

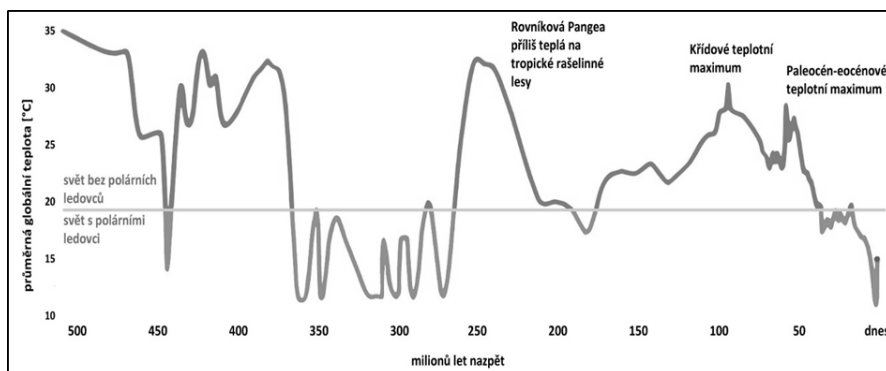
1 DOPADY ZMĚNY KLIMATU V GLOBÁLNÍM I ČESKÉM PROSTŘEDÍ: SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

Aleš Farda a Pavel Zahradníček

1.1 Úvod

Klima Země definujeme jako dlouhodobý charakter počasí, případně specificky jako dlouhodobé statistické charakteristiky meteorologických veličin. V praxi se zpravidla jedná o období desetiletí a delší. Jeho charakteristickým rysem je, že podléhá přirozeným změnám a výkyvům již od doby vzniku prvotní atmosféry Země. V těchto prehistorických obdobích bylo klima velmi vzdálené dnešním poměrům, mimo jiné z důvodů odlišného chemického složení atmosféry a geologické aktivity mladé Země. Tehdejší klima procházelo složitým vývojem, včetně výrazných chemických změn v atmosféře, a nebylo vhodné pro žádné složitější formy života, jak je chápeme dnes. Od období prvohor pak atmosféra umožnila rozvoj vyšších forem života a svým charakterem se již příliš nelišila od současnosti. I tak však podléhala velké proměnlivosti, jak prostorové, tak časové – a to zejména z hlediska teploty a vlhkosti. Svědectví o jejím vývoji pak získáváme paleoklimatologickými interpretacemi geologických a paleontologických záznamů, jakými jsou např. ledovcová jádra, dendroklimatologické datování nalezených starých stromů či třeba rozbor pylu uchovaného v bažinách.

Obr. 1 Vývoj průměrné globální teploty Země za posledních ~500 milionů let.



Zdroj: Science (VOOSEN, Paul. A 500-million-year survey of Earth's climate reveals dire warning for humanity. Science, 2019. Dostupné z: <https://www.science.org/content/article/500-million-year-survey-earths-climate-reveals-dire-warning-humanity>).

Příčinou tohoto kolísání je celý soubor proměnlivých externích a interních faktorů v rámci klimatického systému Země. Z těch externích se jedná o vliv Slunce a změny jeho radiace či magnetického pole a s nimi spjaté faktory kosmického počasí. Nepominutelný je pak vliv změn orbitálních parametrů Země (precese a nutace rotační osy rotační Země, změna sklonu k ekliptice, změna excentricity zemské dráhy apod.). Dále pak působí faktory náhlé a krátkodobé, jakými jsou např. dopady meteoritů. Interní faktory souvisí s procesy na samotné Zemi. Mezi ně řadíme geologické vlivy, jako je pohyb kontinentů, orogeneze či vulkanismus. Významnou roli sehrávají změny cirkulace oceánů, mění se charakter vegetace a také takzvaná vnitřní variabilita (nahodilost) atmosféry. V současnosti se pak k těmto činitelům přidává i vliv lidské civilizace v podobě antropogenní změny klimatu. Pro ten je charakteristický rychlý nárůst vlivu tzv. skleníkových (odborně radiačně aktivních) plynů primárně v důsledku jejich antropogenních emisí. Mezi nejvýznamnější skleníkové plyny patří vodní pára, oxid uhličitý CO_2 , metan CH_4 , oxidy dusíku a další sloučeniny uvolňované do atmosféry v důsledku lidských aktivit. Mění se též vlastnosti samotného zemského povrchu např. v důsledku postupující urbanizace, odlesňování a intenzivního zemědělství. Oba tyto jevy mají rovněž vliv na klima, zejména na lokální a regionální úrovni, ale často narušují i celoplanetární koloběh látek v přírodě – v kontextu diskusí o antropogenní změně klimatu jde zejména o tzv. sekvestraci uhlíku, tedy schopnosti zemského povrchu či oceánu odebírat z atmosféry CO_2 .

Charakteristickým rysem klimatu je skutečnost, že atmosféra a klimatický systém³ jsou vystaveny všem faktorům současně, ale zároveň s velkou prostorovou a časovou variabilitou. Jednotlivé složky klimatického systému pak vzájemnými vazbami interagují mezi sebou, a to jak v důsledku původně externích faktorů, tak i v důsledku své vnitřní variability. Tyto vazby mohou mít různý charakter, intenzitu i dobu trvání a mohou systém stabilizovat (negativní vazby) i destabilizovat (pozitivní vazby).

Popsaná komplexnost je předmětem neustálého odborného bádání, které má navíc interdisciplinární charakter. Klimatologové musí spolupracovat s oceánology, hydrology, geology a specialisty celé řady dalších oborů. V praxi je pak tato komplexnost klimatického systému odpovědná za matematické chování řad měřených klimatických veličin, např. teploty vzduchu a úhrnů srážek. Na časovém průběhu těchto veličin pozorujeme periodické chování (střídání ročních období), ale i semi-periodické a chaotické chování v různých časových měřítkách. To je důsledkem četných vlivů, které se do jejich hodnoty promítají. Výsledkem je pak chování, které je patrné třeba i na **obr. 1**.

Důležitým rysem atmosféry Země, který je považovaný za přímou příčinu změny klimatu, je skleníkový jev. Jde o zcela přirozený, přírodní proces, pozorovaný

³ Klimatický systém je definován jako souhrn atmosféry, světového oceánu, zemského povrchu – pedosféry, kryosféry a biosféry. Tyto složky systému spolu vzájemnými vazbami interagují, a tvoří tedy celek.

i na dalších planetách s vlastní atmosférou v rámci Sluneční soustavy. Na Zemi je odpovědný za zvýšení teploty vzduchu u zemského povrchu o zhruba 33 °C nad úroveň bez jeho působení. Díky skleníkovému jevu se tak dlouhodobá průměrná teplota pohybuje okolo 15 °C a umožňuje existenci pokročilého života, jak jej známe.

Příčinou skleníkového jevu jsou skleníkové plyny. Mechanismus jejich působení je znám již od závěru 19. století, kdy byly popsány v práci dánského vědce Svante Arrhenia.⁴ Země nejenže přijímá energii v podobě slunečního záření, ale také vyzařuje energii zpět do kosmu. Jednak v podobě odraženého slunečního záření, ale také dlouhovlnného tzv. tepelného záření. Kdyby tato fyzikálními zákony daná schopnost zpětně vyzařovat neexistovala, rostla by teplota Země díky příkonu slunečního záření postupně až do nekonečna. Mezi vyzařujícím zemským povrchem a vesmírem je ovšem atmosféra. Zatímco plyny jako dusík, kyslík a argon s odcházejícími fotony dlouhovlnné radiace neinteragují, skleníkové plyny jsou schopné je pohlcovat. Posléze je náhodně vyzařují všemi směry. Část původně vyzařované energie se tedy vrací zpět k zemi a zvyšuje tak její teplotu. S rostoucí koncentrací těchto plynů v atmosféře tento efekt pochopitelně dále zesiluje.

S odraženým slunečním zářením a vyzařovaným dlouhovlnným zářením také interaguje oblačnost. Její role v tomto procesu je sama o sobě poměrně komplikovaná. Oblačnost část dopadajícího slunečního záření odráží zpět do kosmu, zároveň ale zpět k zemskému povrchu odráží dlouhovlnné tepelné záření. Oblačné kapičky sami o sobě jsou zdrojem dlouhovlnného vyzařování všemi směry – tedy jak k zemskému povrchu, tak i do kosmu. Vliv oblačnosti na energetickou bilanci, a tedy teplotu Země, je tedy komplikovaný a kolísá v čase i prostoru. Obdobně je komplikovaný i vliv vodní páry: ta je také významným skleníkovým plynem. Jakkoliv její výskyt v atmosféře na rozdíl od zbylých plynů velmi kolísá (např. v pouštních a polárních oblastech je její obsah minimální), její celkové množství je dlouhodobě málo proměnlivé, ale s postupujícím nárůstem teploty bude toto množství postupně růst. Na druhou stranu se vodní pára zároveň významně podílí na vertikálním transportu tepla od povrchu Země do vyšších vrstev atmosféry, kde je vyšší pravděpodobnost, že toto teplo bude vyzářeno do kosmického prostoru.

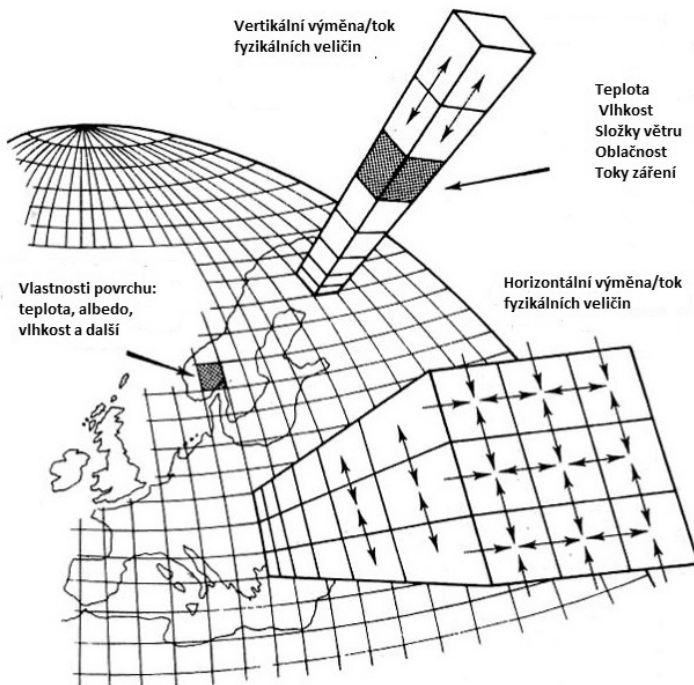
Tyto zde popsané procesy jsou komplikované a celkové chování atmosféry je natolik vzájemně provázané, že pro vyčíslení tohoto chování a jeho předpověď nestačí ad hoc výpočty. Na základě získaných měření, poznatků a fyzikálních zákonů je potřeba vytvářet odpovídající modely. Takové modely se pak používají v meteorologické praxi jako nástroje předpovědi počasí, nebo v modifikované verzi v klimatickém výzkumu. Zde slouží pro rekonstrukci minulého klimatu, studium dílčích procesů v klimatickém systému a jejich vzájemné interakce v podmínkách současného klimatu, nebo pro simulace jeho budoucího vývoje. Pro tyto účely vnitřní struktura klimatických modelů kopíruje strukturu klimatického systému, a to do té míry, jak

⁴ ARRHENIUS, Svante. XXXI. On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. *Philosophical Magazine Series*. Taylor & Francis Group, 1896, č. 41 (251), s. 237–276.

nám umožňují matematické a fyzikální znalosti spolu s výkonem současné generace superpočítačů. Zjednodušené schéma takového modelu je představeno na **obr. 2**.

Než může být ovšem takový model použit pro vytváření projekcí změny klimatu, prochází mnohým testováním, které má zaručit jeho integritu. Cílem je, aby model klimatu reprodukoval co nejméně pravděpodobněji a nevytvářel falešnou klimatickou informaci v podobě např. umělých trendů teploty či srážek napříč desetiletím či staletími. Modelu se tedy dají jako vstupní informace pro jeden rok, které se periodicky opakují jako vstup modelu např. pro 500 či 1000 let. Zjednodušeně to znamená, že všechny proměnlivé parametry, jako je koncentrace skleníkových plynů, se drží neměnné a mění se jen příkon sluneční energie podle ročních období a střídání dne a noci. Model pak musí generovat (nejedná se o klasickou předpověď) odpovídající modelové klima, které nevykazuje žádné dlouhodobé trendy v teplotě a dalších klimatických prvcích.

Obr. 2 Formální struktura spřaženého globálního klimatického modelu: jeho atmosférická komponenta. Obdobně je konstruován např. model oceánu. Model atmosféry a oceánu pak spolu tvoří jádro klimatického modelu, které je zpravidla doplněno modelem kryosféry (zalednění), případně dalšími složkami.



Zdroj: WILSON, M. F. and HENDERSON-SELLERS, A. A Global Archive of Land Cover and Soils Data for Use in General Circulation Climate Models. *Journal of Climatology*. 1985, 5, s. 119–143, dostupné z: <https://doi.org/10.1002/joc.3370050202>.

Teprve poté je možné přistoupit k simulacím budoucího klimatu, kdy se modelu začínou přidávat koncentrace skleníkových plynů podle různých scénářů chování lidstva. Tyto scénáře mají různý charakter: optimistické scénáře předpokládají ústup od uhlíkové náročné ekonomiky, pesimistické pak rychlý nárůst emisí spojený zejména se zvyšujícím se využíváním fosilních paliv v energetice, průmyslu a dopravě. Výsledkem jsou pak tzv. projekce klimatu, které shrnují zprávy Mezivládního panelu pro změnu klimatu (*Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC*).⁵

Zde je vhodné poukázat na rozdíl mezi meteorologickou předpovědí a projekcí změny klimatu dle zvoleného scénáře⁶. Zatímco od meteorologické předpovědi očekáváme přesnou informaci o počasí během několika následujících dní, v případě klimatické projekce jde o dlouhodobé statistické charakteristiky klimatických prvků. Typicky se jedná o to, jaké budou průměrné teploty za budoucí desetiletí či jaká budou průměrná denní maxima či jak dlouhá v průměru budou období sucha. Nelze tedy od klimatického modelu např. očekávat informaci, jaká bude teplota ráno 7. října 2079 v Českém Krumlově. Čistě technicky model samozřejmě takovou informaci v rámci svých výpočtů poskytne, ta se však neinterpretuje meteorologicky jako předpověď počasí, ale poslouží jako vstup pro výpočet průměrných ranních říjnových teplot v dekádě 2071–2080.

1.2 Příčiny antropogenní změny klimatu a její projevy

Antropogenní působení je jednou z příčin změn zemského klimatu, o němž víme, že se mění neustále. Od ostatních faktorů jej odlišuje jeho přímočarost, intenzita a rychlost nástupu oproti historickým změnám z geologické minulosti Země. Náhlost a intenzitu této změny můžeme pozorovat na chování globální či evropské regionální teplotní řady. Ty jsou zkonstruované z paleoklimatologických informací z prehistorického období od poslední doby ledové, z dokumentárních či jiných proxy záznamů (dendrochronologie) z období středověku a raného novověku a také z měření dostupných během posledních desetiletí či staletí. Toto chování ilustrujeme na **obr. 3**, kde je průměrná globální teplota vynesena v ročním kroku pro poslední dvě milénia.

Na tomto obrázku (**obr. 3**) jsou zmíněné i důležité události z hlediska historie klimatu. Povšimnout si lze významných sopečných explozí, které emitovaly do atmosféry obrovské množství sopečného materiálu. Ten pak byl ve formě prachu a aerosolových částic odpovědný za náhlé, až několikaleté poklesy teploty s celoplanetárním vlivem (například rok 1816 byl charakteristický v českých zemích jako „rok bez léta“). Význačeno je i středověké teplotní optimum, které bylo ryze evropskou

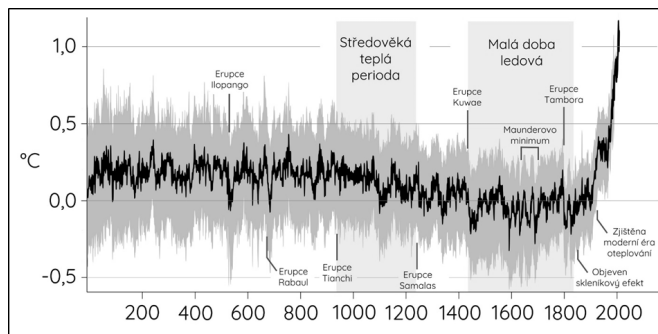
⁵ Web IPCC viz www.ipcc.ch.

⁶ Častou námitkou některých klimaskeptiků je, že když nelze předpovídat počasí na více než několik dní dopředu, nelze předpovídat klima na desetiletí a staletí dopředu. Není to pravda: lze to dělat. Důvod spočívá v rozdílech mezi oběma předpověďmi.

regionální události bez viditelného dopadu na globální teplotu. Středověká teplá perioda, která není příliš patrná na globální časové řadě teploty, ale dobře ji pozorujeme jako kladnou teplotní anomálii v teplotních rekonstrukcích pro Evropu.⁷ Dále je zvýrazněna i tzv. „malá doba ledová“. Z hlediska změny klimatu je označen i rok vynálezu parního stroje, a tedy vzniku civilizace založené na využívání fosilních paliv. Pak už následuje strmý vzestup teploty, který je mnohem víc než pouhé vzpamatování se z malé doby ledové. Bohužel současná klimatologie vylučuje jiné vysvětlení než vliv emisí skleníkových plynů a musíme pochmurně konstatovat, že nárůst teploty bude neúprosně pokračovat s následky, o nichž se zmiňujeme dále v této kapitole.

Nyní se ještě krátce zmíníme o různých hypotézách, které se objevují jako teze popírající existenci změny klimatu, případně se její existenci snaží vysvětlit jako nezávislou na činnosti člověka.

Obr. 3 Vývoj průměrné roční globální teploty formou změny za poslední dvě milénia s klimaticky význačnými událostmi. Je zřejmý strmý nárůst teploty v posledním století.



Zdroj: Jáchym Brzezina, PAGES2k a HadCRUT 4.6.

Je zřejmé, že na regionální či kontinentální úrovni se mohou vyskytovat významné odchylky teploty oběma směry, např. z důvodů změn cirkulace atmosféry. Změny pozorované dnes jsou ovšem změny celoplanetární, pro něž nelze nalézt podobné alternativní vysvětlení, jako je např. ona zmíněná změna cirkulace atmosféry. Nelze ji vysvětlit ani astronomickými cykly (precese a nutace zemské osy), protože tyto cykly probíhají v řádech desetitisíců let (a navíc v současnosti jejich vliv směřuje k nepatrnému ochlazení). Podobně jsou neúspěšné i jiné další hypotézy opírající se o existenci solárních cyklů či změn v intenzitě solárního magnetického pole: vliv těchto 11letých cyklů je na chování naší atmosféry příliš malý. V nedávné době se také těšila popularitě i hypotéza (a různé její varianty), že pocíťovaná sucha a epizody veder z posledních let byly způsobeny rozpalováním obnažené půdy zoraných polí a lesních holosečí. Ačkoliv takto obnažená půda je z mnoha důvodů

⁷ LUTERBACHER, Jürg, SMERDON, Jason E. et al. European summer temperatures since Roman times. *Environmental Research Letters*. 2016, č. 11 (2), s. 24001–24012.

závažný ekologický problém, ani ona nemůže vysvětlit fenomén narůstajících teplot. Tu totiž pozorujeme i na pouštích a v polárních oblastech (např. Arktida se otepluje v rámci naší planety nejvíce), které jsou historicky bez vegetace.

1.3 Hodnotící zprávy Mezivládního panelu pro změnu klimatu

V odborné komunitě klimatologie a širěji přírodních věd je problematika klimatické změny diskutována již poměrně dlouhou dobu. Napříč minulými desetiletími se z číste základního, akademicky pojatého výzkumu stala problematika (a problém) prostupující napříč celou společností, ovlivňující mezinárodní komunitu jako celek. Z těchto důvodů byl v roce 1988 ustanoven Mezivládní panel pro změnu klimatu se sídlem v Ženevě. Postupem času se členy tohoto orgánu pod patronací OSN stalo 188 zemí. Účelem existence této organizace je schraňovat lidské poznání antropogenní změny klimatu, včetně jejího vlivu a dopadů na přírodní ekosystémy, společnost, ekonomiku, politické vztahy, a to včetně možností reakcí na změnu klimatu a její projevy.

Během své existence panel vydal již šest hodnotících zpráv. První hodnotící zpráva vyšla v roce 1992 a prozatím poslední, šestá hodnotící zpráva v období srpna 2021 až dubna 2022. Všechny zprávy jsou dostupné na webu Panelu.⁸ Tyto zprávy jsou v souladu s posláním IPCC členěny na částipodle tří pracovních skupin zaměřených na

- I. vědecký stav poznání o antropogenní změně klimatu,
- II. rizika, dopady a zranitelnost vůči změně klimatu,
- III. zmírňování dopadů změny klimatu.

Vzhledem k dlouhému, více než třicetiletému působení IPCC se můžeme přesvědčit o tom, jak se naplnila varování obsažená v dřívějších zprávách. Bohužel se nejedná pro lidskou společnost o nic povzbudivého.

Stěžejní část obsahu těchto zpráv tvoří výsledky projekcí budoucího klimatu s pomocí globálních a regionálních klimatických modelů, které byly prováděny na základě tzv. emisních scénářů. To jsou ony výše zmiňované scénáře, které popisují časový vývoj emisí skleníkových plynů s ohledem na to, jak se bude lidstvo v budoucnu chovat a produkovat emise. Například v poslední, šesté zprávě se jedná o 5 základních scénářů budoucího vývoje:

1. SSP1-1.9: neoptimističtější scénář, kdy budou emise CO₂ sníženy tak, že uhlíkové neutrality lidstvo dosáhne v roce 2050. V tomto scénáři dosáhne nárůst průměrné globální teploty nejpravděpodobnější hodnoty 1,6 °C pro období 2041–2060 (blízká budoucnost) a 1,4 °C pro období 2081–2100 (vzdálená budoucnost) vůči předindustriální době. Meze nejistoty jsou vyjádřeny rozsahem 1–1,8 °C.
2. SSP1-2.6: optimistický scénář, kdy budou emise snižovány tak, že uhlíková neutralita bude dosažena okolo roku 2075. V tomto scénáři dosáhne nárůst průměrné

⁸ Viz IPCC – reports, dostupné z: <https://www.ipcc.ch/reports/>.

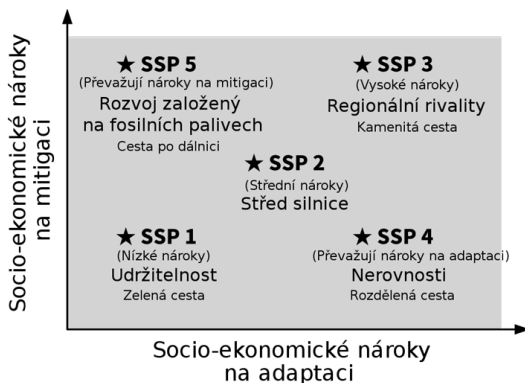
globální teploty nejpravděpodobnější hodnoty 1,7 °C pro období 2041–2060 (blízká budoucnost) a 1,8 °C pro období 2081–2100 (vzdálená budoucnost). Meze nejistoty jsou vyjádřeny rozsahem 1,3–2,4 °C.

3. SSP2-4.5: pravděpodobný průměrný scénář, emise se mají zhruba na dnešní úrovni držet do roku 2050 a pak postupně klesat směrem k nule do konce století (samotné dosažení nulových emisí se ale do konce století neočekává). V tomto scénáři dosáhne nárůst průměrné globální teploty nejpravděpodobnější hodnoty 2,0 °C pro období 2041–2060 (blízká budoucnost) a 2,7 °C pro období 2081–2100 (vzdálená budoucnost). Meze nejistoty jsou vyjádřeny rozsahem 2,1–3,5 °C.
4. SSP3-7.0: pesimistický scénář vývoje, kdy lidstvo do konce století svoje emise zdvojnásobí. V tomto scénáři dosáhne nárůst průměrné globální teploty nejpravděpodobnější hodnoty 2,1 °C pro období 2041–2060 (blízká budoucnost) a 3,6 °C pro období 2081–2100 (vzdálená budoucnost). Meze nejistoty jsou vyjádřeny rozsahem 2,8–4,6 °C.
5. SSP5-8.5: nejpesimističtější scénář, lidstvo svoje emise ztrojnásobí, a to už okolo roku 2075. V tomto scénáři dosáhne nárůst průměrné globální teploty nejpravděpodobnější hodnoty 2,4 °C pro období 2041–2060 (blízká budoucnost) a 4,4 °C pro období 2081–2100 (vzdálená budoucnost). Meze nejistoty jsou vyjádřeny rozsahem 3,3–5,7 °C.

Předcházející hodnotící zprávy používaly podobnou logickou strukturu scénářů, byť konstruovaných poněkud odlišným způsobem. Zůstává ale zachována posloupnost scénářů od neoptimističtějšího po nejpesimističtější.

Pro vývoj emisních scénářů byly zhodnoceny socioekonomické předpoklady dalšího vývoje globální společnosti, jak je znázorněno na **obr. 4** pro 6. hodnotící zprávu. K těmto základům scénářů pak byla dodána informace v podobě dopočtených emisí skleníkových plynů a jejich působení na energetickou bilanci Země ve formě W/m².

Obr. 4 Socio-ekonomické předpoklady dalšího vývoje lidské společnosti, které byly použity pro konstrukci těchto scénářů.



Zdroj: Wikipedie. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Sc%C3%A9n%C3%A1r%C5%99e_socioekonomick%C3%A9ho_v%C3%BDvoje.