

## Arktida je nejrychleji se měnící částí naší planety

Arktická oblast a vývoj její neživé i živé přírody jsou ukazatelem a indikátorem intenzity a rychlosti globálních změn probíhajících na naší planetě. Je proto pochopitelné, že ekologickému výzkumu arktické oblasti je věnována velká pozornost. V této souvislosti probíhal velký mezinárodní projekt, jehož cílem bylo vypracovat kompletní vědeckou zprávu o měnící se přírodě arktické oblasti v souvislosti s globálními změnami, především s oteplováním a zvyšováním UV-B záření. Na vzniku této zprávy, která má více než 1100 stránek a stovky grafů a schémat, se podílelo asi 300 odborníků. Z nearktických zemí přispívali do zprávy specialisté z Velké Británie, Německa, Francie, Japonska, Nového Zélandu, Rakouska a České republiky (autor tohoto příspěvku). Zpráva byla publikována v cambridžském nakladatelství v roce 2005 pod názvem „Arctic Climate Impact Assessment“. Evropskou polární komisí byla tato zpráva vyhodnocena jako nejlepší publikace posledního pětiletého období (2000-2005).

V tomto článku, který předchází přehledu o ekologickém fungování arktické oblasti zpracované do středové dvoustránky, je uveden v co možná nejjednodušší formě přehled závěrů této zprávy.

### Globální klimatické změny projevující se v arktické oblasti

Analýzy ledových kórů nezvratně dokázaly, že nárůst oxidu uhličitého v atmosféře souvisí s nárůstem průměrné globální teploty. Zhruba od počátku průmyslové revoluce došlo díky spalování fosilních paliv a snižování ploch zeleně ke zvýšení koncentrace oxidu uhličitého, metanu a ostatních skleníkových plynů v atmosféře o 35%, což se projevilo nárůstem průměrné roční globální teploty o 0,6 °C. Přinejmenším v tomto století bude docházet k dalšímu nárůstu skleníkových plynů v atmosféře a to způsobí nárůst průměrné roční teploty o 1,4 až 5,8 °C. Takto dramatické zvýšení teploty se promítne do změn v cirkulaci atmosférických a vodních mas, ve zvýšení hladiny oceánů a v geografické distribuci a intenzitě srážek. Nejvíce zasaženy budou pobřežních ekosystémy. Pro lidstvo, které bude těmito změnami postiženo, bude kromě jiného stále více obtížné nacházet nové zdroje pitné vody. 80% současné spotřeby energie pochází ze spalování fosilních paliv. Tento trend se ani v tomto století významně nepodaří změnit, a tak pokles množství vypouštěných skleníkových plynů bude jen velmi pomalý a obrácení trendu zvyšování koncentrace oxidu uhličitého a skleníkových plynů v atmosféře je záležitostí vzdálené budoucnosti.

Arktická oblast je část naší planety, kde v současné době probíhají nejvýraznější a nejrychlejší změny v souvislosti s globálním oteplováním. V nastávajících 100 letech se projeví v celé Arktidě dramatické změny, které změní přírodní, sociální i ekonomické poměry celé oblasti. Probíhající a předpokládané změny můžeme shrnout do těchto bodů:

1. V poslední dekádě 20. století byl růst průměrné roční teploty dvakrát větší v arktické oblasti než ve zbytku světa. Nárůst teplot je doprovázen rychlým odtáváním ledovců, úbytkem plochy mořského ledu a zkrácením období, po které je krajina pokryta sněhem.
2. Ústup zalednění arktické oblasti a zkrácení období, po které je krajina pokryta sněhem, způsobuje větší absorpci sluneční energie a zrychlení oteplování. Zvýšeným táním kontinentálních ledovců dochází k růstu hladiny světových oceánů, což vede ke zpomalení cirkulace oceánských vodních mas. Zpomalení cirkulace mořských proudů ovlivní lokální klima celé řady oblastí. Oteplování významně ovlivní produkci nebo absorpci skleníkových plynů půdou, terestrickou vegetací a vegetací mořských šelfů. Změny, ke

kterým bude docházet nebo již dochází v populacích rostlin a živočichů, jsou podmíněny extrémními klimatickými událostmi, především v zimním období.

3. Oteplování přinese výrazné změny v biodiverzitě arktické oblasti. Druhá diverzita a produktivita arktické oblasti se zvýší. Hlavní reakcí většiny druhů osídlujících arktickou oblast bude změna jejich geografického rozšíření. V daleko menší míře bude docházet ke geneticky fixovaným přizpůsobením k měnícím se podmínkám prostředí. Arktické vegetační stupně se posunou na sever a do vyšších nadmořských výšek. Značná část tundry bude nahrazena lesem a polární pouště budou nahrazeny tundrou. Produktivnější rostlinná společenstva budou vázat více atmosférického uhlíku. Větší rozlohy vegetace budou absorbovat více sluneční energie, což povede k ještě většímu oteplování. Do vybraných oblastí se rozšíří zemědělství. V některých případech budou stěhování druhů bránit různé geografické bariéry. Citlivým druhům mechorostů a lišejníků bude hrozit vyhynutí.
4. Oteplování a vysušování některých oblastí Arktidy přispěje ke změnám v cirkulaci uhlíku. V minulosti zde docházelo k ukládání uhlíku díky akumulaci rostlinné biomasy v permafrostu. Současný trend oteplování a vysušování přispívá k uvolňování takto fixovaného uhlíku do atmosféry. Ačkoliv některé arktické oblasti jsou stále úložištěm uhlíku, jejich rozloha klesá a poměr mezi ukládáním a uvolňováním uhlíku se postupně mění. Množství lokalit, kde se tento proces měří, je však velmi malé, takže získané výsledky jsou pouze hrubými odhady. Je proto obtížné předpovědět, zda bude arktická oblast zdrojem uvolňování uhlíku, nebo naopak bude uhlík ukládat. Současné modely pouze naznačují, že arktická oblast bude pravděpodobně uhlík spíše zadržovat, protože se do severnějších oblastí budou dostávat více produktivní rostlinná společenstva. To vše jsou jen ale pouhé domněnky.
5. Dojde ke změně diverzity a areálu rozšíření celé řady živočišných druhů. S redukcí mořského zalednění dramaticky poklesne prostředí, kde mohou žít lední medvědi, tuleni a ptáci vázaní na výskyt mořského ledu. Těmto druhům bude hrozit vyhynutí. Sobům, losům a dalším herbivorním zvířatům se změní podmínky pro jejich pastvu, změní se místa, kde mohou rodit a vyvádět mláďata, a to přispěje ke změnám v jejich migračních cestách. Do arktických oblastí se budou šířit nové druhy. Tento posun diverzity vystaví typické arktické druhy vyšší konkurenci, což povede v některých oblastech k jejich vyhynutí. S šířením nových druhů do arktické oblasti bude docházet i k šíření infekčních onemocnění.
6. Některé pobřežní lokality budou čelit intenzivním bouřkám a vlnobití, které povedou spolu se zvyšující se mořskou hladinou k intenzivní erozi mořského pobřeží. Permafrost těchto oblastí bude tát, což přispěje k technickým a geomorfologickým problémům. Rozloha přímořských mokřadů se bude rozšiřovat. Častěji zde bude docházet k různým kalamitám, ať to budou velkoplošné požáry nebo invaze a přemnožení různých rostlinných a živočišných druhů, například komárů.
7. Zvýšené dávky UV záření budou působit na rostliny, živočichy i na populaci lidí žijících v Arktidě. Stratosférická ozónová vrstva nad Arktidou se nebude v příštích dekádách významně měnit. Dávky UV záření budou zachovány ve stejném rozsahu, jak je známe nyní. Zvýšené dávky UV-B záření sice působí na metabolické procesy probíhající v rostlinných tkáních jen minimálně, ale v dlouhém časovém období mohou vést ke snížení koloběhu minerálních látek a k poklesu rostlinné produkce. Vysoké dávky UV-B záření mohou poškozovat především dílčí procesy ve fotosyntéze a také zárodečná stadia některých živočichů. Největší nebezpečí ozáření vysokými dávkami UV-B vzniká v jarním období. Víme, že lidská populace žijící v Arktidě je vystavena asi o 30% větším dávkám UV záření, než předešlé generace. To může vyvolávat některé zdravotní problémy.

8. V souvislosti s oteplováním působí na ekosystémy Arktidy celá řada přidružených ekologických faktorů (znečišťování chemickými látkami, intenzivní rybářský průmysl, zvýšené užívání půdy pro zemědělské a průmyslové účely, růst lidské populace), které vyvolávají stres u arktických populací rostlin a živočichů. Tato stresová zátěž může dosáhnout takové úrovně, že vyvolá snížování jejich početnosti, v krajních případech vyhynutí.
9. Redukce mořského ledu povede ke zvýšení námořní dopravy a k zpřístupnění některých zdrojů surovin. Transarktická lodní cesta bude otevřená po delší období a provoz zde pravděpodobně výrazně vzroste. Redukce mořského zalednění umožní těžbu ropy a zemního plynu v nových částech Arktidy. Tání permafrostu bude narušovat některé tradiční transportní koridory (cesty po zamrzlých vodních plochách a v zamrzlé tundře, dálkové ropovody a plynovody, letištní plochy, atd.). Ústup permafrostu bude mít také za následek změnu vodních a odtokových poměrů rozsáhlých oblastí.
10. Původní obyvatelé arktické oblasti budou vystaveni změnám, které budou zasahovat do jejich tradičního způsobu života.

### Historický přehled změn arktické oblasti v souvislosti s globálními změnami klimatu

Význam všech uvedených změn arktické neživé i živé přírody související se změnami klimatu může být snadno zpochybněn. Vždyť přece k výkyvům klimatu arktické oblasti dochází odnepaměti. Člověk zatím nemá takové možnosti, aby ovlivňoval globální zákonitosti. Jsme pouze schopni bezmocně přihlížet a reagovat na změny, které nám budoucnost přinese. To vše je pravda, ale pochopení těchto změn v celé své komplexnosti a komplikovanosti musí ovlivňovat naše chování především v souvislosti se spalováním fosilních paliv.

V období posledního glaciálního maxima (zhruba před 10 000 lety) většinu Arktické oblasti pokrýval ohromný ledový příkrov, který zasahoval až do centrálních částí Evropy, Asie a Severní Ameriky. Přesto byly některé lokální oblasti Arktidy bez zalednění a působily jako refugia pro různé druhy organismů. Průměrná teplota arktické oblasti byla tehdy o 10 až 13 °C nižší než je tomu nyní. V průběhu několika dalších tisíciletí se trend oteplování a opětovného ochlazování mnohokrát opakoval. V některých periodách tyto změny byly velmi rychlé a dosahovaly rychlosti, která je předpovězena pro toto století. Posledním takovým obdobím byla Malá doba ledová, chladná perioda ve vývoji klimatu Arktidy, která spadala asi do období mezi 13. až 19. století.

Můžeme konstatovat, že za posledních 150 000 let zaujímá arktický ekosystém nejmenší rozlohu. Očekávané negativní důsledky klimatických změn nemají v historii celého pleistocenu období, protože současné oteplování je doprovázeno dalšími ekologickými změnami, např. zvyšování dávek UV-B záření, ukládání dusíkatých sloučenin, znečištění těžkými kovy, okyselování prostředí, kontaminace radioaktivními látkami, fragmentace ekosystémů.

### Diverzita, distribuce a charakteristika organismů arktického ekosystému a jejich schopnost reagovat na klimatické změny

Rostlinná diverzita Arktidy je nízká a snižuje se od hranice lesa směrem k polární poušti vysoké Arktidy. Jenom asi 3% (asi 5 900) druhů nacházejících se na naší planetě (vyjma sinic a řas) se vyskytuje v Arktidě, severně od hranice lesa. Primitivní formy rostlin jako jsou mechorosty a lišejníky jsou však v arktické oblasti velmi hojné. Ačkoliv množství rostlinných druhů je v Arktidě všeobecně nízké, vybrané skupiny menších arktických rostlin zde mají vyšší diverzitu než v mírné oblasti. Gradient zeměpisné šířky četnosti rostlinných

druhů naznačuje, že diverzita arktických rostlin je citlivá na změny klimatu a velké množství rostlinných druhů nacházejících stanoviště v blízkosti jižní hranice tundry jsou citlivé na změny teploty. Teplotní gradient ovlivňující druhovou diverzitu rostlin působí daleko markantněji a na kratší vzdálenosti v Arktidě než kdekoli jinde na světě.

V Arktidě nerostou žádné speciální rostliny se speciálními adaptacemi. První schopnost, kterou rostliny rostoucí v Arktidě musí mít, je schopnost tolerovat mráz. Tuto schopnost má asi 75% všech cévnatých rostlin na světě. Krátká vegetační doba a ostrý úhel dopadu slunečního záření předurčuje preference v dlouhém životním cyklu, ve kterém pomalý růst často používá uložené zdroje živin a energie. Některé rostlinné druhy vytvářejí takové strategie, které jim umožňují maximalizovat využití teploty vnitřního prostředí, které je často větší než teplota okolí. Nízká teplota půdy redukuje mikrobiální aktivitu a přístupnost minerálních živin nutných k výživě rostlin. Mechanismus, kterým se rostliny snaží tuto nevýhodu nahradit, je ukládání minerálních živin v tkáních, resorpce živin z odumřelých tkání, zvýšená rychlost příjmu za nízkých teplot, atd. Celá řada vlastností arktických rostlin, kterými se přizpůsobily danému prostředí, je znevýhodňuje v reakci na oteplování. Většina jejich vlastností jim umožňuje žít v extrémním abiotickém prostředí Arktidy, avšak znevýhodňují je v konkurenci s invazními rostlinami přicházejícími z jižnějších oblastí.

Arktické rostliny mají podobnou genetickou různorodost jako rostliny mírného pásma, kolísající od velké variability až po velmi nízkou. Například u široce rozšířeného rodu ostřice není stupeň genetické různorodosti ovlivněn klimatem, ale je do značné míry spojen s glaciální historií lokality, ze které daný druh pochází. Například populace z míst odledněných před 10 000 lety mají významně nižší genetickou variabilitu než populace pocházející z oblastí odledněných před 60 000 lety. Rostlinné druhy s velkou genetickou variabilitou mají většinou geograficky široké rozšíření. Velká genetická heterogenita společně s velkou fenotypovou plasticitou přispívají k odolnosti vůči změnám prostředí na úrovni populací a na úrovni druhů. Semena arktických druhů rostlin si zachovávají vysokou klíčivost po dlouhé období. V semenech je zakódovaná genetická různorodost ve vztahu k ekologickým podmínkám.

Diverzita arktických živočichů nad hranicí lesa (asi 6000 druhů) je asi dvakrát vyšší než diverzita cévnatých rostlin a mechorostů. Arktická fauna obsahuje asi 3% druhů vyskytujících se na světě. Jednodušší typy, jako jsou například chvostokoci, jsou zastoupeny v Arktidě větším počtem druhů než komplikovanější skupiny brouků. Všeobecně můžeme říci, že pokles živočišných druhů se zeměpisnou šířkou je mnohem pomalejší (asi 2,5 krát) než je tomu u rostlin. Současně je potřebné zmínit, že s klesajícím počtem druhů v souvislosti s růstem zeměpisné šířky se zvyšuje dominance vybraných druhů. Zvláště dominantní druhy rostlin a živočichů osídlují široké spektrum biotopů a mají velký význam pro většinu procesů arktického ekosystému.

Suchozemští obratlovci mají celou řadu adaptací, které jim umožňují život v Arktidě. Fyziologické a morfologické adaptace teplokrevných obratlovců (savci a ptáci) zahrnují především mohutnou izolační vrstvu srsti či peří a schopnost vytvářet zásoby podkožního tuku před zimním obdobím. Bezobratlí živočichové si vyvinuli strategie, které je chrání před poškozením nízkými teplotami. Mezi tyto strategie patří schopnost rychlého růstu kombinovaná s výhodným zabarvením (pigmentací) a ochlupením. Krátká vegetační doba s nestálými klimatickými podmínkami představuje pro většinu zvířat časový limit, v jehož rámci musí dokončit životní cyklus. Biotické prostředí je však relativně jednoduché a nebezpečí predátorů či konkurentů o potravu je mnohem menší než v teplejších oblastech. Z těchto důvodů mají arktičtí živočichové menší schopnost v ochraně před dravci a menší odolnost proti nemocím a parazitům. Důležitým předpokladem přežití je víceletý životní cyklus. Celá řada arktických zvířat si vyvinula adaptace, které jim umožňují se vyhnout období nepříznivých klimatických podmínek zimním metabolickým útlumem (hibernací).

Nedostatek potravy a sezónní změny klimatu jsou řešeny schopností migrace na dlouhé vzdálenosti. Na základě těchto charakteristik můžeme konstatovat, že arktičtí živočichové jsou velmi citliví na změny způsobené klimatickými vlivy.

Genetická různorodost arktických terestrických živočichů je ovlivněna přítomností migračních bariér. Pro zvířata s omezenou mobilitou, jako je například lumík, i tak malá překážka jako široká řeka, může tvořit hranici mezi poddruhy. Na druhé straně mobilní zvířata, jako je např. liška, která má velmi malou genetickou variabilitu. V současné době je nedostatek studií, které by se zabývaly schopností zvířat se adaptovat na klimatické změny. Znalosti o rozšíření druhů a jejich hranice výskytu v Arktidě nejsou dobře známy. Porovnání současných migračních cest karibu s historickými záznamy naznačuje, že dochází ke změnám v souvislosti se změnami počasí. To přispívá k možnosti předpovídat jejich chování v případě oteplování.

Poporováním výskytu a hranice rozšíření hmyzu bylo zjištěno, že většinu hmyzích populací nacházíme v oblastech jižně od hranice lesa a s posunem této hranice se rozšiřuje i výskyt hmyzu. Studie zabývající se vybranými druhy ptáků a motýlů naznačují, že v současné době jižněji žijící druhy jsou připraveny migrovat na sever. Na základě klimatického modelu je možné předpokládat, že nastane velmi dramatický pokles ptáků, kteří žijí v tundře, protože se části arktické tundry budou přeměňovat v lesotundru a současně bude ubývat rozloha tundry zaplavováním stoupající mořskou hladinou. To významně přispěje k redukci druhů žijících v tundře.

Diverzita mikrobiálních druhů je těžko odhadnutelná. Arktická půda obsahuje velké zásoby mikrobiální biomasy, ačkoliv diverzita mikrobiálních organismů je nižší než v mírné či tropické oblasti. Celá řada bakteriálních a houbových druhů běžných pro mírnou oblast se v oblasti tundry nevyskytuje. Diverzita mikroorganismů rychle ubývá se zeměpisnou šířkou. Arktické mikroorganismy jsou odolné k vymrzání a dokonce některé z nich metabolizují při teplotách až  $-39\text{ }^{\circ}\text{C}$ . V zimním období je tato metabolická aktivita odpovědná za 50% ročních emisí  $\text{CO}_2$  z půdy. Chladová odolnost je spojená s odolností vůči vysoušení. Mikroorganismy jsou vysoce adaptivní skupina organismů, které tolerují většinu extrémních podmínek Arktidy a díky rychlému životnímu cyklu se přizpůsobují novým ekologickým podmínkám, včetně změn způsobených klimatickými výkyvy. Současné studie ukázaly, že asi jedno procento přírodních bakteriálních kmenů izolovaných v Arktidě vykazuje mutagenní změny. Vysoká rychlost mutací je spojená s možností vzniku různých patogenních mikrobiálních typů, které mohou vyvolat epidemie. Předpokládá se, že v Arktidě budou probíhat rychlé mutace mikroorganismů především v souvislosti se zvyšujícími dávkami UV-B záření, a dále díky toxickým látkám, které se dostávají do Arktidy z mírné oblasti. Ačkoliv pravděpodobnost patogenních mutací není velká, jejich vznik může vést k rozsáhlým epidemiím.

### Klimatické změny a jejich vliv na strukturu a ekologické vazby arktického ekosystému

Změny klimatu pravděpodobně ovlivní tři významné prvky současných ekosystémů Arktidy: a) strukturu vegetace, b) trofické vztahy, c) biodiverzitu. Struktura společenstev se mění se zeměpisnou šířkou od hranice lesa po polární poušť. Vertikální struktura rostlinných společenstev a pokryvnost se mění od lesotundry, která se nachází na jižním okraji arktické oblasti a je nižší než 2 m, až po tundru vysokou do 5 cm s pokryvností menší než 5%, která postupně přechází v polární poušť. Rostlinná společenstva konkrétních lokalit se postupně stěhují do severnějších oblastí. Satelitní snímky a zkušenosti původních obyvatel Arktidy tento pohyb registrují.

Manipulační experimenty s přidáváním minerálních živin ukazují, že přídavky zvyšují produktivitu, výšku vzrůstu a působí na strukturu společenstev. Minerální živiny také

zrychlují koloběh organické hmoty. Vyprodukovaná biomasa může mít pozitivní i negativní vztah k dávkce hnojení. Oteplování tundry v letním období o předpokládané 2 až 4 °C v průběhu budoucích 100 let bude mít menší vliv na vegetaci, než testované přídatky hnojiva a zavlažování. Účinek přídatku živin, teploty a závlahy se stupňuje se zeměpisnou šířkou. V nízké Arktidě je nejnižší, ve vysoké se projevuje výrazně. Na druhé straně, desetiletý experiment s manipulací ekologických podmínek v subarktické oblasti ukázal, že mechorosty a lišejníky snižují svoji produkci. Teplotní manipulace zaměřené na popis reakce půdních bezobratlých organismů ukázaly, že ve vysoké Arktidě reagovala mikrofauna velmi pozitivně, především ta, která žije na povrchu půdy. Méně reagovala mikrofauna žijící pod povrchem půdy a ještě méně mikrofauna subarktické oblasti. Střídání zamrzání a tání v jarním období způsobuje mortalitu celé řady druhů.

Závěrem můžeme konstatovat, že arktičtí bezobratlí budou reagovat na oteplení velmi rychle a pozitivně. Na druhé straně, dlouhodobé letní zahřívání o 2 až 4 °C neukázalo významné změny v mikrobiálních společenstvech, v mikrobiální produkci a v zásobě minerálních živin. Z toho vyplývá, že pouhé zvyšování teploty významně neovlivňuje obsah mikrobiálního uhlíku a uvolňování živin v půdě. Výsledky manipulačního experimentu s UV-B zářením a koncentrací CO<sub>2</sub> ukazují, že dochází ke změnám složení společenstev. UV-B radiace mění složení houbového společenstva. Na rostlinných společenstvech nebyly zjištěny žádné změny po zvýšení UV-B a CO<sub>2</sub>.

Trofické vztahy v tundře a v subarktické lesotundře jsou velmi jednoduché, protože herbivorní složka malých hlodavců se skládá jen z několika málo druhů. Někteří z těchto malých hlodavců se v určitých časových cyklech přemnožují. Cyklické přemnožení způsobuje narušení ekosystému, což se projevuje ve vývoji vegetace, její struktuře a diverzitě. Na toto přemnožení zpravidla navazuje nárůst četnosti jejich predátorů a parazitů. Takto na sebe navazující trofické vztahy jsou velmi citlivé na klimatické změny. Například ledová zimní krusta způsobuje, že se lumíci nedostanou k vegetaci, nebo naopak příliš hluboký sníh způsobuje jejich snadnější „lovitelnost“. Nepřítomnost těchto drobných hlodavců v letním období má za následek větší rostlinnou produkci. V subarktickém lese žije několik druhů hmyzu, které se podobně jako drobní hlodavci přemnožují v určitých časových intervalech. Takto přemnožený hmyz může zdevastovat velké plochy březového porostu a hrát klíčovou úlohu ve struktuře a dynamice lesa.

Díky velmi pomalé dekompozici má arktický ekosystém tendenci hromadit organické látky a živiny. Minerální živiny, především dusík a fosfor často limitují rozvoj arktického ekosystému. Proto se v současné době provádí celá řada experimentů (teplotní manipulace, závlaha a manipulace se sněhovou pokrývkou), které mají za úkol odhadnout, do jaké míry klimatické změny ovlivní vztah mezi fixací uhlíku a limitací minerálními živinami. Jakékoli narušení ekosystému pravděpodobně proběhne za současného zrychlení toku uhlíku a ostatních látek. Obnova ekosystému po narušení je pak velmi pomalá. Jednotlivé rostlinné druhy mají vliv na tok látek ekosystémem, ale rychlost toku vzhledem ke klimatu a zdrojům je zatím neznámá. Podobně také vliv zvýšené koncentrace CO<sub>2</sub> a UV záření na ekosystém není známý. Předpokládá se, že nepřímý efekt vlivu CO<sub>2</sub> a UV záření bude důležitější na úrovni ekosystému než předpokládané změny na úrovni diverzity.

Nejdůležitější plyny v Arktidě jsou CO<sub>2</sub> a CH<sub>4</sub>. Výměna těchto plynů mezi ekosystémem a atmosférou probíhá z poloviny přes respiraci rostlin a z polovinu půdními mikroorganismy. Podmáčená tundra je důležitým dodavatelem CH<sub>4</sub> do atmosféry. Metan je ale také spotřebováván aerobními procesy v půdě. Za normálních okolností je produkce a spotřebování metanu ekosystémem v rovnováze. Uvolňování metanu je ovlivněno složením vegetace a je urychluje ho oteplování půdy. V případě silné zimní sněhové pokrývky, kdy na začátku zimy ještě nedošlo k promrznutí půdy, dochází k silné emisi metanu. Kromě

metanu probíhá v zimním období také uvolňování  $N_2O$ . Oba tyto procesy jsou citlivé na případné zimní oteplování.

Arktida je území, které má největší sezónní rozdíly v toku energie. Je to díky tomu, že se mění albedo (množství odražené sluneční energie) od zimního období, kdy sníh odráží většinu radiace, až po léto, kdy ekosystém naopak absorbuje většinu dopadající energie. Vegetace významně ovlivňuje výměnu vody a energie v arktickém ekosystému. Cévnaté rostliny jsou zodpovědné za většinu toku  $CO_2$ , kdežto mechy se podílejí největší měrou na evaporaci vody. Velikost albeda (odražené energie) v zimním období klesá od tundry přes lesotundru až po opadavý a jehličnatý les. Keře a stromy zvyšují sněhovou pokrývku, která zase zvyšuje zimní teplotu půdy. Rostliny s velkou pokrývností a s mechovými koberci izolují půdu a tím chrání permafrost před rozmrzáním. Budoucí změny ve vegetaci způsobené klimatickými změnami budou ovlivňovat klima celých oblastí.

Fyzikální a biologické procesy probíhající v Arktidě jsou provázané s procesy celé naší planety. Mezi nejdůležitější faktory probíhající v Arktidě v souvislosti se změnou klimatu, které významně ovlivňují celosvětové globální procesy, patří albedo, uvolňování skleníkových plynů nebo jejich poutání, zvyšování koloběhu vody. Všechny tyto procesy jsou řízeny distribucí vegetace. Je ale těžké přesně předpovědět, jak se jednotlivé procesy budou vyvíjet.