

GLOBALNE KLIMATICKÉ ZMENY

Mgr. Anna Pribullová, PhD.

apribull@ta3.sk

Geofyzikálny ústav SAV, oddelenie fyziky atmosféry, 059 60 Tatranská Lomnica

Pod pojmom klíma rozumieme typické reprezentatívne atmosférické podmienky vyskytujúce sa v ľubovoľnej lokalite na zemskom povrchu. V širšom zmysle môžeme hovoriť nielen o klíme na Zemi, ale aj o klíme na ostatných planétach Slnecnej sústavy, alebo dokonca o klíme extrasolárnych planét. Na to, aby bolo možné vyjadriť typické atmosférické podmienky danej lokality, je potrebné ich sledovanie za dlhšie časové obdobia – desiatky rokov, storočia. Klíma môže byť vyjadrená v rôznych priestorových škálach – od planetárnej klímy, cez regionálnu, alebo lokálnu klímu až po mikroklima (napr. mikroklima konkrétneho lesa, mikroklima stajní). Klímu danej oblasti určujú nasledujúce faktory: radiačná bilancia povrchu, rozloženie pevniny a mora, morské a prevládajúce atmosférické prúdenie, pozícia voči kvázistacionárnym tlakovým útvarom, prítomnosť pohorí a ich poloha voči prevládajúcemu prúdeniu a nadmorská výška. Najjednoduchšie rozdelenie zemského povrchu na klimatické pásma dostaneme, ak ako kritérium pre zaradenie do daného klimatického pásma použijeme hodnotu radiačnej bilancie. V tomto prípade môžeme hovoriť o klíme tropickej, subtropickej, o klíme mierneho pásma, o klíme subarktickej, arktickej, či polárnej. V skutočnosti je však klíma oblastí nachádzajúcich sa v rovnakej zemepisnej šírke často odlišná. Kým západné pobrežie mierneho pásma Európy sa vyznačuje miernym vlhkým podnebiem bez výrazných rozdielov medzi zimnou a letnou teplotou, vo vnútrozemí Ázie sa v oblastiach s rovnakou zemepisnou šírkou môžeme stretnúť s klímou suchých stepí, pre ktoré sú typické extrémne studené zimy a horúce letá. Diametrálne rozdiely môžeme tiež pozorovať v subtropickej oblasti, kde sa v rovnakej zemepisnej šírke okrem suchej klímy púští vyskytuje aj vlhká, alebo monzúnová klíma. Rozmanitosť podnebia, je výsledkom spolupôsobenia všetkých klimatických vplyvov. Púšte v subtropickom pásme západných pobreží kontinentov (Sonoran v Sev. Amerike, Atacama v Chile a v Peru, Namib v Južnej Afrike a pobrežná Saharská púšť) sú výsledkom spolupôsobenia studených morských prúdov a oblastí vysokého tlaku vzduchu. Vodná para tu po vyparení sa z oceánskeho povrchu kondenzuje, pričom vďaka nízkej teplote vzduchu sa tvoria hmly a nízka oblačnosť. Pri presune týchto morských vzduchových hmôt (s relatívnou vlhkosťou vzduchu blízku 100%) nad relatívne teplejšiu pevninu však oblačnosť zaniká a merateľné množstvo zrážok sa v púšťach západných pobreží kontinentov registruje často raz za desiatky rokov. Za najsuchšie miesto na Zemi sa považuje Arica v Chile, kde je priemerný ročný úhrn zrážok menší ako 0,8 mm. Medzi oblasti s relatívne malým množstvom zrážok patria studené polárne oblasti, oblasti subtropických tlakových výší a záveterné oblasti vysokých pohorí. Naopak, miesta s najväčšími zrážkovými úhrnmi sa nachádzajú na náveterných stranách pohorí. Cherrapunji v Indii je miesto s najväčšími ročnými úhrnmi zrážok, ktoré dosahujú viac ako 10 000 mm. Nachádza sa v návetří voči letnému monzúnovému prúdeniu. Miesta s najväčšími úhrnmi zrážok vo forme snehu sa nachádzajú na náveterných svahoch Kordilier mierneho pásma v Severnej Amerike. Najchladnejšie aj najteplejšie miesta na Zemi sa nachádzajú nad pevninou, ktorá má v porovnaní s morom menšiu tepelnú kapacitu (rýchlejšie a výraznejšie v porovnaní s morom sa ohrieva aj ochladzuje). Najteplejšími oblasťami na Zemi sú subtropické púšte. Najvyššiu priemernú ročnú teplotu 34 °C zaznamenali v Etiópii (Dallol v Danakilskej depresii 12 °N), kde maximálna teplota prekračovala 38 °C každý mesiac okrem decembra. Vôbec najväčšia teplota vzduchu +58 °C bola zaznamenaná taktiež v oblasti Sahary v lýbijskom meste El Aziza. Teploty prekračujúce 50 °C sa vyskytujú aj v iných subtropických púšťach, kde sa pri bezoblačnej oblohe spojenej so subtropickými oblasťami vysokého tlaku vzduchu povrch

intenzívne zohrieva (napr. v kalifornskom Údolí smrti bola nameraná teplota vzduchu 57 °C, v austrálskom Queenslande 53 °C a rekordne vysoká teplota 50 °C bola v Európe zaznamenaná v španielskej Seville). Medzi najchladnejšie oblasti na Zemi patria zaľadené oblasti (vysoká schopnosť ľadu a snehu odrážať slnečné žiarenie zabraňuje ohrievaniu povrchu) vysokých zemepisných šírok, v ktorých sa počas dlhej polárnej noci povrch iba ochladzuje a počas krátkeho polárneho leta sa veľmi málo ohrieva. Najchladnejším miestom Zeme je Antarktída – na južnom póle vo výške 2800 m n. m. priemerná ročná teplota dosahuje -49 °C. Vôbec najnižšia teplota vzduchu bola zaznamenaná na stanici VOSTOK (72° J z. š.) -88 °C. Na severnej pologuli sú najchladnejšími miestami centrálna Grónsko (priemerná ročná teplota na stanici Eismitte je cca -30 °C) a centrálna Sibír, kde sú merané veľmi nízke teploty v zime pri formovaní sibírskej tlakovej výše (priemerná januárová teplota v Jakutsku (62 °N) je -43 °C, priemerná ročná teplota je tu -11 °C).

Pre vyjadrenie klímy danej oblasti sa používajú najčastejšie merania teploty vzduchu a atmosférických zrážok. Ako doplnková informácia sa používa údaj o výpare vody z povrchu. Na zaradenie oblasti do určitého klimatického pásma sa najčastejšie používa klasifikácia, ktorú zaviedol nemecký klimatológ Wladimir Köppen. Podľa Köppenovej klasifikácie existujú nasledovné základné klimatické typy: A – vlhká tropická klíma, B – suchá klíma, C – vlhká klíma s miernou zimou, D – vlhká klíma so studenou zimou, E – polárna klíma a H – vysokohorská klíma. Tieto základné klimatické typy sa ďalej delia na niekoľko podskupín. Podľa tejto klasifikácie klímy je západná časť Slovenska charakterizovaná klimatickým typom Cfb – vlhkou klímou s miernymi zimami, kde priemerná teplota najchladnejšieho mesiaca je väčšia ako -3 °C a menšia ako 18 °C a priemerná mesačná teplota tu nikdy nestúpa nad 22 °C, pričom aspoň 4 mesiace priemerná mesačná teplota prekračuje 10 °C a zrážky sú rovnomerne rozložené počas roka. Východná polovica územia je zaradená do klimatického typu Dfb, pre ktorý je typická vlhká klíma so studenými zimami, pričom priemerná teplota najchladnejšieho mesiaca tu klesá pod hodnotu -3 °C a teplota najteplejšieho mesiaca je väčšia ako 10 °C. Ostatné kritériá sú rovnaké ako pre typ Cfb. Okrem týchto základných typov sa na Slovensku vyskytuje aj horská klíma – typ H, pre ktorú je charakteristická zmena klimatických typov s nadmorskou výškou.

Klíma predstavuje komplexný jav. Je tvorená všetkými zložkami životného prostredia - atmosférou, litosférou, biosférou, hydrosférou a jej súčasťou – kryosférou. Všetky zložky klímy sa navzájom ovplyvňujú, sú prepojené nespočetnými väzbami. Pre pochopenie a správne modelovanie klimatického systému je dôležité objasnenie väzieb medzi zložkami klímy, ktoré sú zväčša nelineárne. Na vychýlenie jednej zložky klimatického systému z rovnovážnej polohy odpovedá systém pozitívnymi, alebo negatívnymi spätnými väzbami. Za negatívnu spätnú väzbu sa považuje taká odozva systému, kedy sa systém „bráni“ proti zmene, ktorá v ňom nastáva. Pri pozitívnej spätnej väzbe naopak, systém zmenu, ktorá v ňom nastáva, podporuje.

Prvé modely klimatického systému Zeme vychádzali z atmosférických cirkulačných modelov, ktoré boli vyvinuté pre predpoveď počasia. Postupne sa do týchto modelov zahŕňal vplyv ďalších faktorov ovplyvňujúcich klímu. Súčasný klimatický model zahŕňa do výpočtov okrem atmosférickej cirkulácie aj oceánske prúdenie, berú do úvahy vplyv povrchov v rôznej miere odrážať slnečné žiarenie a emitovať tepelné žiarenie. Výrazný pokrok bol dosiahnutý v modelovaní oblačnosti, hoci tento meteorologický prvok nie je doteraz uspokojivo popísaný ani klimatickými ani numerickými predpovednými modelmi. V posledných rokoch sa do klimatických modelov zakomponoval chemizmus atmosféry (podrobnejšie bol pochopený najmä uhlíkový cyklus) a vplyv aerosólov. Zlepšilo sa horizontálne rozlíšenie modelov – klimatické modely sú schopné modelovať regionálnu klímu započítaním miestnych klimatických faktorov. Klimatické modely sú stále viac konzistentné s meranými údajmi, čo je predpokladom toho, aby tieto modely boli schopné vytvárať relevantné scenáre vývoja budúcej klímy a boli schopné určiť podiel prirodzenej klimatickej variability a klimatickej premenlivosti vyvolanej ľudskou činnosťou.

Klímu vybranej oblasti môžeme určiť, ak máme k dispozícii dlhodobé merania meteorologických prvkov (desiatky rokov). Na určenie dlhodobej premenlivosti klímy sú potrebné ešte dlhšie rady meraní. Ideálnym stavom by bolo, keby takéto dlhé časové rady meraní rovnomerne pokrývali povrch Zeme. Súčasné merania tieto podmienky spĺňajú – sieť pozemných meteorologických (projekt GAW) aj aerologických staníc sa zhusťuje, meteorologické bóje poskytujú informácie aj z doteraz nedostupných oblastí v oceáne (projekt TOPEX). V súčasnosti sa začali používať presné gravimetrické merania na určenie hrúbky kontinentálneho zaľadnenia a jeho zmien. Lidary, siete spektrofotometrov a spektro-rádiometrov (projekt AERONET) poskytujú informácie o vlastnostiach, rozložení a koncentrácii aerosólu. Satelity poskytujú nielen údaje o rozložení oblačnosti, o povrchovej teplote, rozložení morského a pevninského ľadu a snehovej pokrývke a zmenách vlastností vegetácie, ale aj o rozložení a optických vlastnostiach aerosólu, a o vertikálnom a horizontálnom rozložení chemických látok, ktoré môžu ovplyvniť radiačnú bilanciu atmosféry. Rady satelitných meraní boli homogenizované a metodiky na nepriame určovanie meteorologických prvkov sú sústavné zlepšované tak, že kvalita satelitných meraní meteorologických prvkov sa vyrovnáva pozemným meraniam. Družicové merania použiteľné pre meteorológiu a klimatológiu však nemajú dlhú históriu – začali v 60-tych rokoch. Kľúčovým pre zlepšenie a zjednotenie metodiky pozemných meteorologických meraní bol medzinárodný geofyzikálny rok 1957/1958, po ktorom nastalo výrazné zhustenie siete meteorologických staníc, a tiež skvalitnenie meraní. V súčasnosti majú klimatológovia k dispozícii najdlhšie časové rady základných meteorologických meraní s dĺžkou okolo 200 rokov, ktoré sú sústredené v najmä v Európe. Na Slovensku má najdlhšiu tradíciu nepretržitých meteorologických meraní observatórium v Hurbanove (merania od roku 1871). Z období, keď neboli k dispozícii nepretržité merania aspoň teploty vzduchu, sú zdrojom informácie o klíme písomné záznamy (napr. v kronikách). Pre odhad toho, ako sa menila klíma Zeme v dávnej minulosti sa používajú rôzne nepriame metódy – v klimatológii vznikol samostatný vedný odbor paleoklimatológia. Paleoklimatológovia sa snažia približne odhadnúť variabilitu klímy v minulosti napr. pomocou analýzy letokruhov starých stromov (dendrochronológia), pomocou obsahu zvyškov organizmov, alebo peľov v sedimentoch vytvorených v určitom období, pričom sa berie do úvahy to, že isté druhy organizmov sú schopné prežiť iba v určitom intervale teploty. Často používanou metódou pre odhad kolísania priemernej teploty na Zemi je analýza obsahu podielu izotopov niektorých prvkov vo vrstvách sedimentov – pevninských, morských, jaskynných, alebo vo vrstvách ľadovcov. Teplota vzduchu sa odhaduje najčastejšie z podielu izotopov kyslíka ^{18}O (koncentrácia tohto izotopu je asi 1 na 1000 atómov O) a ^{16}O . Väčší podiel ľahšieho izotopu ^{16}O v pevninských sedimentoch a v ľadovcoch a naopak jeho menší podiel v oceánskych sedimentoch znamená, že pri relatívne malej teplote vzduchu sa z oceána viac vyparoval ľahší izotop ^{16}O a v oceáne sa hromadil izotop ^{18}O . Ak sa analýzou schránok morských živočíchov zistí väčší podiel $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, predpokladá sa, že v čase vzniku sedimentu bola na Zemi relatívne chladná klíma. V rámci rozsiahleho projektu CLIMAP v 80-tych rokoch, ktorého cieľom bolo analyzovať sedimenty s cieľom získať informácie o zmenách klímy v minulosti, bola pomocou podielu izotopov O odhadnutá dlhodobá variabilita teploty oceána. Od teploty tiež závisí podiel deutéria ^2H vo vzorkách. Okrem podielu izotopov O, sa z analýzy vrstiev ľadovcov dá rozborom bubliniek vzduchu vyskytujúcich sa v ľade získať informácia o zložení vzduchu v minulosti, problematické je datovanie vzduchu. Ďalšia dôležitá informácia z ľadovcov je údaj o podiele izotopu ^{10}Be , ktorý koreluje s intenzitou kozmického žiarenia (v súčasnosti sa skúmajú príčiny korelácie medzi podielom izotopov ^{10}Be a koncentráciou oxidov dusíka vo vzduchu). Zaujímavé sú aj informácie o prachových časticiach v ľadových vrstvách, o ktorých sa predpokladá, že súvisia so sopečnými erupciami, alebo dokonca s udalosťami, kedy na Zem dopadli kozmické telesá. Analýza antarktického ľadu tiež potvrdila, že do roku 1880 sa v atmosfére Zeme nenachádzali freóny, ktoré sa v 20-tom storočí podieľali na vzniku tzv. polárnych ozónových dier. Známe sú výsledky analýzy antarktického ľadovca zo stanice

Vostok, pomocou ktorých bola odhadnutá zmena globálnej teploty a obsahu CO₂ cca 420 tisíc rokov pred súčasnosťou. Experiment EPICA, ktorý prebieha od roku 2003 umožnil analyzovať ľadovec, ktorého najstaršie vrstvy vznikli pred cca 760 tisíc rokmi. Oba experimenty potvrdili tesnú koreláciu medzi globálnou teplotou a obsahom CO₂ a ďalších tzv. skleníkových plynov vo vzduchu. Analyzujú sa nielen polárne ľadovce, ale aj pevninské mimopolárne zaľadnené oblasti. Skúmanie grónskych ľadovcov v rámci experimentov GRIP/GISP (najstaršie vrstvy ľadu 120 tisíc r. staré) a neskôr NGRIP spolu s analýzou sedimentov v Atlantickom oceáne prispeli k poznaniu charakteru variability teploty pred posledným rozsiahlym kontinentálnym zaľadnením na severnej pologuli. Rozbor vrstiev ľadu získaných z čínskeho ľadovca Guilya (700 tisíc r.) bol až do vyhlásenia výsledkov experimentu EPICA považovaný za najdlhší časový rad globálnej teploty odvodený zo vzoriek z ľadovcov.

Vek Zeme sa odhaduje na cca $4,6 \times 10^9$ rokov. Analýza sedimentov umožňuje získať informácie o dianí na Zemi iba za asi miliardu rokov. Predpokladá sa, že počas celej existencie Zeme tu bolo prevažne teplejšie, než v súčasnosti a že počas dlhých období na Zemi chýbali polárne ľadové čiapočky. Existujú geologicky podložené dôkazy o existencii piatich veľkých zaľadnení¹ na Zemi. Prvé veľké zaľadnenie sa datuje do obdobia pred asi 2 miliardami rokov (hurónska ľadová doba). Ďalšie, oveľa viac zdokumentované, začalo asi pred miliardou rokov. Existuje hypotéza (teória zemskej snehovej gule), že mohlo byť vyvolané konfiguráciou pevniny. Podľa tejto predstavy sústredenie pevniny v tropickom pásme Zeme malo za následok rozsiahle zvetrávanie hornín, pri ktorom sa z atmosféry postupne odstraňoval CO₂. To mohlo mať za následok postupné oslabovanie skleníkového efektu atmosféry a ochladzovanie. Na konci tohto obdobia sa v sedimentoch nachádza hrubšia vrstva bohatá na zlúčeniny uhlíka, čo by mohlo ukazovať na obdobie silnej sopečnej činnosti, po ktorom sa na Zemi začalo opäť otepľovať. Geologické dôkazy dobre dokumentujú ďalšiu ľadovú dobu (karskú), ktorá nastala cca pred 300×10^6 r. (druhojory - perm/karbón). Jedna z hypotéz tvrdí, že príčinou tejto ľadovej doby mohol byť veľký rozmach nahosemenných rastlín a následne veľká spotreba CO₂ (ale aj produkcia O₂), čo malo opäť za následok oslabenie skleníkového efektu v atmosfére Zeme a ochladenie. Koniec tejto ľadovej doby pravdepodobne súvisí s uvoľnením CO₂ späť do vzduchu z horiacich odumretých zvyškov papradí a plavúňov. Súčasná ľadová doba začala asi pred 40 - 60 miliónmi rokov. Pred cca 2 miliónmi rokov kontinentálne ľadovce pokrývali rozsiahle plochy severnej pologule. O tomto období sa hovorí ako o ľadovej dobe pleistocénu. Kontinentálne ľadovce však nepokrývajú rozsiahle oblasti mierneho pásma kontinuálne – striedajú sa obdobia, kedy sa úplne roztopia (ako v súčasnosti) s obdobiami, kedy sa opäť rozširujú. Relatívne teplejšie obdobia sa nazývajú interglaciálmi a pretrvávajú cca 10 tisíc rokov². V súčasnosti žijeme v interglaciále. Počas súčasnej doby ľadovej sa v radoch odhadnutej globálnej teploty vzduchu vyskytujú periodické variácie s periódami 100 tisíc, 40 tisíc a 20 tisíc rokov. Veľké zaľadnenie Riss sa vyskytovalo pred 180 – 120 tisíc rokmi, po ňom nasledovalo oteplenie (teplota bola veľmi blízka súčasnej), nazývané aj interglaciál Eomiánskeho obdobia. O glaciále Würm hovoríme v období od 70 tisíc do 15 tisíc pred súčasnosťou. Predpokladá sa, že počas würmskeho zaľadnenia, ktoré vrcholilo pred cca 18 – 20 tisíc rokmi, bolo v kontinentálnych ľadovcoch viazané také množstvo vody, že hladina oceána bola o cca 85 m nižšie než je dnes a v Európe ľadovce siahali až k severnej hranici Nemecka a Čiech. Návrat ochladenia bol zaznamenaný aj cca 10 tisíc r. pred súčasnosťou – toto obdobie je známe pod názvom mladší Dryas. Spomienku na toto obdobie predstavuje z flóry tzv. glaciálny relikv - dryádka osemplupienková, ktorá rastie v horských polohách dodnes. Relatívne teplé obdobie na Zemi

¹ Termín ľadová doba pochádza z ľudového rozprávania drevorubačov z okolia ľadovca Grimsel vo Švajčiarsku, ktorí podali svedectvo o tom, že rozsah tohto ľadovca sa v histórii výrazne menil.

² Interstadiálom sa nazývajú kratšie obdobia s relatívne teplejšou klímou vyskytujúce sa počas poslednej doby ľadovej.

panovalo pred 8 – 5 tisíc rokmi a označuje sa termínom klimatické optimum. Predpokladá sa, že priemerná globálna teplota bola cca o 2 – 3 °C väčšia ako v súčasnosti. Pred 5000 rokmi sa opäť ochladilo, rozšírili sa horské ľadovce, ale rozsiahlejšie kontinentálne zaľadnenie už nenastalo. Okolo roku 1000 na severnej pologuli panovali priaznivé klimatické podmienky – na Britských ostrovoch sa pestoval vinič a Grónsko vďaka pastvinám, ktorým sa darilo na pobreží, pravdepodobne dostalo svoj názov (Greenland - zelená krajina). Okolo roku 1200 však klíma začala vykazovať výrazné výkyvy. V Európe sú zachované záznamy o výskyte extrémne suchých období, záplav, studených zím, ktoré sa striedali s teplejšími. Okolo roku 1300 bolo zaznamenaných niekoľko období hladomoru v Európe. Vikingovia museli opustiť Island a Grónsko, kvôli neznesiteľným podmienkam. Od roku 1400 do roku 1500 sa ochladzovanie zmiernilo, potom teploty začali opäť klesať. Začala sa Malá doba ľadová, ktorá pretrvala až do konca 19. storočia. Extrémom bol rok 1816 (rok bez leta) kedy sneh v júni zničil úrodu obilia v Kanade a na severe Spojených štátov a mrazy boli zaznamenané aj v júli a v auguste. Hladomor panoval v tomto roku aj v Európe. Od konca 19-teho storočia do roku 1940 globálna teplota rástla, od 40-tych do 70-tych rokov sa vzostup globálnej teploty zastavil a od 70-tych rokov do súčasnosti pozorujeme už iba vzostup globálnej teploty.

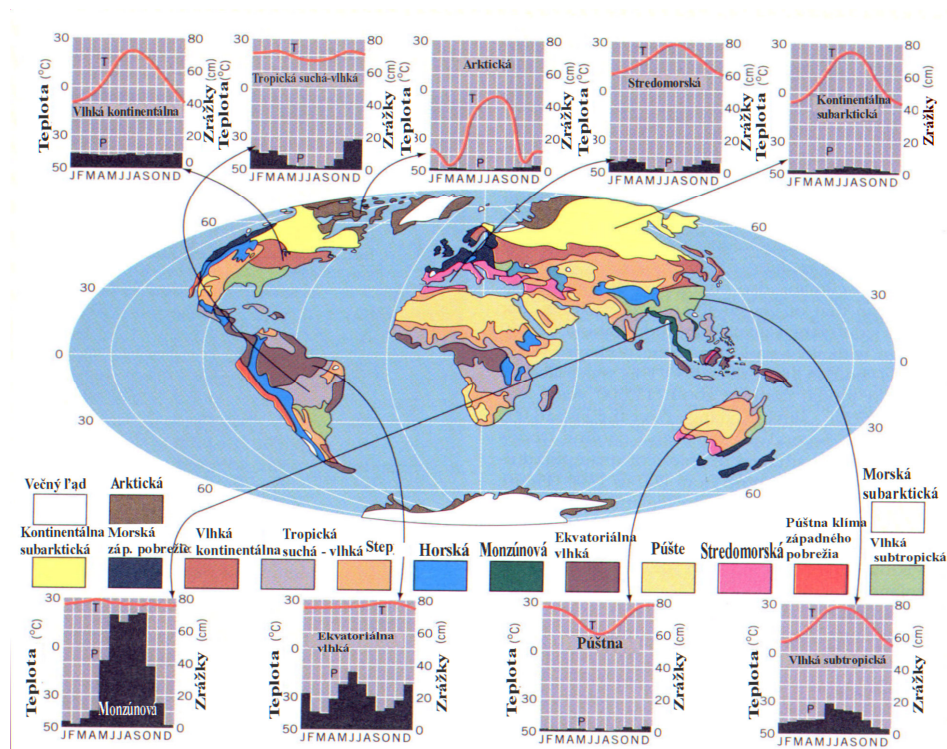
Dokonale pochopiť príčiny premenlivosti klímy Zeme, ktoré nastali v jej histórii, sa ľudstvu zatiaľ nepodarilo. Žiadna teória osve nedokáže uspokojivo vysvetliť všetky druhy klimatickej premenlivosti na Zemi. Globálnu klímu môžu ovplyvniť tie faktory, ktoré spôsobujú zmenu radiačnej bilancie Zeme – či už prostredníctvom variability astronomických parametrov Zeme, zmenou toku energie prichádzajúcej zo Slnka, alebo prostredníctvom zmien vlastností zemského povrchu a prostredia, cez ktoré na Zem energia prichádza, ale aj odchádza späť do kozmického priestoru. V časovej škále miliónov rokov klímu Zeme ovplyvňuje aj rozmiestnenie pevniny a oceánov a tiež vznik a zánik veľkých pohorí. Zrážka Zeme s väčším kozmickým telesom by klímu Zeme mohla zmeniť náhle prostredníctvom viacerých procesov. Z dlhodobého hľadiska sa uvažuje aj s možným vplyvom zmeny polohy Slnčnej sústavy v rámci Galaxie. Javy, ktoré ovplyvňujú klímu Zeme možno rozdeliť na vonkajšie (mimo Zeme) a vnútorné (vznikajúce na Zemi a v jej atmosfére).

Kľúčovým zdrojom energie pre Zem je Slnko. Relatívne malé zmeny energie, ktorá dopadá zo Slnka na povrch Zeme, môžu vyvolať zmeny klímy na Zemi. Klimatické modely ukázali, že už zmena toku slnečnej energie cca 0,5%/ 100 r. sa môže prejaviť na vlastnostiach globálnej klímy, zmena toku slnečnej energie o 1,0%/ 100 r. ovplyvní globálnu teplotu o cca 1°C. Na to, aby sme posúdili dlhodobé zmeny toku energie prichádzajúcej od Slnka však neexistujú dostatočne dlhé rady presných meraní. Jednou z najlepšie zdokumentovaných prejavov slnečnej aktivity je tzv. 11-ročný slnečný cyklus. V čase výskytu väčšieho množstva slnečných škvrn stúpa množstvo energie vyžiarenej Slnkom. Táto zmena je nezanedbateľná najmä v spektrálnej oblasti s najkratšími vlnovými dĺžkami žiarenia (UV oblasť spektra). V radoch meraní celkového ozónu bol detegovaný mód s periodicitou 11 rokov. Predpokladá sa, že variabilita slnečnej aktivity spojená s 11-ročným cyklom môže ovplyvniť dianie vo vyšších vrstvách atmosféry – mezofére, stratosfére a následne môže ovplyvniť procesy prebiehajúce v troposfére. Intenzita slnečného cyklu sa v čase mení. V období 1645 – 1715 na Slnku neboli pozorované takmer žiadne slnečné škvrny (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 sú zatiaľ známe. Často diskutovaný je aj možný vplyv zmien polarizácie magnetického poľa Slnka, ktoré sa uskutočňujú s 22-ročnou periódou. V niektorých radoch meraní teploty vzduchu sa našli signály s podobnou periódou.

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. Vplyv periodických zmien týchto parametrov na klímu Zeme si ako prvý uvedomil srbský vedec Milutin Milanković. V roku 1930 publikoval teóriu, podľa ktorej sa množstvo slnečnej energie dopadajúcej na hornú hranicu atmosféry Zeme

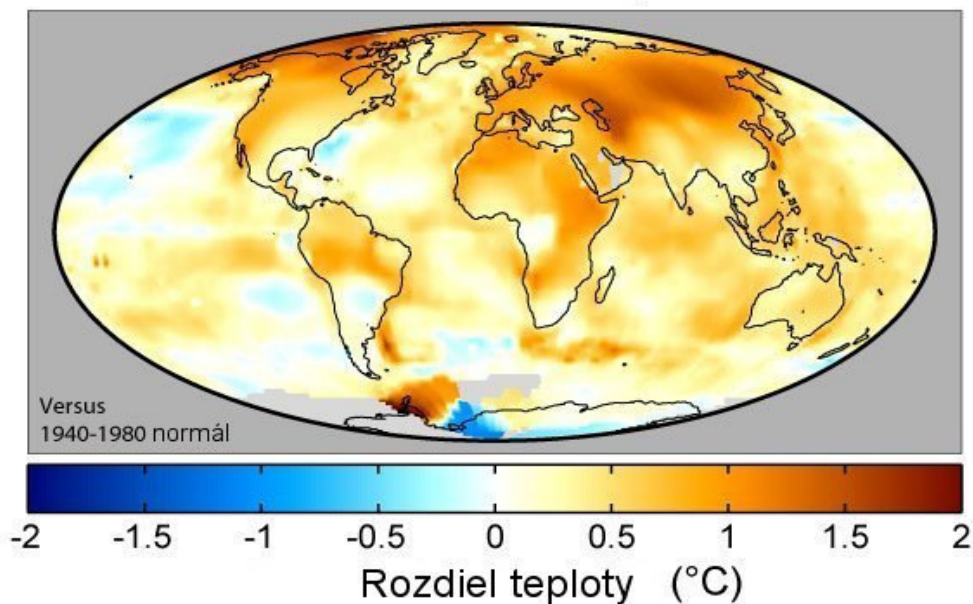
periodicky mení so zmenami astronomických parametrov Zeme. Zmena excentricity obežnej dráhy Zeme sa mení s periódou asi 100 tisíc r. Počas jednej periódy sa obežná dráha Zeme zmení z kruhovej dráhy na eliptickú s excentricitou 0,06. V súčasnosti je obežná dráha Zeme veľmi podobná kruhovej (excentricita 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 $\pm 3,5\%$. Keby excentricita dráhy Zeme dosahovala najväčšiu hodnotu, množstvo slnečnej energie dopadajúce na hornú hranicu atmosféry by sa počas roka menilo v rozsahu $\pm 10,0\%$. S excentricitou obežnej dráhy Zeme sa mení aj časové obdobie medzi jarnou a jesennou rovnodennosťou a následne dĺžka ročných období. 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 r. sa mení od $22,5^\circ$ do $24,5^\circ$. Väčší uhol sklonu znamená výraznejšie vyjadrené ročné obdobia vo vysokých zemepisných šírkach. Rovníkové oblasti Zeme tento astronomický parameter neovplyvňuje. 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 precesný pohyb, čo spôsobuje periodické zmeny jej smerovania (perióda precesného cyklu zemskej osi je cca 27 tisíc r.). 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.** Analýza sedimentov z oceánskeho dna (experimet CLIMAP) v 70-tych rokoch potvrdila tesný vzťah medzi variáciami klímy (s periodicitou 10 – 100 tisíc r.) na Zemi a Milankovičovými astronomickými parametrami.

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 kĺžu po kvapalnom podklade. Pri tomto pohybe sa niektoré dosky kontinentov od seba vzdávajú, iné sa pod seba podsúvajú. Tektonika kontinentálnych platní ovplyvňuje klímu Zeme rôznymi spôsobmi – sústredenie 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. Prach, popol a chemické zlúčeniny, ktoré sa uvoľňujú do atmosféry pri sopečných erupciách ovplyvňujú chemizmus vzduchu v troposfére, aj v stratosfére, menia radiačnú bilanciu atmosféry a tým môžu výrazne ovplyvniť globálnu teplotu a klímu. Posledné 2 veľké sopečné erupcie Mt. El Chicon (1982) a Mt. Pinatubo (1991) sú dobre zdokumentované pomocou pozemných aj satelitných meteorologických meraní. Ukázalo sa, že prach a popol bol z atmosféry odstránený v priebehu niekoľkých mesiacov po erupcii, avšak drobné čiastočky tvorené prevažne zlúčeninami síry v atmosfére pretrvali dlhšie a počas 2 - 3 rokov po erupcii bolo zaznamenané mierne globálne ochladenie. Súčasná práca ukazuje, že po sopečnej erupcii Mt. Pinatubo bol detegovaný aj globálny pokles zrážok. To varuje pred takými opatreniami proti globálnemu otepľovaniu, pri ktorých by sa v kozme nainštalovali štíty, zabraňujúce slnečnému žiareniu dopadať na povrch Zeme a ohrievať ho. Súčasná veda nevie odpovedať na otázku, ako by to ovplyvnilo globálny režim zrážok. Na druhej strane, analýza ľadovcov

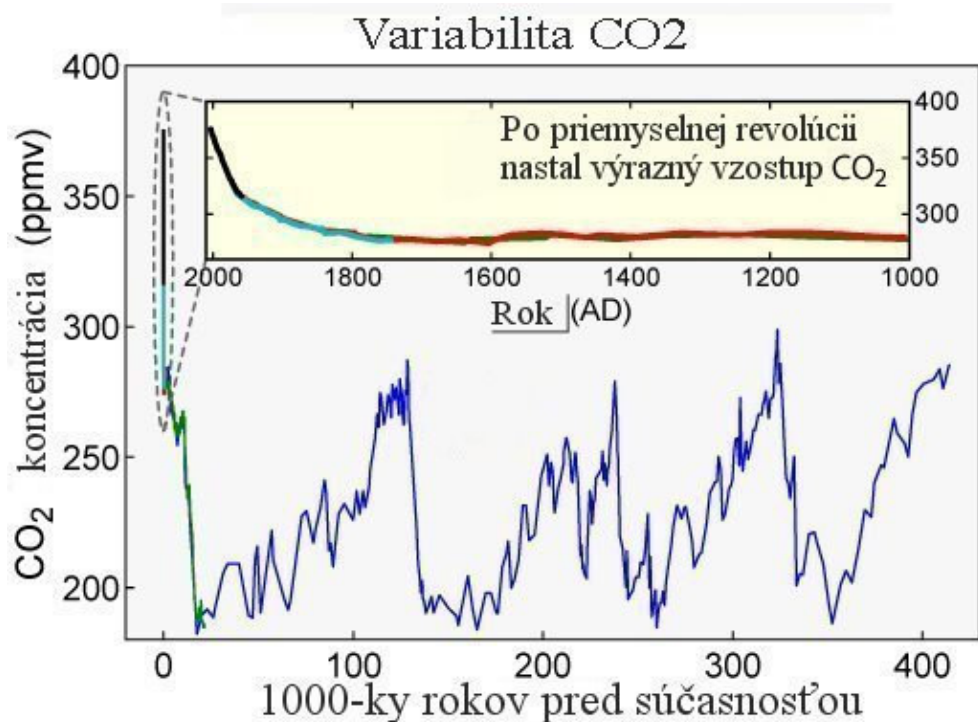


Obr. 1: Klimatické oblasti Zeme. Vybrané sú hlavné klimatické typy charakterizované typickým režimom teploty vzduchu a zrážok.

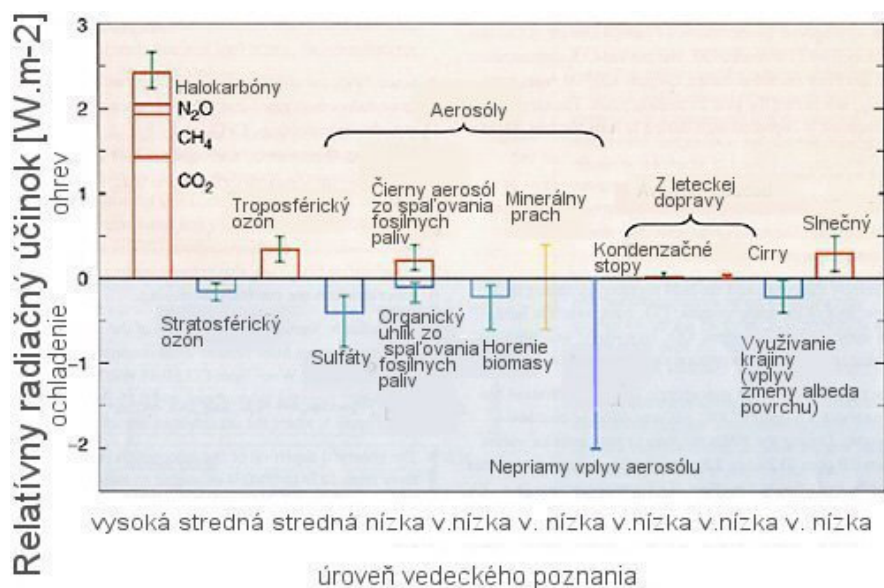
1995-2004 Priemerná teplota



Obr. 2: Rozdiely priemernej teploty vzduchu vypočítanej v období 1995 – 2004 a 1940 – 1980. Údaje získané z NASA GISS meraní teploty vzduchu na pevnine a z meraní povrchovej teploty oceána. Priemerný globálny vzostup teploty v období 1995 – 2004, vzhľadom na klimatický normál 1940 – 1980 je 0,42 °C.



Obr. 3: Variácie koncentrácie oxidu uhličitého (CO₂) za posledných 420 tisíc rokov – dominanté sú zmeny, súvisiace so striedaním ľadových a medzľadových dôb, spôsobené zmenami Milankovičových astronomických parametrov. **Nárast koncentrácie CO₂ po priemyselnej revolúcii nemá za posledných 420 tisíc rokov obdobu a môže súvisieť so spaľovaním fosílnych palív (údaje získané analýzou ľadovcovej vrstvy na antarktiskej stanici Vostok).**



Obr. 4: Predpokladaný radiačný účinok a prehľad stavu súčasného vedeckého poznania vybraných javov ovplyvňujúcich globálnu teplotu Zeme (IPCC, 2001).

ukazuje, že počas niektorých relatívne chladných období Zeme bola kyslosť ľadu relatívne vyššia, čo by mohlo súvisieť s vysokým obsahom zlúčenín síry vo vzduchu a ich možným vplyvom na vznik kontinentálneho zaľadnenia. K faktorom, ktoré ovplyvňujú charakter povrchu kontinentov vo veľmi malom časovom rozmedzí patrí zmena charakteru povrchu spôsobená človekom – najmä odlesňovaním, poľnohospodárskymi činnosťami a urbanizáciou. Vo veľkých mestách vďaka brzdeniu atmosférického prúdenia budovami, odovzdávaniu tepla budov do okolia a tieneniu povrchu budovami vzniká špecifická, tzv. mestská klíma (mestský ostrov tepla). Z hľadiska vyhodnotenia globálnej teploty sa preto zohľadňuje to, či sa daná klimatická stanica nachádza v blízkosti veľkého sídla, alebo vo voľnej prírode. Odlesňovanie, hlavne v oblasti amazonských pralesov, sa týka takých rozsiahlych plôch, že tento proces môže významne ovplyvniť radiačnú bilanciu a regionálnu klímu. Odlesnením sa mení schopnosť povrchu odrážať slnečné žiarenia a mení sa tiež vodný režim odlesnenej oblasti, čo v konečnom dôsledku môže viesť k jej vysušeniu.

V súvislosti so sopečnými erupciami bol spomenutý možný vplyv aerosólu na globálnu klímu. Nedostatočné zakomponovanie vplyvu aerosólov je globálnym klimatickým modelom často vyčítané. Súčasný stav poznania tejto zložky atmosféry je taký, že predpokladáme celkový chladiaci účinok aerosólov na globálnu teplotu. V tomto roku však boli publikované výsledky tzv. in situ meraní vlastností aerosólu v južnej Ázii. Z meraní vyplýva, že **aerosól bohatý na sadze a prach v tejto oblasti prispieva k otepľovaniu rovnakou mierou, ako nárast koncentrácie skleníkových plynov** vo vzduchu a že je faktorom, ktorý výrazne prispieva k pozorovanému rýchlemu topeniu sa himalájskych ľadovcov.

Zlyhanie termo-halinnej cirkulácie (THC) je ďalší jav, ktorý môže byť príčinou veľkých klimatických zmien a ich nerovnakého výskytu na severnej a na južnej pologuli. Pod pojmom termo-halinná cirkulácia sa myslí oceánske prúdenie, vyvolané rozdielmi teploty, hustoty vody a atmosférickou cirkuláciou. Hustotu morskej vody okrem teploty ovplyvňuje aj obsah rozpustených látok – najmä solí. V oceánickej cirkulácii majú dôležitú úlohu oblasti, kde nastáva vertikálne premiešavanie vody (miest, kde sa do hĺbín mora dostáva na kyslík bohatá povrchová voda a opačne). Pobrežie Chile a Peru je oblasťou, kde sa k povrchu dostáva relatívne studená voda z hĺbky mora. Južné pobrežie Grónska je naopak oblasťou, kde sa pôvodne teplá a na soli bohatá voda Gofského prúdu chladí a klesá do hĺbky. **Teória zlyhania THC hovorí, že ak nastane výrazné zvýšenie teploty vzduchu v polárnej oblasti a následne sa roztopí väčšina polárneho ľadu, dodanie sladkej a studenej vody do Severného Atlantiku môže spôsobiť posun Gofského prúdu a oblasti, kde ochladená voda tohto prúdu klesá do hĺbín oceánu, smerom k rovníku s následným dramatickým ochladením v západnej Európe a možným rozpútaním kontinentálneho zaľadnenia v tejto oblasti.** Ak takáto zmena nastala v mladšom Dryase, alebo v Malej dobe ľadovej, paleoklimatológovia hovoria, že nastala relatívne rýchlo – behom niekoľkých desaťročí.

Globálna zmena klímy môže nastať ako dôsledok vzostupu koncentrácie tzv. skleníkových plynov v atmosfére. Vzostup koncentrácie plynov v atmosfére schopných absorbovať infračervené žiarenie potvrdzujú v súčasnosti merania. Skleníkovým plynom vyskytujúcim sa vo vzduchu v najväčšom množstve je **vodná para. Zabezpečuje asi 80% z celkového tzv. skleníkového efektu atmosféry. Od predindustriálnych čias vzrástla koncentrácia CO₂ (z cca 270 ppm (ppm – počet častíc na 10⁶ častíc vzduchu) na dnešných cca 380 ppm, pričom za posledných 650 tisíc r. sa koncentrácia tohto plynu pohybovala v rozpätí od 180 do 300 ppm), zvýšila sa koncentrácia metánu vo vzduchu (1774 ppb v roku 2005, za 650 tisíc r. sa pohybovala v rozmedzí 320 -790 ppb), rastie aj obsah NO_x vo vzduchu. Okolo roku 2000 prestala stúpať koncentrácia freónov v atmosfére (vyznačujú sa silnou absorpciou v oblasti vlnových dĺžok žiarenia zodpovedajúcim atmosférickému oknu – oblasť vlnových dĺžok 8000 – 12 000 nm), vďaka opatreniam Montrealského protokolu. Za najväčší problém z hľadiska rastu koncentrácie skleníkových plynov sa považuje CO₂, vďaka relatívne vysokej koncentrácii, v porovnaní s ostatnými skleníkovými plynmi, hoci napr. metán má schopnosť zachytiť viac tepelného žiarenia ako CO₂.** Pod pojmom skleníkový efekt sa v klimatológii

myslí schopnosť atmosféry absorbovať tepelné žiarenie zemského povrchu, pri ktorom nastáva ohrev atmosféry a jej vyžarovanie tak späť k povrchu Zeme, ako aj do kozmického priestoru. Pri raste skleníkového efektu atmosféry stúpa množstvo energie, ktoré atmosféra vyžiari späť k povrchu Zeme a celý systém Zem-atmosféra sa začína zahrievať.

O klimatickej zmene podľa definícií hovoríme, ak sa pozoruje štatisticky významná zmena priemeru, alebo variability klimatického systému a táto zmena pretrváva dlhšie časové obdobie (desiatky rokov). Od začiatku 20-teho storočia pozorujeme globálny vzostup teploty vzduchu, ktorý však nemal počas tohto obdobia rovnakú veľkosť. Od osemdesiatych rokov pozorujeme akceleráciu rastu teploty vzduchu, čo potvrdzuje to, že v čase od roku 1995 do roku 2006 (12 rokov) sa vyskytlo 11 najteplejších rokov od roku 1850. Za posledných 100 rokov globálna teplota stúpla asi o 0,74 °C. Charakter súčasného globálneho oteplenia je taký, že väčšie oteplenie pozorujeme v polárnom (stúpajúci trend teploty v Arktíde asi dvojnásobný v porovnaní s globálnym trendom) a miernom pásme severnej pologule a nad pevninou, v porovnaní so subtropickou a tropickou oblasťou, oceánom a južnou pologulou. Na zistené zmeny teploty vzduchu nemá vplyv tzv. mestský ostrov tepla. S globálnym vzostupom teploty sú konzistentné pozorované úbytky morských a kontinentálnych ľadovcov, vzostup teploty oceánu (pozorovaný do hĺbky cca 3 km), vzostup hladiny oceána, vzostup koncentrácie skleníkových plynov vo vzduchu a pokles teploty v stratosfére (len čiastočne vyvolaný úbytkom ozónu). Podľa modelov by mal byť v súčasnosti pozorovaný väčší vzostup globálnej teploty. Predpokladá sa, že regulovať vzostup teploty v súčasnosti pomáhajú antropogénne a sopečné aerosóly vo vzduchu, ktoré majú prevažne chladiaci účinok. Taktiež koncentrácia CO₂ vo vzduchu nezodpovedá antropogénnym emisiám tohto plynu (je menšia). V súčasnosti vo zvýšenej miere absorbuje CO₂ oceán a mladé porasty lesov. Ľudstvo sa v súvislosti s pozorovaným oteplením obáva rýchlosti, s akou teraz stúpa tak koncentrácia skleníkových plynov, ako aj globálna teplota, obáva sa rýchlych zmien atmosférických a oceánických cirkulačných podmienok, ktorým sa nedokážu prispôsobiť prírodné ekosystémy. Je tu tiež obava z presadenia sa výrazných pozitívnych, alebo negatívnych spätných väzieb v klimatickom systéme Zeme a z prechodu klimatického systému do nerovnovážneho stavu.

Diskutovanými témami, na ktoré súčasná veda nedáva jednoznačnú odpoveď, je podiel vplyvu človeka na globálne oteplenie a potreba regulácie globálneho oteplenia. V roku 1988 bol pri OSN zriadený Medzinárodný panel pre výskum klimatickej zmeny na Zemi (IPCC). Cieľom tohto panelu bolo sústreďovať relevantné poznatky o stave klímy na Zemi. Správy o stave klímy sú vydávané každých 6 rokov. Posledná vzbudila rozruch v roku 2007. Správa má tri časti – v prvej sú zhrnuté poznatky o stave klímy na Zemi doplnené o poznatky týkajúce sa variability klímy v minulosti a tiež scenáre vývoja budúcej klímy, v druhej časti sú uvedené očakávané dopady klimatických zmien na ľudskú spoločnosť a prírodu, posledná časť správy IPCC sa zaoberá opatreniami na zabránenie nepriaznivým dopadom klimatických zmien. V tomto roku boli samostatne publikované tie scenáre vývoja spoločnosti v budúcnosti (správa SRES), ktoré sa potom použili v prognózach vývoja budúcej klímy. Medzi najdôležitejšie zistenia poslednej správy IPCC patrí to, že zmeny globálnej teploty vzduchu od začiatku minulého storočia sú zanedbateľne ovplyvnené vplyvom tzv. mestského ostrova tepla. Správa potvrdila dvojnásobný nárast teploty vzduchu v Arktíde, v porovnaní s globálnym trendom. Kvantifikovaný bol súčasný obsah skleníkových plynov vo vzduchu a ich radiačný účinok na globálnu klímu (2,3 Wm⁻²). S vysokou spoľahlivosťou bolo vypočítané, že celkový radiačný účinok vyvolaný ľudskou činnosťou predstavuje 1,6 Wm⁻², pričom bolo odhadnuté, že antropogénny aerosól pôsobí proti globálnemu otepleniu s radiačným účinkom -0,5 Wm⁻² a celková oblačnosť redukuje globálne oteplenie s účinkom asi -0,7 Wm⁻². Posledná správa IPCC uvádza aj údaj o rozsahu citlivosti klimatického systému Zeme, pod ktorým sa myslí odhad toho, ako vzrastie teplota na Zemi, ak sa zdvojnásobí množstvo skleníkových plynov vo vzduchu – rozsah predpovedaného vzostupu je 2,0 – 4,5 °C (najlepší odhad je 3,0 °C). Modelovanie budúcej klímy pre definované skupiny scenárov vývoja emisií, populácie a technologického rozvoja na Zemi ukázalo že do r. 2030

sa na všetkých kontinentoch bude otepľovať, rozsah modelovaného vzostupu teploty do r. 2100 je 1,8 – 4,0 °C. Za problematické v modelovaní bolo označené zakomponovanie vplyvu oblačnosti, aerosólu (napriek značnému pokroku v poznaní jeho optických vlastností) a tzv. uhlíkovej spätnej väzby (nie je možné odhadnúť, ako intenzívne bude v budúcnosti absorbovať CO₂ oceán a pevnina). Súčasťou správy sú informácie aj o stave hydrologického cyklu, prognózach jeho vývoja, o stave hladiny oceánov a kryosféry. V tomto storočí treba počítať s nárastom zrážkových úhrnov v miernom a polárnom pásme a suchšie bude v subtropoch (podľa jedného zo scenárov tu poklesnú zrážkové úhrny až o 20%). Všetky modely a scenáre predpokladajú skrátenie doby so snehovou pokrývkou, topenie pevninských a morských ľadovcov (pre viacero modelov a scenárov okolo r. 2050 zmizne v lete arktický morský ľadový kryt). Pravdepodobne vzrastie početnosť a intenzita tropických cyklón. Za posledných 100 rokov stúpila hladina oceánu o 17 cm, od roku 1993 rastie rýchlosťou 3,1 mm/r. Príčinou vzostupu oceánskej hladiny je okrem prísunu vody z roztopených ľadovcov aj samotná tepelná rozťažnosť vody. IPCC (2007) upozorňuje, že do modelov použitých v správe nebol zahrnutý úbytok ľadovcov roztekáním sa. Tento faktor nebol doteraz meraný. Ďalším dôsledkom rastu množstva CO₂ vo vzduchu a jeho zvýšenej absorpcie morom je očakávaný rast kyslosti oceána. Správy IPCC predstavujú najkomplexnejší a najobjektívnejší súhrn informácií týkajúcich sa globálneho otepľovania. Závbery správy predstavujú kompromis medzi vedeckou komunitou zaoberajúcou sa touto problematikou. V závere správy sú uvedené odporúčania pre zmiernenie následkov javov, ktoré sú očakávané v budúcnosti. Uvádzajú sa tam aj možné spôsoby riešenia problémov, ktoré vzniknú v súvislosti s globálnym otepľovaním v budúcnosti. V správe sú tiež odhadnuté ekonomické náklady potrebné pre stabilizáciu obsahu skleníkových plynov vo vzduchu na určitej hladine do r. 2030 a 2050. Asi 3% globálneho HDP by stálo ľudstvo stabilizovanie koncentrácie CO₂ do r. 2030 v rozmedzí 445 – 710 ppm. Prognózy do roku 2050 už náklady na rovnakú redukciu CO₂ odhadujú na 1 - 5% HDP. K podobným záverom (náklady na redukciu skleníkového efektu budú rásť, čím neskôr sa začne realizovať) dospel aj ekonóm Nicolas Stern. Jeho správu (2006), podľa ktorej začiatok redukcie CO₂ v súčasnosti by stál cca 1% globálneho HDP, pričom by sa v budúcnosti mohli náklady na obmedzenie skleníkového efektu vyšplhať až na 20% HDP, kritizovali dokonca aj ekonómovia IPCC, ako prognózu, ktorá je založená na najhoršom scenári vývoja klímy. Stern však varuje, že následky nekontrolovaného globálneho otepľovania v budúcnosti môžu viesť k úplnému zlyhaniu globálneho trhu (situácia ako po svetových vojnách). Všeobecne sú odhady nákladov na redukciu CO₂ v súčasnosti, či budúcnosti, ako aj ekonomické výpočty nákladov na škody spôsobené globálnym oteplením rôznorodé a vzhľadom na rôzne metódy výpočtov (najmä prognóz vývoja ekonomických parametrov) neporovnateľné.

Na vzostupe koncentrácie CO₂ vo vzduchu sa najviac podieľa energetika a doprava. Najväčší potenciál na šetrenie teplom a následne aj redukciu CO₂ majú budovy – zateplenie, nové technológie výstavby. Ku skleníkovému efektu prispievajú takmer rovnakou mierou poľnohospodárstvo (produkcia metánu) ako priemysel. K redukcii obsahu skleníkových plynov vo vzduchu existujú rôzne prístupy – reštrikčný, pri ktorom by sa emisie skleníkových plynov obmedzili direktívne, pričom by bolo nutné zredukovať poľnohospodárstvo, výrobu aj dopravu, alebo taký, pri ktorom by sa neobmedzovala produkcia skleníkových plynov direktívne, ale nepriamo by sa podporovali také zdroje energie, palív a technológie, pri ktorých sa neprodukuje CO₂ a tiež také technológie, ktoré by z atmosféry tento plyn odstraňovali, alebo také, ktoré by bránili ďalšiemu ohrevu Zeme (geoinžinierske aktivity – napr. vesmírne štíty brániace dopadať slnečnej energii na povrch Zeme). V súčasnosti prevláda názor, že vývoj čistých technológií na priamu redukciu oteplenia Zeme, alebo na redukciu obsahu CO₂ (napr. podpora absorpcie CO₂ riasami, pestovanými v oceáne, alebo natlačením CO₂ z atmosféry späť do litosféry) vo vzduchu nie je taký, aby v najbližších 10-ročiach priniesli výraznú redukciu koncentrácie skleníkových plynov vo vzduchu. Preto v súčasnosti by sa účinne mohli emisie CO₂ obmedziť skôr reštrikčnými opatreniami (aspoň

dočasnými, kým nebudú k dispozícii iné účinné spôsoby redukcie skleníkových plynov v atmosfére). Takýmto opatrením je tzv. Kyótsky protokol, ktorého cieľom je do roku 2012 zredukovať úroveň CO₂ vo vzduchu na hodnoty merané do r. 1990. V roku 2005 sa Kyótsky protokol stal platným, avšak doteraz ho neratifikovali najväčší producenti skleníkových plynov na 1 obyvateľa, U.S.A. a Austrália. Tieto krajiny nesúhlasia s kritériom rozdelenia štátov na rozvojové a rozvinuté podľa produkcie skleníkových plynov na obyvateľa. Argumentujú najmä tým, že India a Čína sú zaradené medzi rozvojové krajiny vďaka veľkej populácii, avšak každoročne zvyšujú produkciu skleníkových plynov (za obdobie 1990 - 2004 v Indii vzrástla produkcia skleníkových plynov o 55%, v Číne o 47%). Obmedzenie spotreby fosílnych palív, ktoré je podstatné pre obmedzenie emisií skleníkových plynov, je citlivou úlohou, lebo znamená zásah do regulácie trhu a ekonomiky. Je otázne, či sa v blízkej budúcnosti podarí dospieť k názorovému zjednoteniu hlavných producentov skleníkových plynov v regulácii ich emisií a v obmedzení rýchleho globálneho otepľovania, ktoré na Zemi prebieha. Okrem potreby regulovať spotrebu fosílnych palív z hľadiska ich vplyvu na rast skleníkového efektu atmosféry, je dôležité obmedziť závislosť hospodárstva od týchto palív aj pre ich stále väčšiu nedostatnosť a cenu. Všeobecne sa hovorí o súčasnej tzv. uhlíkovej kríze.

Vo vzdelávacom procese je dôležité objektívne informovanie o problematike globálneho otepľovania - objasnenie fyzikálnych procesov, ktoré s touto problematikou súvisia; objasnenie stavu vedeckého poznania tejto problematiky a doposiaľ nevyriešených fyzikálnych problémov, informovanie o predpokladanom budúcom vývoji klímy Zeme a dopadoch na spoločnosť a formovanie takého uvedomenia novej generácie, aby obmedzila správanie prispievajúce k zväčšeniu skleníkového efektu.

Odporúčané doplnkové zdroje informácií:

www.ipcc.ch/, en.wikipedia.org/wiki/Climate_change,
www.ipcc.ch/about/anniversarybrochure.pdf

Pascal, Acot, 2005: Historie změn klimatu na Zemi, Karolínium, Praha.

Pribullová, A., 2004, Milutin Milankovic a astronomická (insolačná) teória klimatických zmien, Kozmos č. 6.

Pribullová, A., 2004, Cesta do hlbín záhadnej povahy pani klímy, Kozmos č. 4-5.

Pribullová, A., 2005, Prípad strateného uhlíka, Kozmos č. 1.

Pribullová, A., 2006, Klimatická zmena, alebo veľa kriku pre nič?, Kozmos č. 1.