predvídať s väčšou, iné s menšou istotou. Niektoré oblasti Zeme sa stanú vlhšími, naopak iné častejšie postihne dlhotrvajúce a teda aj intenzívnejšie sucho. Vlny horúčav budú prichádzať častejšie a je potrebné počítať aj s tým, že budú extrémnejšie. Na druhej strane sa zvýši aj riziko výskytu náhlych a regionálnych povodní, a to dokonca aj v oblastiach pravidelnejšie postihovaných suchom. Najmä na severnej pologuli bude pokračovať dramatický ústup snehovej pokrývky v chladnej časti roka. Podobný osud čaká aj morský ľad, ktorý bude výraznejšie ustupovať predovšetkým v lete. Väčšia časť horských ľadovcov do konca storočia zmizne a hladina svetových oceánov pravdepodobne vzrastie aj o viac ako jeden meter. Veľmi radikálne ovplyvní pokračujúce otepľovania život v oceánoch, a to predovšetkým v dôsledku rastúcej kyslosti morskej vody. Ak ľudstvo v najbližších desaťročiach neprehodnotí svoj prístup k získavaniu a využívaniu energie a nedokáže tak výrazne zredukovať emisie skleníkových plynov do zemskej atmosféry, uvedené zmeny budú pokračovať v pravdepodobne ešte rýchlejšom tempe aj v ďalších storočiach.

Zmeny klímy pri určitom zvýšení koncentrácie skleníkových plynov však **nebudú rovnaké na všetkých miestach planéty**. Všeobecne možno povedať, že oteplenie bude výraznejšie na pevninami ako nad oceánmi. Je to dané predovšetkým väčšou tepelnou kapacitou oceánov, ktoré sú schopné absorbovať väčšie množstvo tepla ako pevniny v rovnakých zemepisných šírkach. Väčšie oteplenie možno očakávať aj vo vyšších zemepisných šírkach a v polárnych oblastiach, naopak v oblasti rovníka nebude otepľovania až tak markantné.

**Zosilnenie skleníkového efektu** nebude mať však len priamy dopad na zvyšovanie priemernej globálnej teploty vzduchu. Klimatické modely naznačujú aj **d’alšie možné dopady**. Ide najmä o zmenu v rozložení atmosférických zrážok na Zemi, zmeny v častosti a intenzite extrémnych prejavov počasia a pod. Napríklad jedným z hlavných rizík pre oblasť strednej Európy je predpoklad častejšieho výskytu suchých období, a to najmä v lete a na začiatku jesene. Majú to na svedomí viaceré príčiny. Jednou z nich je výrazný úbytok snehu v zime a jeho skoršie topenie na jar, skorší nástup vegetačného obdobia a tým aj výraznejší výpar na jar (rýchlejšie spotrebovanie pôdnej vlhkosti rastlinami) a nakoniec aj nižšie zrážky a vyššie teploty v lete. Konečným dôsledkom je potom výrazný nedostatok pôdnej vlhkosti v druhej polovici leta a na začiatku jesene. Negatívne dôsledky to bude mať predovšetkým v poľnohospodárstve a vodnom hospodárstve. Ďalším dôsledkom klimatickej zmeny by mohol byť častejší výskyt nebezpečných poveternostných javov, ktoré spôsobujú veľké škody. Ide najmä o víchrice, extrémne vysoké zrážky, povodne, dlhé obdobia bez zrážok - suchá, vlny horúčav, intenzívne búrky a pod.

Rast priemernej globálnej teploty, ktorý je možné v priebehu 21. storočia očakávať v dôsledku zvyšujúcej sa koncentrácie skleníkových plynov v atmosfére, s veľkou mierou pravdepodobnosti presahuje doposiaľ zaznamenané zmeny klímy v priebehu posledného tisícročia. Je pravda, že tento nárast je nižší ako pravidelné výkyvy teploty, ku ktorým dochádzalo v priebehu štvrtohôr, avšak **závažná je rýchlosť súčasných zmien**.

Podľa Územnej štúdie Slovenska o zmene klímy sa globálne otepľovanie môže prejaviť na našom území rastom priemerov teploty vzduchu do roku 2075 o 2 až 4C. Takéto klimatické zmeny neboli u nás zaznamenané počas celého holocénu a v praxi znamenajú presun teplotných pomerov Podunajskej nížiny na Liptov. Je vysoko pravdepodobné, že negatívne ovplyvnia vodnú bilanciu, biologické výroby ako sú poľnohospodárstvo, lesné hospodárstvo a rybárstvo, zvýšia ohrozenie biodiverzity a rovnako ohrozenie ľudského zdravia (Lapin *et al.*, 2006).