

# 1 Fyzikální pozadí procesu změny klimatu – stručný přehled

## 1.1 Terminologie

Zemské klima se mění od nepaměti. Neustálé změny v teplotě, vlhkosti a dalších faktorech přímo ovlivňovaly a ovlivňují vzhled krajiny, evoluci druhů a za z geologického hlediska poměrně krátkou působnost člověka na planetě stihly významně ovlivnit i jeho sociální, kulturní a ekonomický vývoj.

Účelem této diplomové práce není detailní popis fyzikálních aspektů týkajících se problému změny klimatu, nicméně se na následujících několika stranách pokusím alespoň stručně popsat pozadí tohoto procesu. Alespoň základní znalost této oblasti je podle mého názoru pro pochopení některých ekonomických souvislostí nezbytná.

V prvé řadě je třeba upřesnit terminologii zkoumané látky, zejména vymezit takové pojmy jako jsou klima, počasí, změna klimatu a variabilita klimatu.

V nejjednodušším slova smyslu můžeme nazvat *počasím* stav, který panuje v atmosféře v libovolném okamžiku. *Klima* je naproti tomu stav, jež je v určitém okamžiku v atmosféře očekáván na základě statistických dat získaných v minulosti. Ačkoliv mají statistické odhady tendenci k průměrování dat, je při modelování klimatu zapotřebí uvažovat i s extrémními výkyvy, které se čas od času vyskytují. Z těchto definic počasí a klimatu tedy můžeme vyvodit, že trvalejší změny v počasí mění náš pohled na očekávaný stav počasí v budoucnosti, jinými slovy: jedná se o změnu klimatu.

*Variabilita klimatu* je míra odchylek klimatu od průměrných očekávaných hodnot, důležité ovšem je, že průměrné klimatické hodnoty (např. teplota vzduchu na povrchu, oblačnost atd.) jsou v čase stejné a nemají tendenci ke změně. Pokud by se zvyšovaly nebo snižovaly, pak by se jednalo o *změnu klimatu* nikoliv o variabilitu klimatu.

## 1.2 Radiace a energetická rovnováha Země

Zásadním procesem působícím na stav zemského klimatu je energetická rovnováha země. V tomto procesu je nejdůležitějším faktorem sluneční energie, která neustále dopadá na naši planetu v nejrůznějších formách (gamma, rentgenové, UV, světelné, infračervené, mikrovlnné a rádiové záření). Největší podíl přijaté sluneční energie připadá na viditelné světlo, zatímco Země emituje nejvíce energie ve formě infračerveného, tepelného záření. Základní fyzikální zákony energetické rovnováhy vyžadují, aby se množství absorbované sluneční energie rovnalo množství energie vyzařované Zemí zpět do kosmu. Pokud by tomu tak nebylo, případný pozitivní nebo negativní rozdíl mezi těmito hodnotami by se projevil v akumulaci nebo úbytku energie na planetě. Vzhledem k faktu, že Země emituje drtivou většinu energie ve formě infračerveného záření, tento energetický nesoulad by zapříčinil zvýšení nebo snížení teploty na planetě a následně změnu klimatických podmínek.

Pokud tedy zkoumáme faktory určující klima na naší planetě, musíme svou pozornost zaměřit na to, jak jednotlivé činitele ovlivňují:

- a) množství absorbované sluneční energie, se zvláštním zřetelem na albedo<sup>1</sup> funkci oblačnosti, sněhové a ledové pokrývky a povrchu planety včetně hydrologického cyklu a biosféry
- b) způsob přenosu energie na povrchu planety atmosférou a oceány
- c) způsob re-radiace energie zpět do kosmu

Faktorů, které mohou ovlivňovat tři výše uvedené procesy, existuje samozřejmě celá řada.

Mezi nejdůležitější z nich však můžeme zařadit:

### *Oceánské proudění*

Hlavní úlohou oceánských proudění v klimatickém systému Země je přesun energie z nižších do vyšších zeměpisných šířek (z tropických do polárních oblastí). Těchto oceánských proudů existuje celá řada, všechny jsou však součástí tzv. Velkého oceánského proudu, který modeluje proudění na globální úrovni. Poslední výzkumy naznačují, že tento proud může

---

<sup>1</sup> Schopnost odrazovosti/absorbce slunečního záření jednotlivými druhy materiálů. Albedo funkce nabývá hodnoty v intervalu  $<0, 1>$ , přičemž čím nižší číslo, tím méně slunečního záření daný materiál odráží a tím více ho absorbuje a naopak. Např. pro tropický prales se albedo hodnota pohybuje v rozmezí 0,10 – 0,15, pro čerstvý sníh pak 0,80 – 0,95.

fungovat v různých stavech, zejména v oblasti severního Atlantiku, kde oceánské proudění přenáší většinu tepelné energie do arktických oblastí. Asi není třeba dodávat, že jakákoli změna současné podoby těchto oceánských proudů by znamenala podstatné dopady na klima. Jak dokazují data modelující stav oceánských proudění během poslední doby ledové.

### *Solární aktivita, sluneční skvrny*

Množství energie dopadající ze Slunce na Zemi je v čase poměrně konstantní. Pro analýzu zemského klimatu jsou však mnohem důležitější změny ve *spektru* dopadající energie. Tyto změny jsou zapříčiněny tzv. slunečními skvrnami, které v době svých maximálních výskytů významně zvyšují podíl energie dopadající na Zemi ve formě UV záření. Takto zvýšené množství UV záření reaguje v horních vrstvách atmosféry s částicemi kyslíku a ozónu a má významné dopady na další faktory ovlivňující klima. Dalším efektem slunečních skvrn je změna magnetického pole Slunce a jeho dopady na klima. Nejnovější počítačové modely, které berou tyto poznatky v úvahu, ukazují, že korelační koeficient popisující závislost mezi změnami ve slunečních skvrnách a změnami teplot na severní polokouli je 0,86. Solární aktivita byla podle těchto výzkumů odpovědná za polovinu oteplování mezi lety 1860 a 1970 a za třetinu rapidního nárůstu teplot v letech 1970 až 1990. Tato čísla jsou statisticky vysoce signifikantní a pro naši další analýzu ekonomických souvislostí projektu omezení emisí skleníkových plynů velmi zajímavá.

### *Orbitální variace*

Tvar orbity Země kolem Slunce je určen gravitačními vztahy s Měsícem a dalšími planetami v delším období. Orbitální výkyvy způsobené odchylkami v excentricitě, precesi a sklonu ekliptiky jsou důležité pro zemské klima, jelikož působí na sezónní a zeměpisněširnou distribuci slunečního záření. Tyto efekty jsou tak silné, že jsou samy o sobě schopny způsobit globální klimatickou změnu. Podle dosavadních výzkumů jsou to právě odchylky v orbitu, které jsou odpovědné za vznik dob ledových v minulosti.

### *Vulkanická činnost*

Vulkanické erupce mají za následek vynesení obrovského množství prachu a oxidu siřičitého do vrchních vrstev atmosféry, kde se tyto částice mění kyselé aerosoly. Ve výškách mezi 15 a 30 km, kde neexistuje výrazný atmosférický vertikální pohyb, pak mohou tyto částice zůstat

až několik let a rozšířit se po celé planetě. Oblaka prachu ve vyšších vrstvách atmosféry absorbují sluneční záření, což způsobuje oteplování stratosféry a jako kompenzační efekt ochlazování v nižších vrstvách atmosféry. Projevy vulkanických erupcí jsou dobře zdokumentovány na příkladech výbuchu filipínské sopky Pinatubo v roce 1991 a indonéské sopky Tambora v roce 1815 (emise 5 – 10 x více částic než Pinatubo). Analýzy ukazují, že tyto erupce způsobily podstatný pokles letních teplot v následujících 2 – 3 letech. Pokud se jedná o trvalé klimatické změny, s velkou pravděpodobností nemá samotná vulkanická činnost dostatečnou kapacitu k jejímu nastartování. Nicméně může urychlit nebo spolupodnítit ochlazování planety ve spolupráci s jinými procesy.

### *Změny ve složení atmosféry*

Fluktuace v kompozici atmosféry měly bezesporu na klimatické podmínky Země vliv. Pokud vezmeme v úvahu nejsilnější skleníkový plyn – CO<sub>2</sub>, měl např. podstatný vliv na udržení příznivého klimatu během období Křídly. Stále však neznáme odpověď na otázku, jak velký byl tento vliv v porovnání s dalšími faktory ovlivňujícími klima. Tato nejistota je v případě CO<sub>2</sub> a metanu obzvlášť palčivá, protože množství těchto plynů v atmosféře je výrazně závislé na činnosti biosféry, která je na druhou stranu závislá na momentálně panujících klimatických podmínkách. Zjednodušeně řečeno, z historických pozorování nelze jednoznačně určit, zda naměřené hodnoty těchto skleníkových plynů byly příčinou nebo až následkem tehdejších klimatických podmínek. V případě bližšího zkoumání dat z ledovcových vrtů vycházejí najevo nepatrné rozdíly mezi teplotami a koncentrací CO<sub>2</sub> a CH<sub>4</sub> v atmosféře. To naznačuje, že primárním zdrojem klimatických změn byly jiné faktory a změny v úrovních skleníkových plynů byly pouze doprovodným efektem. Nejpádnějším argumentem pro toto tvrzení je fakt, že zatímco úroveň CO<sub>2</sub> stoupala rovnoměrně s růstem teplot, s nižšími teplotami dob ledových již koncentrace neklesala. Jako vysvětlení se nabízí pokračující intenzivní biologická aktivita oceánů. Skleníkové plyny se tedy z historického hlediska ukazují spíše jako části pozitivní zpětné vazby, která pouze zesilovala již nastartované klimatické změny, ale nebyla jejich primárním „motorem“.

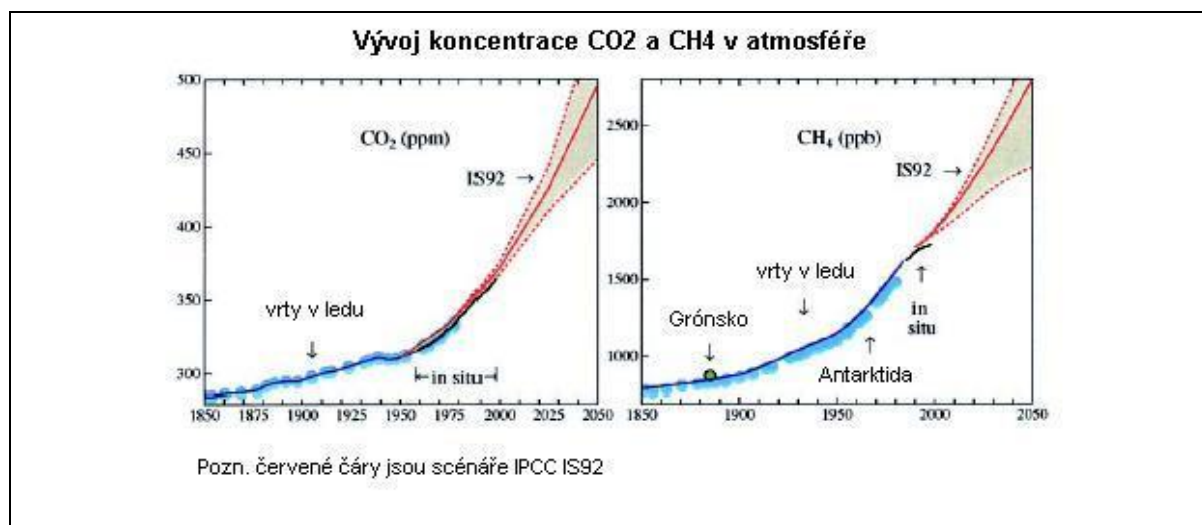
### *Lidská činnost*

Není pochyb o tom, že lidská činnost podstatně ovlivňuje klima na lokální úrovni. Příkladem může být oteplovací efekt měst, redukce větrů a viditelnosti, emise nejrůznějších částic, fotochemický smog a v některých případech zvyšování pravděpodobnosti silných dešťů. Tyto

lokální klimatické dopady jsou naštěstí omezeny jen na malou část zemského povrchu a jejich globální důsledky jsou zanedbatelné.

V globálním měřítku ovlivňuje lidská činnost zemské klima v několika oblastech. Zřejmě nejsilnější a v poslední době nejdiskutovanější jsou emise skleníkových plynů do atmosféry. Kombinací nejrůznějších měřicích metod je zjištěno, že koncentrace CO<sub>2</sub> stoupla od roku 1750 z 280 ppm<sup>2</sup> na 360 ppm na konci 90. let. Podobně rapidní navýšení se objevuje i u metanu, jehož množství vzrostlo ve stejném časovém období ze 700 ppb<sup>3</sup> na 1730 ppb. Nárůst množství těchto plynů v atmosféře a prognózy vývoje do roku 2050 podrobněji dokumentují následující dva grafy:

**Graf 1-1. Vývoj atmosférické koncentrace CO<sub>2</sub> a CH<sub>4</sub> v letech 1850 - 2000**



Zdroj: Hansen, James, Makiko Sato, Reto Ruedy, Andrew Lacis and Valdar Oinas, 2000. *Global Warming in the Twenty-first Century: An Alternative Scenario*, NASA Goddard Institute for Space Studies, Center for Climate Systems Research - Columbia University Earth Institute, and Center for Environmental Prediction, Rutgers University, New York, NY

Jiné důsledky lidské činnosti působící na zemské klima jsou méně známy. Mezi ně patří emise oxidů síry, zapříčiňující vznik aerosolů síry, jež následně mimo jiné ovlivňují charakter oblačnosti (čistý ochlazující efekt). Lidská činnost také v důsledku zemědělství mění charakter povrchu planety. Jedním z důsledků je zvýšené množství prachu v atmosféře s významným ochlazovacím efektem na klima. Dále se podstatně mění albedo funkce

<sup>2</sup> ppm = parts per million, počet částic na jeden milion částic vzduchu

<sup>3</sup> ppb = parts per billion, počet částic na jednu miliardu částic vzduchu

rozsáhlých oblastí v důsledku deforestace a desertifikace, jejichž důsledkem je také čistý ochlazovací efekt.

**Graf 1-2. Odhad podílů jednotlivých lidských činností na vlivu na klima v procentech**



Zdroj: Hansen, James, Makiko Sato, Reto Ruedy, Andrew Lacis and Valdar Oinas, 2000. *Global Warming in the Twenty-first Century: An Alternative Scenario*, NASA Goddard Institute for Space Studies, Center for Climate Systems Research - Columbia University Earth Institute, and Center for Environmental Prediction, Rutgers University, New York, NY

### 1.3 Skleníkový efekt

Jak je vidět z předchozích odstavců, skleníkové plyny jsou jen jedním z mnoha faktorů ovlivňující složitý systém zemského klimatu. Jeho úloha v procesu oteplování, jehož jsme svědky v posledních cca 150 letech, ještě není přesně známa, nicméně se mezi vědeckou komunitou v poslední době ustálil názor, že nejméně zčásti jsou skleníkové plyny za toto oteplování zodpovědné.

Jak tedy vůbec tzv. skleníkový efekt funguje? Samotný název „skleníkový efekt“ je totiž poněkud zavádějící. Skutečná fyzikální podstata procesu spojeného se skleníkovými plyny totiž nemá s procesy probíhajícími v reálném skleníku nic společného. Základním mechanismem v klasického skleníku je totiž omezení tepelných ztrát vzduchu ohřátého kontaktem se zemí tak, že zabraňuje pohybům a výměně vzduchu uvnitř skleníku.

Efekt spojený se skleníkovými plyny<sup>4</sup> funguje na rozdílném principu. Některé plyny obsažené v atmosféře mají schopnost absorbovat infračervené (tepelné) záření Země. Tím odebírají část energie ve formě tepla, které by jinak unikalo do vesmíru. Protože je drtivá většina těchto plynů soustředěna v dolních vrstvách atmosféry (s výjimkou jediného skleníkového plynu – ozónu), mění rostoucí množství částic skleníkových plynů tepelný profil atmosféry. Spodní vrstvy se abnormálně ohřívají, zatímco se horní vrstvy z důvodu zachování energetické rovnováhy ochlazují.

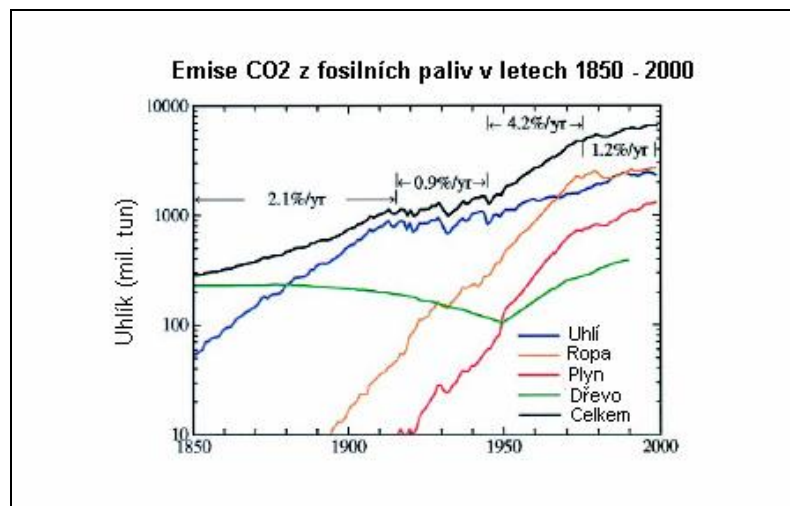
Přítomnost skleníkových plynů je v atmosféře pro zemské klima a život velmi důležitá, bez nich by teploty na Zemi byly nižší o cca 10°C. Problémem posledních cca 150 let je ovšem vzrůstající koncentrace těchto plynů v atmosféře spojená s do té doby nebývalým rozvojem průmyslové výroby a růstem populace.

Mezi skleníkové plyny můžeme zařadit:

*Oxid uhličitý (CO<sub>2</sub>)*

Mezi hlavní zdroje nárůstu koncentrace tohoto plynu v atmosféře můžeme zařadit spalování fosilních paliv (černé uhlí, hnědé uhlí, ropné produkty, zemní plyn), produkci cementu, spalování biomasy a biologických paliv a odlesňování.

**Graf 1-3. Vývoj emisí CO<sub>2</sub> v letech 1850 – 2000 podle různých druhů fosilních paliv**



Zdroj: Hansen, James, Makiko Sato, Reto Ruedy, Andrew Lacis and Valdar Oinas, 2000. *Global Warming in the Twenty-first Century: An Alternative Scenario*, NASA Goddard Institute for Space Studies, Center for Climate Systems Research - Columbia University Earth Institute, and Center for Environmental Prediction, Rutgers University, New York, NY

<sup>4</sup> Jejich kompletní seznam podle metodiky UNFCCC a Kjótského protokolu je uveden v příloze

V posledních 20 letech byl průměrný roční nárůst koncentrace CO<sub>2</sub> v atmosféře poměrně mírný (1,2%) i přes rychlý ekonomický růst většiny rozvojových zemí. USA také zaznamenaly silný růst spojený s tradičně nízkými ohledy na energetickou efektivitu výroby a spotřebních statků. Tento fakt naznačuje, že i v budoucnu je možné dosáhnout pevného ekonomického růstu spojeného s redukcí emisí CO<sub>2</sub>. Technologie podporující zvýšení energetické efektivity existují, je tedy pouze žádoucí je, ať už ekonomickým zájmem všech subjektů nebo vládními opatřeními, řádně implementovat.

#### *Metan (CH<sub>4</sub>)*

Hlavními zdroji metanu v atmosféře jsou: těžba černého uhlí, těžba ropy, distribuční a transportní ztráty, výpary ze skládek a odpadních vod, výpary z rýžových polí, trávící procesy živočichů, hoření biomasy a odlesňování.

Množství metanu pocházejícího z produkce rýže, jakožto zřejmě největšího antropogenního zdroje emisí, je možné efektivně redukovat výběrem odrůd, řízením zavlažování a správným hnojením. Tyto činnosti navíc podle dosavadních experimentů přinášejí dodatečné výhody v podobě sníženého výskytu rostlinných škůdců a moskytů přenášejících malárii. Ztráty v transportu a distribuci metanu mohou být poměrně snadno odstraněny zejména v bývalém SSSR s ekonomickými benefity pravděpodobně převyšujícími náklady.

#### *Oxid dusný (N<sub>2</sub>O)*

Mezi největší zdroji oxidu dusného lze začlenit produkci dusíkatých a adipových kyselin, spalování rafinovaných ropných derivátů, spalování uhlí, zemědělské odpady, hnojiva, spalování biomasy a odlesňování.

#### *Částečně fluorované uhlovodíky (HFCs)*

U této skupiny plynů jsou největšími zdroji nárůstu koncentrace používání klimatizace, foukání pěny, a další. Některé částečně i zcela fluorované uhlovodíky jsou již regulovány Montrealským protokolem o snížení emisí plynů poškozujících ozónovou vrstvu. Nebezpečí nárůstu emisí hrozí u plynů nahrazujících látky, jež jsou již kontrolovány Montrealským protokolem, jako např. HFC-134a.

#### *Zcela fluorované uhlovodíky (PFCs)*

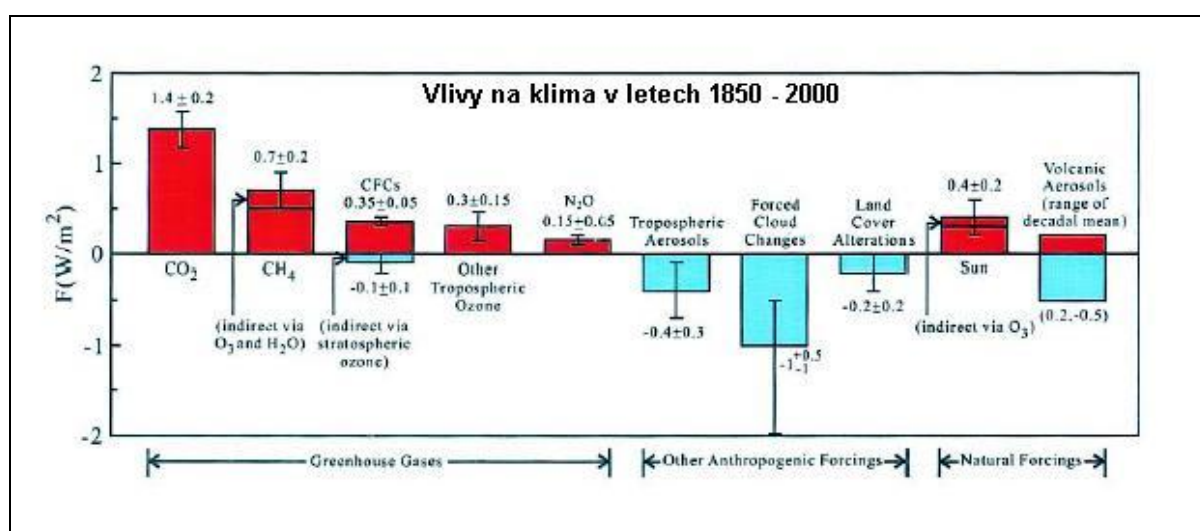
Hlavními zdroji jsou zde produkce polovodičů, používání ředidel a rozpouštědel atd.

*Fluorid sírový (SF6)*

Největší zdroje SF6 jsou produkce elektrických spínačů a výroba magnézia.

Klimatická odezva na působení jednotlivých plynů se značně liší. Vliv skleníkových plynů na klima se uvádí v jednotkách  $W/m^2$  a jeho hodnoty mezi lety 1850 a 2000 jsou uvedeny v následující grafu:

**Graf 1-4. Odhadované vlivy různých faktorů na změnu klimatu v letech 1850 - 2000**



Zdroj: Hansen, James, Makiko Sato, Reto Ruedy, Andrew Lacis and Valdar Oinas, 2000. *Global Warming in the Twenty-first Century: An Alternative Scenario*, NASA Goddard Institute for Space Studies, Center for Climate Systems Research - Columbia University Earth Institute, and Center for Environmental Prediction, Rutgers University, New York, NY

## 1.4 Následky změny klimatu

Potencionální klimatická změna na Zemi má přirozeně obrovské množství dopadů. Při zkoumání těchto následků nám může pomoci historická zkušenost a matematické modelování.

První oblastí dopadů případné klimatické změny jsou geologické následky. Ty jsou spojeny zejména s nárůstem a úbytkem ledovců a vysoušením kontinentů a oceánů. Tyto procesy mění tlaky na zemskou kůru, což se pravděpodobně projeví v tektonické aktivitě.

Další velmi důležitou oblastí jsou následky klimatické změny na floru a faunu. V dávné minulosti Země proběhlo několik masových vyhynutí druhů v důsledku změny klimatu. Flora

a fauna má však poměrně velké adaptační schopnosti a tak je riziko takovýchto drastických vyhynutí nízké. Z historického hlediska se většina druhů vyvíjela ve velmi rozdílných podmínkách, než ve kterých žijí v současnosti a tak bude geneticky díky svému vývoji v nestejnorodých podmínkách část druhů dobře připravena i na potencionální budoucí změny klimatu. Je ovšem velkou neznámou, které druhy přežijí a které genetické předpoklady zajistí nejlepší adaptační schopnosti k variabilitě přírodních podmínek.

Změny klimatu také působí na velikost pevninských a oceánských ledovců a potažmo na výšku hladiny moře. Globální oteplování v posledních cca 150 letech zapříčinilo podstatný úbytek pevninských ledovců, nikoliv však antarktického či grónského ledovce. Vzrůst hladiny moře je způsoben z větší části termální expanzí oceánů, jež je přímým důsledkem oteplování.

Ze všech lidských činností ovlivněných změnou klimatu je nejzranitelnější zemědělství. Ačkoliv vědeckotechnický pokrok umožňuje lépe predikovat případné klimatické změny a připravit vhodné a odolné odrůdy, obecně zůstává lidská komunita stále velmi zranitelná extrémními výkyvy počasí. Můžeme tvrdit, že v případě zvýšené variability klimatu nebo extrémní změny klimatu jsou vyhlídky pro světovou produkci potravin neradostné. V podstatě jakákoli změna bude změnou k horšímu, zejména v situaci neutěšeného nárůstu obyvatel v nejchudších zemích světa, které jsou k adaptaci nejméně připraveny.

Rozšíření epidemických onemocnění je také často spojováno s klimatickými faktory. V tomto ohledu je ovšem třeba brát v úvahu i další socio-ekonomické pozadí těchto pandemií. Celosvětové nákazy se rozšiřují zejména v obdobích sucha, zemětřesení, hladu, během velkých migrací atd. Klimatická změna je tedy v pozadí rozšíření pandemií, ale nikoli jako primární podnět. V současné době je navíc stav zdravotní péče v mnoha zemích na daleko vyšší úrovni než v minulosti, což je dalším argumentem pro fakt, že hrozba rozšíření epidemií je sice reálnou hrozbou, ovšem její velikost je v porovnání s jinými dopady klimatických změn poměrně malá.

Ekonomické dopady změny klimatu na lidskou činnost jsou zdrojem neustálých debat. Předpokládá se, že růst průměrných globálních teplot bude mít za následek zvýšené množství extrémních výkyvů počasí. Jedním z přímých nástrojů k měření těchto dopadů může být trend v množství a hodnotě pojistných událostí. V bližší analýze je však nutné brát v úvahu další okolnosti, jako je trend ve výši pojistného plnění, hustota obyvatel ve zranitelných oblastech,

defraudace atd. Obecně je však kvantifikování klimatických dopadů na ekonomické status quo značně nedokonalé a v budoucnu bude třeba na tomto poli zapracovat. Získané informace pak pomohou budoucím generacím rozhodovat o investicích a dalších souvisejících projektech.