

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2024

Kludia Ballóková

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

Katedra ekologie

obor: Aplikovaná ekologie



**Fakulta životního
prostředí**

VLIV KLIMATICKÝCH ZMĚN NA EKOSYSTÉMY ARKTIDY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Kludia Ballóková

Vedoucí práce: Ing. Jana Soukupová, Ph.D.

Praha 2024

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Klaudia Ballóková

Aplikovaná ekologie

Název práce

Vliv klimatických změn na ekosystémy Arktidy

Název anglicky

Impact of climate change on the Arctic ecosystems

Cíle práce

Cílem této práce je popsat klimatický vývoj polárních oblastí v minulosti. Dále budou hodnoceny změny klimatu v současnosti, se zaměřením na oblast Arktidy. Důraz bude kladen na to, jak reagují a vyrovnávají se s měnícími se podmínkami arktické ekosystémy. Součástí práce je rovněž shrnutí zásahů způsobených lidským faktorem a změny ve složení biocenózy.

Metodika

V rámci literární rešerše se práce zaměří na podrobný popis historického vývoje polárních oblastí, charakteristiku arktických ekosystémů – mořských, terestrických, sladkovodních – a popíše antropogenní vlivy. V badatelské části práce bude provedeno hodnocení současného klimatického stavu Arktidy, zhodnocení a popis negativních vlivů změn klimatu na dané složky biocenózy.

Doporučený rozsah práce

50

Klíčová slova

Arktida, oteplování, biodiverzita, ekosystémy, antropogenní vlivy

Doporučené zdroje informací

Data NOAA (Národní úřad pro oceán a atmosféru)

CHRISTENSEN, Tom, et al. Developing a circumpolar programme for the monitoring of Arctic terrestrial biodiversity. *Ambio*, 2020, 49: 655-665.

MELTOFTE, Hans, et al. Arctic Biodiversity Assessment. Synthesis. Conservation of Arctic Flora and Fauna (CAFF), 2013.

SOUKUPOVÁ, Jana. *Metody paleoklimatologie a historické klimatologie a vývoj klimatu na Zemi*. Praha: Powerprint, 2013. ISBN 978-80-87415-91-7.

WEIDER, Lawrence J.; HOBÆK, Anders. Phylogeography and arctic biodiversity: a review. In: *Annales Zoologici Fennici*. Finnish Zoological and Botanical Publishing Board, 2000. p. 217-231.

Zprávy IPCC (Mezivládní panel pro klimatické změny)

Předběžný termín obhajoby

2023/24 LS – FŽP

Vedoucí práce

Ing. Jana Soukupová, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Elektronicky schváleno dne 24. 11. 2023

prof. Ing. Martin Hanel, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 27. 11. 2023

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 18. 03. 2024

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: „Vliv klimatických změn na ekosystémy Arktidy“ vypracovala samostatně a citovala jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použila a které jsem rovněž uvedla na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

Jsem si vědoma, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

Jsem si vědoma, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektronická verze práce je totožná s verzí tištěnou a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souvislosti s GDPR.

V Praze dne _____

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych ráda poděkovala paní doktorce Ing. Janě Soukupové, Ph.D., za její cenné rady, vstřícnost, trpělivost a odbornou asistenci. Děkuji také všem, kteří mě podporovali v průběhu mého studia, a Fakultě životního prostředí České zemědělské univerzity v Praze za poskytnutí odborného vzdělání. I náročné chvíle pro mě byly plnohodnotné, a za tyto zkušenosti pociťuji hluboký vděk.

Abstrakt:

Arktida představuje v klimatickém systému Země klíčovou roli. Odvádí radiální teplo zpět do vesmíru a prostřednictvím oceánských a atmosférických proudění ovlivňuje globální klimatické vzorce. Tato bakalářská práce se zaměřuje na dopady klimatických změn na mořské, terestrické a sladkovodní ekosystémy. Využívá kombinaci literární rešerše, analýzy dostupných dat k identifikaci klíčových trendů a popisu faktorů ovlivňujících arktické ekosystémy. Při hodnocení trendů v biodiverzitě bylo důležité brát v úvahu nejen vliv antropogenních faktorů, ale také procesy z historických událostí, které v minulosti narušily současnou strukturu a funkci ekosystémů. Popis paleoklimatického vývoje polárních oblastí poskytl hlubší vhled do přirozených klimatických fluktuací a zlepšil pochopení reakce arktických ekosystémů na současné klimatické trendy.

Klíčová slova:

Arktida, oteplování, biodiverzita, ekosystémy, antropogenní vlivy

Abstract:

The Arctic plays a key role in the Earth's climate system. It conducts radiant heat back into space and influences global climate patterns through oceanic and atmospheric currents. This bachelor thesis focuses on the impacts of climate change on marine, terrestrial and freshwater ecosystems. It uses a combination of literature searches, analysis of available data to identify key trends and describe factors affecting Arctic ecosystems. In assessing trends in biodiversity, it was important to consider not only the influence of anthropogenic factors, but also processes from historical events that have disrupted the current structure and function of ecosystems. Describing the paleoclimatic evolution of the polar regions provides deeper insight into natural climate fluctuations and improves understanding of the response of Arctic ecosystems to current climate trends.

Key words

Arctic, global warming, ecosystems, biodiversity, anthropogenic impact

Obsah

1. Úvod.....	1
1.2 Cíle práce	2
1.3 Metodika	3
2. Paleoklimatický vývoj polárních oblastí.....	4
2.1 Paleozoikum	4
2.2 Mezozoikum	5
2.3 Kenozoikum	6
3. Současný globální klimatický stav.....	10
3.1 Současný klimatický stav Arktidy	11
3.2 Arktická Amplifikace	11
3.2.1 Albedo.....	12
3.2.2 Albedo kryosféry.....	12
3.2.3 Albedo vegetace.....	15
3.3 Arktická oscilace	15
3.4 Severoatlantická oscilace (NAO).....	16
4. Arktický oceán	18
4.1 Fyzikální a chemické charakteristiky	18
4.2 Mořský led.....	19
4.2.1 Rozsah a tloušťka mořského ledu.....	20
4.2.2 Salinita	21
4.3. Oceánská cirkulace.....	22
4.4 Koncentrace živin v oceánu.....	23
5. Mořské ekosystémy.....	24
5.1 Charakteristika.....	24
5.2 Biodiverzita	24
5.3 Mořští savci	26
5.4 Mořské ryby	28
5.5 Mořští ptáci.....	30
5.6 Plankton.....	32
6. Terestrické ekosystémy	34
6.1 Charakteristika.....	34
6.2 Biodiverzita	34

6.3 Terestriční savci.....	35
6.4 Terestrická avifauna.....	36
6.5 Tundra.....	37
7. Sladkovodní ekosystémy.....	39
7.1 Charakteristika.....	39
7.2 Biodiverzita	40
7.3 Plankton.....	40
7.4 Ryby.....	41
7.5 Abiotické faktory	41
8. Antropogenní vlivy	42
8.1. Změna klimatu.....	42
8.2 Lodní doprava.....	43
8.3 Těžba přírodních zdrojů	45
8.4 Rybolov	45
9. Diskuse a závěr	47
Zdroje	47
Přílohy.....	Chyba! Záložka není definována.

1. Úvod

Arktida je fascinující region, který představuje jednu z mála nedotčených oblastí divoké přírody. Specifičtí, endemičtí a globálně významní jedinci jsou součástí unikátní biodiverzity. Společně s rozsáhlým terestrickým, mořským a sladkovodním prostředím vytváří křehké ekosystémy, které se formovaly miliony let.

V současné době vzrůstá zájem lidí o Arktidu z hlediska ekonomických, strategických, ale především ekologických otázek. V této práci jsou otázky zaměřeny na rostoucí akutní hrozby, kterým arktické ekosystémy čelí. Rychlé oteplování atmosféry a jeho dopady na lokální i globální klima, ztráta biotopů, úbytek ledové pokrývky a změny ve složení a distribuci druhů jsou alarmujícím ukazatelem probíhajících změn.

Alespoň částečné zodpovězení toho, jakým způsobem se ekosystémy vyrovnávají s bezprecedentními výzvami současné doby, nám pomůže lépe porozumět tomuto složitému prostředí. I když se Arktida může zdát příliš izolovaná, je součástí komplexního globálního systému oceánského a atmosférického proudění, které ovlivňuje celou planetu.

1.2 Cíle práce

Cílem této práce je popsat klimatický vývoj polárních oblastí v minulosti. Dále budou hodnoceny změny klimatu v současnosti, se zaměřením na oblast Arktidy. Důraz bude kladen na to, jak reagují a vyrovnávají se s měnícími se podmínkami arktické ekosystémy. Součástí práce je rovněž shrnutí zásahů způsobených lidským faktorem a změny ve složení biocenózy.

1.3 Metodika

V rámci literární rešerše se práce zaměří na podrobný popis historického vývoje polárních oblastí, charakteristiku arktických ekosystémů – mořských, terestrických, sladkovodních – a popíše antropogenní vlivy. V badatelské části práce bude provedeno hodnocení současného klimatického stavu Arktidy, zhodnocení a popis negativních vlivů změn klimatu na dané složky biocenózy.

2. Paleoklimatický vývoj polárních oblastí

Pro komplexní pochopení současných klimatických jevů je důležité hluboké vnoření do paleoklimatického kontextu Země, která procházela výraznými přirozenými změnami i v dobách před zásahy lidstva. Tato kapitola se věnuje detailnímu popisu vývoje obou polárních oblastí a poskytuje holistický pohled na podobnosti i odlišnosti severní a jižní hemisféry.

2.1 Paleozoikum

Soubor kontinentálních šelfů a pevnin, které dnes definují arktický region, byl v minulosti od sebe vzdálený a roztroušený po celém světě. Menší kontinentální fragmenty, později začleněny do arktického regionu, se označují jako circum-arktické terény. Geologická historie Arktidy sahá do hluboké minulosti několika stovek milionů let. Z důvodu nepřístupnosti terénu, náročných klimatických podmínek a politických faktorů zůstává mnoho geologických procesů neobjasněných. (Blakey, 2021)

V paleozoiku, přibližně 600 milionů let BP (before present) vznikl superkontinent Gondwana, který existoval až do pozdní jury. Událo se tak důsledkem kolize některých částí prekambričké prapevniny Rodinie. Po dobu 200 milionů let dominovala Gondwana jako největší kontinentální blok, obklopená oceánem. Pevnina zasahovala z jihu přes rovník a její součást tvořila Antarktida, Jižní Amerika, Afrika, Austrálie a indický subkontinent. (Torsvik a Cocks, 2013) Teplé a stabilní klima vytvořilo vhodné podmínky pro tzv. kambrickou explozi života, při které vznikalo po dobu 52 milionů let v oceánu velké množství živočišných druhů. Vlhké podnebí a absence detritivorních organismů přispívalo k akumulaci organických zbytků těl rostlin. Roztátá ledovcová voda, nasycena obsahem živin uvolněných ze zvětraných hornin, vtékala do teplých šelfových moří, která obmývala kontinenty. Četné paleontologické důkazy o tom, že se kontinenty sjednocovaly v oblasti jižního pólu, lze potvrdit přítomností ledovcových usazenin, tzv. tilitů. Tyto heterogenní usazeniny jsou směsí hrubých a jemných částí a jsou výsledkem unášení z ledovcové činnosti. To dokazuje nejen střídání ledových období, ale také naznačuje existenci kdysi jednotné pevniny. Nalezené fosilie živočichů a rostlin, rozprostřené napříč kontinenty, a geologické podobnosti mezi východním pobřežím jižní Ameriky a západním pobřežím Afriky podpořily myšlenku německého paleoklimatologa A. Wegenera o kontinentálním driftu. Teorie o tektonickém pohybu litosférických desek, byla potvrzena v polovině 20. století, po seismickém průzkumu oceánského dna a objevení středoocéánských hřbetů. Za zmínku stojí i fosilní nálezy semen kapradiny rodu *Glossopteris*, rozšířená po různých částech kontinentů. Semena této rostliny byla objemná a těžká natolik, aby byl transport na pevninu skrze oceán vyloučen. (Pallardy, 2010; Soukupová, 2013; University of Illinois, 2014)

Souběžně s Gondwanou existovaly další kontinentální desky tvořené Laurentií (recentní Severní Amerika a Grónsko), Baltikou (geologický základ Fennoskandinávie) a Sibiří (část Asie). Devon je charakteristický dynamikou tektonických desek. Kolize Laurentie a Baltiky dala za vznik Laurusii (Grónsko, Severní Amerika, Skandinávie a Rusko), známou jako Euramerika. Laurasie se stala masivním kontinentem a její severní okraj z většiny pozůstal z circum-Arktických terénů. Toto období je typické horotvornými procesy, známými jako kaledonská orogeneze.

Periodické střídání vlhka a sucha přispívalo k diverzifikaci fauny a flóry. Stabilní ozonová vrstva poskytla ochranu před škodlivým ultrafialovým zářením, a tak se komplexní formy života mohly adaptovat na suchozemské podmínky. V prostředí se nabízely nové ekologické niky. Prostřednictvím rostlinné biocenózy byla atmosféra obohacovaná kyslíkem a spotřebováván v značném množství byl oxid uhličitý. To vedlo v následujících událostech ke globálnímu ochlazení planety a zalednění obou pólů.

Tektonická aktivita pokračovala a ve svrchním permu byly kontinenty sjednocené do nového superkontinentu Pangea. Podle klimatických hypotéz v tomto období převládalo chladné klima na severu a jihu kontinentu, zatímco v oblasti rovníku bylo klima tropické. Je odhadováno, že během permského vymírání na přelomu permu a triasu vymizela masová část životních forem na Zemi, avšak přesná příčina zůstává nejasná. Nejpravděpodobnější se ukazují teorie o intenzivní vulkanické činnosti, spojené s vysokou koncentrací síry, která vede k drastickému zvýšení teploty oceánu. To má za následek vznik anoxického stavu (teplá voda neumožňuje dostatečné vázání kyslíku), nepříznivé kontinentální podnebí a kombinace různých faktorů. (Kutílek, 2008; Soukupová, 2013; Blakey, 2021)

2.2 Mezozoikum

Pangea se v triasu rozprostírala v oblasti rovníku a uvnitř pevniny, vzdálené od oceánu, převládalo aridní klima. V důsledku rozpínajícího se oceánského dna dochází k postupné fragmentaci Gondwany a Laurasie. Tektonický proces rozpadu mezi Austrálií a Antarktidou probíhal paralelně s oddělováním Indie od Antarktidy. Tento pohyb, známý jako rifting, se těsně po iniciaci až do pozdní křídly zastavil. (Boger, 2011)

K otevření nejstarší pánve Arktického oceánu, Kanadské pánve, došlo v rané křídě. Do tohoto období, existovala pouze mělká propojená epikontinentální moře, jakožto předchůdce oceánu. Charakteristická jsou vysokou biologickou produktivitou. Fossilní nálezy ektotermních plazů předpokládají mírné klimatické podmínky. Mezozoické živočišné společenstvo pozůstává z mnoha taxonů plazů, vyvíjí se avifauna, měkkýši, hmyz. V arktické vegetaci se začaly objevovat kvetoucí krytosemenné rostliny (*Angiospermae*). Vytvořily rozsáhlé porosty teplomilných cykasů, jinanů a jehličnanů. Proxy data důležité k rekonstrukci historických klimatických podmínek nejen z tohoto

období, nám poskytli zkameněliny dírkonožců – tzv. foraminifery. Savci získávají v průběhu svého vývoje několik evolučních výhod. Životní strategie jako omnivorie, nokturální způsob života, nebo vývoj potomstva uvnitř těla matky, se savcům ukázaly být výhodné k přežití, vzhledem k následujícím událostem. Fosilní nálezy mrazuvzdorných sekvojí ze Svalbardu a letokruhy poškozené chladem ukazují na výrazné ochlazení v pozdní křídě. Uzavřením Beringova průlivu a Západního vnitřního moře započala izolace Arktického oceánu. (Soukupová, 2013; O'Regan et al., 2011)

Mezi 65 až 100 miliony let BP se Antarktida nacházela v oblasti jižního pólu, ale bez známek zalednění. V atmosféře byl koncentrovaný vysoký podíl CO₂, a tak i přes svou pozici v polární oblasti vykazovala teplé a mírné klimatické podmínky, které podpořily růst bujné vegetace a nabízely habitat mnoha druhům, které udržely svůj vývoj po permském vymírání. (Turner et al., 2009) Poslední masové vymírání na konci křídě je asociované s dopadem mimozemského tělesa a vulkanickou aktivitou. Kombinace těchto událostí měla devastující impakt na biodiverzitu. Zastavení fotosyntézy, způsobené zatměním atmosféry, blokuje propustnost slunečních paprsků a Země se po prudkém oteplení z uvolněné energie ochlazuje. Tento event značně zasáhl suchozemskou megafaunu a současně vytvořil nový životní prostor pro jiné organismy, které přežily. (Acot 2005; Kutílek, 2008; Soukupová, 2013)

2.3 Kenozoikum

V průběhu kenozoika došlo v Arktidě k signifikantním teplotním změnám. Pozitivní zpětné vazby, které zahrnují změny v rozsahu mořského ledu, trvání sezónní sněhové pokrývky a změny v rozložení ekosystémů byly umocněny. Střídání ledových a meziledových období mělo vliv i na fyzikální charakteristiky pevniny. V závislosti na přítomnosti ledu docházelo pod jeho tíhou k poklesu či vzestupu pevniny. Například Skandinávský poloostrov se v současnosti zvedá přibližně o 9 mm za rok. Podstatnou část fauny tvořili savci, mnoho z nich dnes známé druhy. Čtvrtohorní období výrazného ochlazení byla čtyři a každé z nich mělo výrazný vliv na biodiverzitu. Transgrese a regrese moře vedla k vyhynutí mnoha mořských i suchozemských druhů. Na druhé straně, náročné podmínky vedly zástupce rodu *Homo* k vynalézavosti a inovativním řešením. (Acot,2005; Soukupová, 2013; Blakey, 2021)

Na přelomu paleocénu a eocénu, zhruba před 55 miliony lety BP, byla zaznamenána krátká epizoda extrémních klimatických podmínek. Globální oteplení, známé jako termální maximum paleocénu – eocénu (PETM), bylo podmíněno masivním uvolněním skleníkových plynů do atmosféry a nárůstem hladiny moří. (Sluijs, 2006) Ve vysokých zeměpisných šířkách dnešní Arktidy převládalo teplé a vlhké klima. V těchto podmínkách rostly lesy a prosperovali živočichové, jako jsou želvy a aligátoři, kteří tolerovali široké teplotní rozmezí. Při rekonstrukci paleoklimatických dat je vhodné brát na zřetel sezónní rozsah teplot, které mohou mít pro organismy větší význam než průměrné roční teploty. To vše bylo zjištěno na základě izotopového

měření kyslíku z fosilních záznamů těchto živočichů v Kanadském souostroví. (Eberle, 2010) Podle Chlupáče et al. (2011), rozložení kontinentů v terciéru bylo podobné současné pozici. Prohloubení atlantského oceánského dna změnilo režim mořských proudění a umožnilo transport hlubokých studených oceánských vod ze Severního ledového oceánu do jižnějších částí Atlantiku. Na přelomu eocénu a oligocénu došlo k významným tektonickým událostem. Oddělením Austrálie od Antarktidy definitivně zanikl kontinent Gondwana a na Antarktidě expandovali ledovce, jakožto první zalednění v celém kenozoiku. Zánik starých pevninských mostů, známý jako otevření Tasmánské brány a Drakeova průlivu, separoval teplé rovníkové vody od chladných jižních vod. To zamezilo tepelnou výměnu a vznik antarktického cirkumpolárního proudu (ACC). Vznik ACC a izolace antarktického kontinentu podnítl evoluční divergenci chladnomilné fauny. V tomto období došlo k adaptaci a specializaci některých mořských taxonů, typických pro antarktickou faunu. Dobrým příkladem jsou notothenioidní ryby, dnešní endemity, přizpůsobené extrémním podmínkám studeného a izolovaného prostředí. Diverzifikace evolučního rázu probíhá i u mořských a suchozemských savců, z nichž se oddělují hominidé. Informace o tom, jak se Arktida vyrovnávala se změnami klimatu na přelomu eocénu – oligocénu jsou z důvodu nedostatečných geologických dat neznámé. (Kennett, 1977; Convey, et al., 2009; O'Regan et al., 2011; Soukupová, 2013)

Některé studie naznačují, že události spojené s otevřením Drakeova průlivu jsou nevyhnutelným mezistupněm k ochlazení, ale nebyly jeho přímou příčinou. Důležitou roli představuje i pokles CO₂ v atmosféře a tektonický pohyb. (Toumoulin et al., 2020) V pliocénu pokračovalo ochlazení a na ústupe byly subtropické oblasti, a naopak expandovaly polární ledové čepičky. Antarktida zaznamenávala plné zalednění a také na Arktidě se vyvíjeli kontinentální ledovce a rozšiřoval se biotundry. K arktickému zalednění vedli okolnosti spojené s rozšiřujícím se mořským dnem v oblasti Severního Atlantiku. Tím vzniklo propojení Tichého a Atlantického oceánu přes Beringův průliv, jak je doloženo z nálezů měkkýšů a také se dokončil vývoj Arktického oceánu. Mezi Karibským mořem a Tichým oceánem došlo k zesílení Golfského proudu. Tyto fáze mohly být zahajovacím faktorem, jež předcházely glaciálním cyklům, které doprovázely celý kvartér. (Kutílek, 2008; O'Regan et al., 2011; Soukupová, 2013; Blakey, 2021)

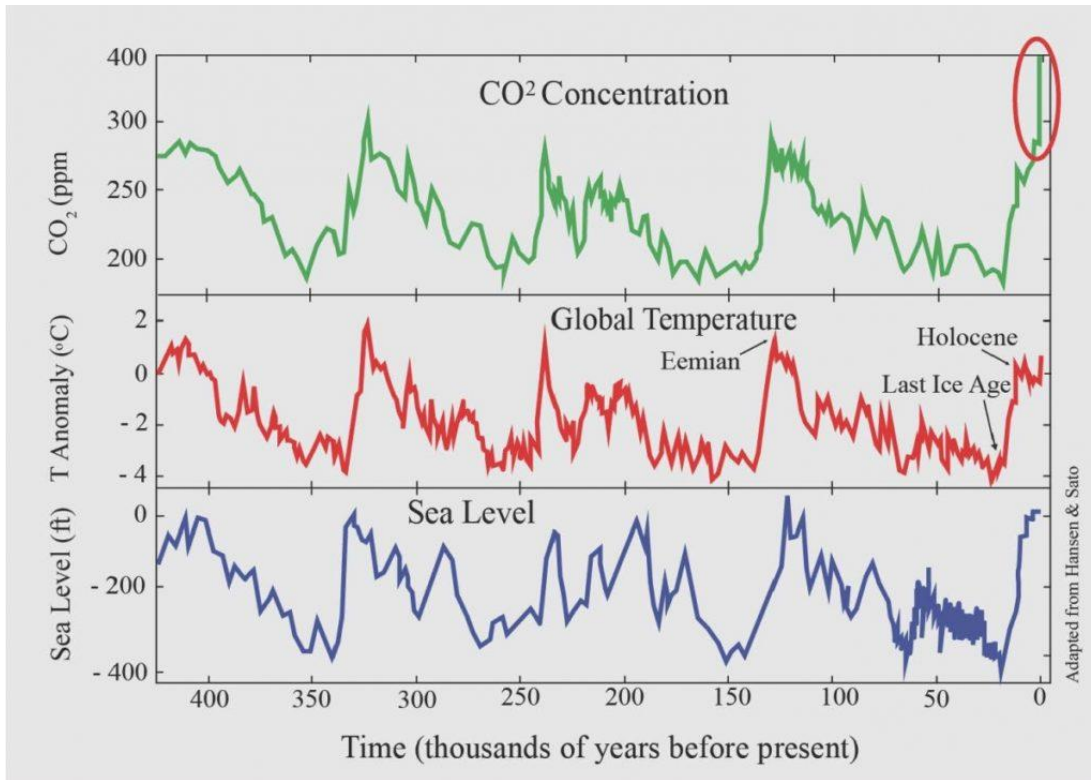
Tektonický pohyb litosférických desek v pleistocénu pokračoval a přispíval k dlouhodobému posunu Severní Ameriky, Evropy a Asie za hranici severního polárního kruhu. Významná glaciální aktivita se projevovala v raném až středním pleistocénu opakovaným rozšiřováním ledovců až k hranicím Arktického oceánu. Celé klimatické období je charakteristické jako doba ledová s výrazným kolísáním teplot. Příčiny ochlazení nejsou zcela jasné, ale mezi hlavní faktory patří astronomické vlivy, zejména Milankovičovy cykly. Teplé epizody mohly být zapříčiněny sluneční aktivitou, nebo změnami v oceánských režimech. Glaciály, které trvají 40 až 100 tisíc let, jsou přerušovány interglaciály s délkou přibližně 10 tisíc let, a tyto periody se střídají během posledního milionu let. Glaciál je definovaný přítomností rozsáhlých ledovců, zejména v polárních oblastech, což vytváří suchá a krátká léta a dlouhá a

mrazivé zimy. V těchto podmínkách mohou přetrvávat pouze druhy, jež se přizpůsobily extrémnímu prostředí. Některé rostlinné druhy reagovaly na změny teplotního režimu migrací do nižších poloh, což přispělo k zvýšení diverzity a vytvoření horských pásem, jaké můžeme nalézt v Severní Americe. Abbott a Brochmann (2003) na základě molekulárních metod uvádí, že Beringia, kdysi odhalená pevnina Beringova průlivu, byla významným refugiem pro arktické rostliny v době zalednění a také sloužila jako pevninský most umožňující šíření a přežívání flóry. Naopak rostliny, kterým přístup do nižších poloh neumožnila přirozená bariéra v podobě moře nebo pohoří a neadaptovaly se, vymřely. Ve vysokých zeměpisných šířkách se vyskytují zakrslé formy dřevin, lišejníky a mech, keříčková vegetace typická pro tundru. Také zástupci pleistocénních živočichů jako jsou mamuty, los, rosomák, sovice sněžná, hraboš sněhový, medvěd, kozorožec, alpský zajíc, nebo vlk, se museli přizpůsobit, nebo vymřeli. Toto zalednění dokončilo vývoj arktické krajiny.

S nástupem holocénu se objevily lesy s rozličným druhovým složením, charakteristické pro jednotlivá údobí. V mladším holocénu, v preboreálu, převládaly borovice a břízy. V boreálu pokračovalo oteplení a objevovaly se borovicové porosty s příměsí lísky, mizely poslední zbytky ledovců ve Švédsku, Skandinávský poloostrov, uvolněný od tíhy ledovce, se zvedal nad mořskou hladinu, ale zaledněná zůstávala Severní Amerika. Atlantik byl charakteristický bohatými srážkami a vlhkým klimatem, což podporovalo růst lesů a převažovali složením z líp, jasany, jilmy a ve vyšších nadmořských výškách se dařilo borovici kleči. V období přechodu z poslední doby ledové do holocénu došlo k významnému kolísání teplot, což pravděpodobně vedlo k přerušení termohalinního proudění nad Atlantským oceánem, kde dochází k procesům vypařování a výměně tepla s atmosférou. Toto období mladšího dryasu, je pojmenované podle dryádky osmiplátečné, kdysi hojně rozšířené rostliny, která je nyní považována za glaciální relik. (Acot, 2005; Kutílek, 2008; Soukupová, 2013)

Období holocenního termálního maxima před 9–15 tisíci lety, bylo asociováno se silnou sluneční aktivitou, která spolu se severoatlantickou oscilací ovlivňovala klima. Následkem tohoto oteplení, se výrazně snížila ledová pokrývka Arktického oceánu. Druhá polovina interglaciálu byla charakteristická nestabilním klimatem s výkyvy suchých a teplých období. Poslední interglaciál, často považovaný za analogii současného holocénu, se pravděpodobně transformuje do své druhé poloviny. Začátkem holocénu převládalo kontinentální klima a člověk začal nabývat většího vlivu na formování krajiny a distribuci druhů. (Acot, 2005; Kutílek, 2008; O'Regan et al., 2011; Soukupová, 2013)

Obr. 1: Graf relativní změny globální průměrné teploty, CO₂ a hladiny moře za posledních 420 000 let. (www.johnenglander.com.)

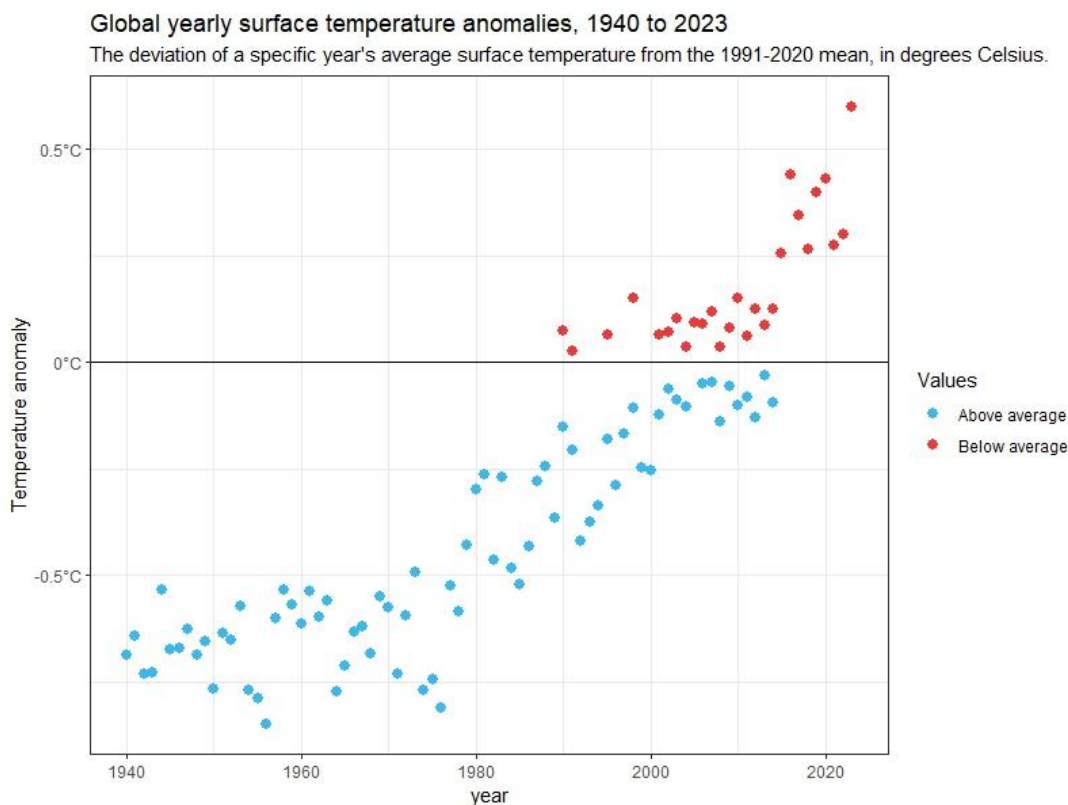


3. Současný globální klimatický stav

Mezivládní panel pro změnu klimatu (IPPC) ve výroční zprávě o změně klimatu z roku 2023 uvádí, že došlo k zvýšení teploty Země o 1,1 °C v období mezi lety 2011-2020, ve srovnání s předindustriální dobou. Za naléhavé uvádí i tempo růstu teploty. Hlavním hybatelem změn jsou zvýšené emise skleníkových plynů z fosilních paliv a průmyslových procesů, které pocházejí z lidské činnosti. Zvýšení koncentrace CO₂ v atmosféře, bylo v roce 2019 na nejvyšší úrovni za poslední dva miliony let, koncentrace metanu a oxidu dusného dosáhlo nejvyšší úrovně koncentrace za posledních 800 000 let. (IPPC, 2023)

Podle dat z NOAA (Národní úřad pro oceán a atmosféru) dosáhly povrchové teploty za posledních 143 let rekordních hodnot. Kombinovaný průměr povrchové a oceánské teploty se zvýšil během této doby o 0,08 až 0,18 °C za desetiletí. Vzhledem k vysoké tepelné kapacitě vody a množství energie, která je potřebná k ohřátí velkých oceánských mas, má takové zvýšení teploty dopad na celoplanetární klimatický systém. Podle uvedených dat se pevnina otepluje rychleji než oceány, což je dáno menší tepelnou kapacitou pevniny. (Lindsey a Dahlman, 2023)

Obr. 2: Graf průměrné roční globální povrchové teploty z let 1940-2023 (vlastní zpracování, data: www.ourworldindata.org)



Spalování fosilních paliv je hlavní dominantou v uvolňování emisí uhlíku. Využívání solární a větrné energie v posledních letech vzrostla o 17 %. Navzdory tomu, některé země ve snaze zmírnit rostoucí ceny energií zvýšily dotace na využívání fosilního paliva a spotřeba uhlí v roce 2022 téměř dosáhla historického maxima. K uvolnění více než jedné gigatuny emisí CO₂ také přispěly rozsáhlé rekordní požáry v Kanadě v roce 2023, které byly částečně způsobeny změnou klimatu. (Ripple et al., 2023)

3.1 Současný klimatický stav Arktidy

Arktidu lze chápat a definovat různými způsoby, především jako unikátní geografický region. Na rozdíl od pevninských oblastí, není obklopená oceánem, ale Severní ledový oceán je obklopený pevninou. Geografické vymezení hranic Arktidy lze nejčastěji provádět podle polárního kruhu, imaginární linie na severní hemisféře, která se nachází na 66°33' severní šířky. Oblast vně polárního kruhu je také charakteristická letním slunovratem, který připadá přibližně na 21. června, kdy slunce po dobu šest měsíců nezapadá. V období zimního slunovratu, kolem 21. prosince, naopak slunce šest měsíců nevychází. Méně často než pomyslným polárním kruhem lze Arktidu vymezovat biologicky jako oblast tundry severně od arktického stromořadí, což koreluje s regiony, kde průměrná teplota v červenci nepřesahuje 10 °C.

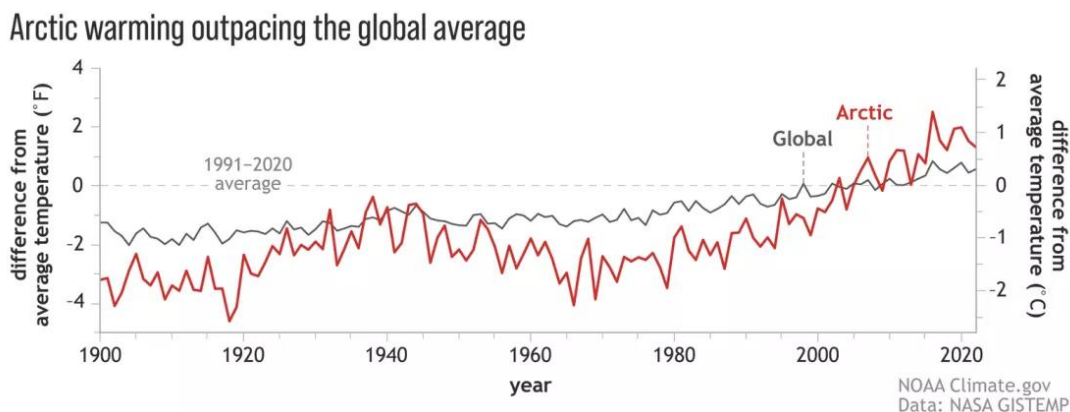
Arktické klima je nejvíce ovlivněno množstvím dopadající sluneční energie. Zároveň se odlišuje přímořské klima od kontinentálního. Přímořské klima na pobřeží Aljašky, Islandu, severního Ruska a Skandinávie je v zimě charakteristické častými sněhovými bouřemi a vyššími srážkami. V létě převládá chladné počasí s oblačností a nedostatkem slunečního svitu. Na pevnině vzdálené od pobřeží převládá kontinentální klima. Vyznačuje se suchými zimami a slunečnými léty. V některých částech Sibíře, kde je nedostatek srážek, hovoříme o takzvané polární poušti. Klimatické podmínky na Arktidě a Antarktidě jsou z důvodu jejich specifické polohy a konfigurace jedinečné a mají klíčový vliv na počasí v nižších zeměpisných šířkách. (NDSIC)

3.2 Arktická Amplifikace

Arktida má zásadní význam pro globální klimatický systém a nejrychleji reaguje na současné změny klimatu. Arktida se otepluje více než dvakrát rychleji, než je celosvětový průměr. (Rabe et al., 2020) Podle Rantena (2022) trend oteplování v Arktidě sleduje navýšení průměrné teploty o 0.73 °C za desetiletí, oproti globálním hodnotám 0.19 °C za desetiletí. Arktida reaguje na klimatické změny výrazněji, než ostatní části Země, a děje se tak v nezávanosti na silné zpětné vazby. Rozsah sněhové pokrývky a mořského ledu je považovaná za rychlou zpětnou vazbu reagující na změny sezónně. Zpětná vazba permafrostu a vegetace má pomalejší odezvu, v časovém měřítku desetiletí až století. Nejpomalejší zpětná vazba s tisíciletou dobou trvání se projevuje změnou rozsahu kontinentálních ledových příkrovů a reakci zemské kůry na změny hmotnosti. Pochopení toho, proč dochází k arktické

amplifikaci, vychází z pochopení fyzikálních procesů, které jsou jejími důležitými činiteli a budou vysvětleny v následující části. (Miller et al., 2010; Ranter, 2022)

Obr. 3: Graf porovnávající rostoucí průměrné teploty globálně a na Arktidě, způsobené arktickou amplifikací (www.nsidc.org)



3.2.1 Albedo

Různé povrchy disponují odlišnou mírou odrazivosti sluneční energie. Nejvyšší albedo ze všech povrchů na Zemi má čerstvý sníh a mořský led, který udržuje na Arktidě dlouhodobě nízké teploty vysokou mírou odrazivosti slunečního záření zpět do vesmíru. Pochopitelně proto mají sezónní změny na povrchu planety největší vliv na energetickou bilanci. Mechanismus albeda je narušený klimatickými vlivy oteplování a dochází ke snižování plochy povrchů, které disponují vlastnostmi vysokého albeda. Ty nahrazují povrchy s nízkou mírou odrazivosti a vysokou schopností absorbovat sluneční záření, čímž se trend oteplování umocňuje. V Arktidě je častým jevem teplotní inverze, kdy studený vzduch zabraňuje vertikálnímu míchání a oteplení se soustřeďuje v blízkosti povrchu. Naopak, pokud by nastalo snížení globální teploty, celková vyšší míra albeda by vedla k zalednění povrchů, následnému poklesu teploty a negativní zpětné vazbě. (Miller et al., 2010)

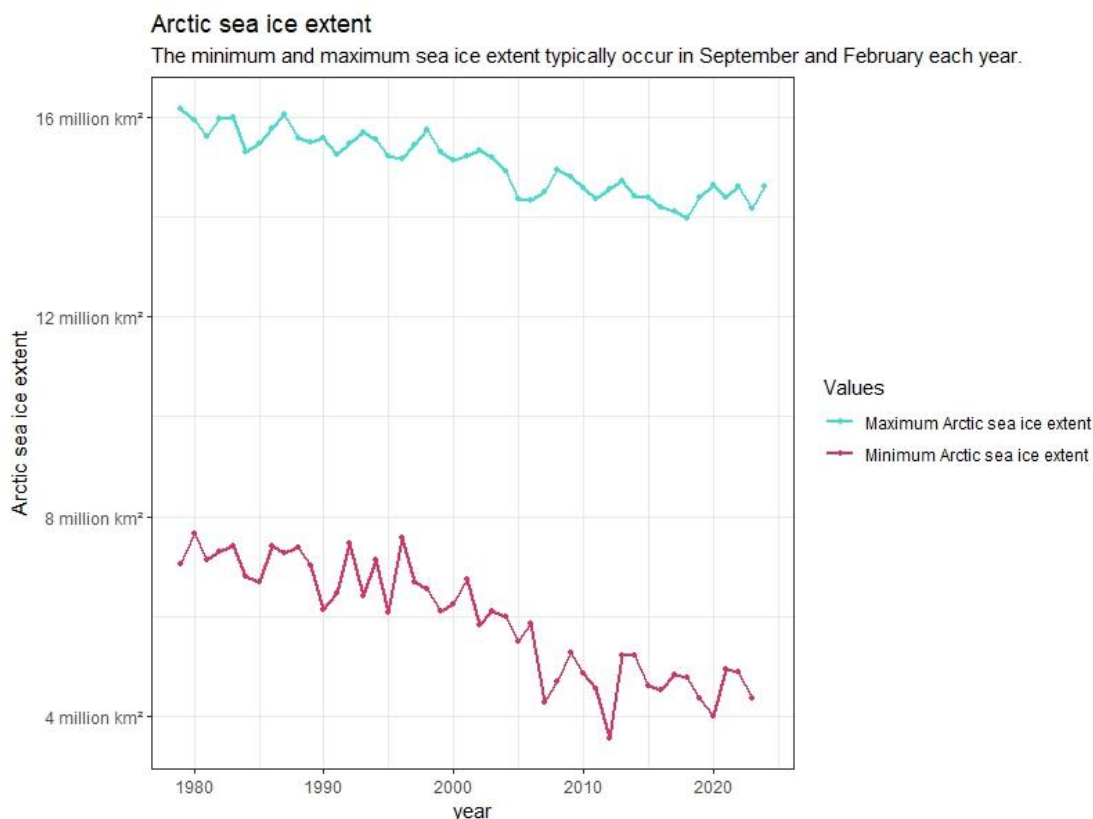
3.2.2 Albedo kryosféry

Ledová pokrývka se rozprostírá po celém Arktickém oceánu s průměrnou tloušťkou dva metry. Výrazný je sezónní cyklus, kdy se v létě ztratí přibližně dvě třetiny mořského ledu. (Timmermans a Marshall, 2020) Vlivem klimatických změn dochází k prodloužení doby tání mořského ledu v letním období. Postupem času ledové pokrývky mizí a na povrch se dostává oceánská voda s vyšším absorpčním potenciálem a nižší mírou odrazivosti. Ta absorbuje více slunečního záření, než vysoko odrazivý led, a ohřívá se ve smíšené vrstvě, což představuje přibližně svrchních 20 metrů. V této vrstvě dochází k intenzivnímu míchání vody, které ještě více podporuje

tání ledu od povrchové vody. Vzduch nad Severním ledovým oceánem je mnohem chladnější než povrchová voda a v důsledku odstranění ledového příkrovu dochází k intenzivnější výměně tepla mezi atmosférou a oceánem. S omezeným slunečním svitem se v zimě znovu začne tvořit led, ale v menší míře, protože uvolňování latentního tepla ve smíšené vrstvě už nedovoluje vytvořit tak pevnou vrstvu ledu. Proces se uzavře zpětnou vazbou, kdy v důsledku nevytvoření dostatečně mocné vrstvy led v létě opět rychleji roztaje a vznikne větší plocha otevřené vody. (Serreze a Barry 2011)

Nejvýraznější míra oteplování Severního ledového oceánu v letech 1979-2021 byla pozorovaná v ruské oblasti poblíž Nové Země, a to až o sedmkrát rychlejší nárůst teploty, oproti globálnímu průměru. Oteplení koreluje s výrazným úbytkem mořského ledu v zimním období v Bartensově moři, kde k oteplování přispěly změny v atmosférické cirkulaci nad touto oblastí. (Ranten, 2022) Během 45letého období satelitního měření byla průměrná rozloha arktického mořského ledu v říjnu 2023 sedmá nejnižší. Nadprůměrné teploty vzduchu nad Severním ledovým oceánem byly během října v Kanadském souostroví, zatímco průměrné teploty byly nad Čukotským a východosibiřským mořem a nadprůměrné teploty byly dosaženy nad Beringovým průlivem, Bartensovým mořem a Norským mořem. Od roku 1979 následuje arktický mořský led klesající lineární trend a ztratil už 3,49 milionů kilometrů čtverečních. (NSIDC)

Obr. 4: Minimální a maximální rozsah arktického mořského ledu, v letech 1979-2023 (vlastní zpracování, data: www.resourcewatch.org)



3.2.3 Permafrost

Během poslední doby ledové se organické zbytky rostlin uzamkly v půdě. Vlivem oteplování a opětovného zamrznání substrátu docházelo k vertikálnímu míchání. Zmrzlá půda s obsahem organické hmoty uchovává dvojnásobek uhlíku ve srovnání s atmosférou, protože vlivem chladu nedochází k rozkladu. Nejvyšší podíl organické hmoty se nachází ve svrchní vrstvě půdy do hloubky tří metrů. Pokud teplota půdy zůstává pod nulou dva po sobě jdoucí roky, hovoříme o permafrostu. Současné rozšíření permafrostu v Arktidě započalo po teplém pliocenním období v nezaledněné Sibiři a největší expanze probíhala během posledního milionu let, což souviselo s poklesem CO₂ na úroveň 220 ppm (části na milion).

Arktická amplifikace přispívá k pozitivní zpětné vazbě, při které dochází k tání a rozkladu organické hmoty. Při procesu dekompozice je do atmosféry uvolňován oxid uhličitý a metan. Tyto skleníkové plyny mají vysoký účinek při zesílení globálního oteplování a při následném dalším tání permafrostu, přičemž metan je 33-krát účinnější skleníkový plyn než oxid uhličitý. Uvolňování metanu z podmořského permafrostu je možné skrze emisní krátery, talíky, nebo zlomy v zemské kůře, ale reakce je zpomalena chladnými vodami u dna oceánu. Novodobé tání permafrostu ještě nepřekročilo rozsah

tání z posledního odlednění, ale dopady pozitivní zpětné vazby uhlíku jsou velkou hrozbou pro aktuální století. (Schaefer et al., 2014; Jones et al., 2023)

Zmenšení rozlohy mořského ledu, prodlužování období s otevřenou mořskou vodou bez ledu, stoupající teploty vzduchu a mořské hladiny jsou klíčovými přispívajícími k erozi permafrostových pobřeží. Nejvýznamnější dynamika eroze byla zaznamenána na pobřeží Beaufortova moře, na sibiřském pobřeží v oblasti Barentsova, Karského a Laptěvského moře a na jediné dostupně měřitelné lokalitě v Grónsku. Nejvyšší míra eroze se vyskytuje v nebezpečných sedimentech, které pokrývají více než polovinu arktických pobřeží s permafrostem. Erozi pobřeží bohatých na led řídí letní teplo a vlnové působení moře. (Jones, 2020)

3.2.3 Albedo vegetace

S rostoucími teplotami v létě se zkracuje doba trvání sněhové pokrývky a prodlužuje se vegetační doba rostlinstva. Vegetace křovinaté tmavé tundry se rozšiřuje dále směrem na sever a nahrazuje nízko rostoucí tundru s vysokým albedem. Taková změna vegetace podporuje oteplování regionu. Opačná situace by nastala, kdyby stálezelené boreální lesy v důsledku oteplování ustoupily opadavým listnatým lesům, jižnějších poloh. Touto změnou by se zvýšilo albedo regionu a působily by negativní zpětné vazby. (Miller et al., 2010) V závislosti na množství uhlíku uloženého ve vegetaci, může změna druhového složení vegetace ovlivnit regionální koloběh uhlíku, trofické interakce a zpětné vazby na globální úrovni. Vzrostlé keře zachytávají více sněhu a sluneční radiace, izolují spodní půdu, která si udržuje vyšší teplotu, vede k potencionálně většímu rozkladu a absorbují více slunečního záření. Rozšíření dřevní biomasy keřů také zvyšuje riziko požárů. Důležitým izolátorem půdy je mech, který se podílí i na energetickém toku. Z experimentálních studií bylo zjištěno, že ztráta mechorostů by vedla k zvýšené evapotranspiraci, tání permafrostu v hlubších vrstvách půdy a uvolňování uhlíku. (Bjorkman et al., 2019)

Společenstva lišejníků jsou ohrožena pastvou sobů, sešlapem a zvýšenou konkurencí s vyššími cévnatými rostlinami. Lišejníky mají vysoké albedo a vytváří spolu s mechorosty husté plošné pokrývky Arktidy. Jejich úbytek může snížit odraz krátkovlnného záření energie s potenciálním dopadem na mikroklima. Aartsma (2021) v následujícím desetiletí očekává nahrazení vegetace zakrslými dřevinami, podobně jak bylo pozorováno v kanadské Arktidě, kde od roku 1980 zmizela většina lišejníkových porostů. (Aartsma, 2021)

3.3 Arktická oscilace

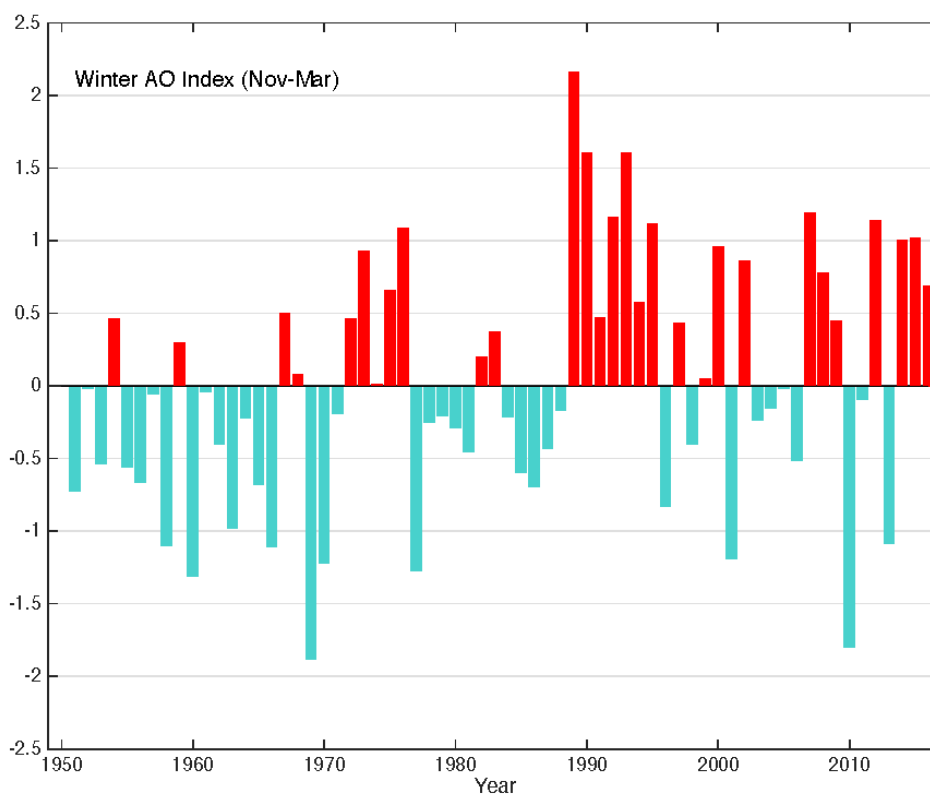
Arktická oscilace (AO) je fenomén odchylek tlaku vzduchu nad polárním kruhem. Převládající nízký tlak nad severním pólem způsobuje, že vítr vane východním směrem od západu. V zimním období má vítr v troposféře silnější účinek než v letním

období, a z tohoto důvodu AO ovlivňuje počasí ve středních šířkách intenzivněji než v zimním období. Změny v polárních tryskových prouděch mají největší vliv na počasí, protože jsou nejsilnějšími větry této cirkulace. Mají za následek distribuci teplot a srážek, a anomálie v tryskovém proudění se projevují výraznými výkyvy v počasí.

Arktická oscilace v pozitivní fázi je charakterizována nízkým tlakem, rovným prouděním a větší intenzitou pohánění tryskových proudů. Studený arktický vzduch je udržován uvnitř Arktidy a absence jeho úniku má za následek prezenci teplejšího klimatu v jižnějších šířkách. Naopak, negativní fáze AO je charakterizovaná vyšším tlakem nad Arktidou a zesláblým tryskovým prouděním, což umožňuje únik studeného arktického vzduchu směrem na jih a způsobuje chladnější počasí ve středních šířkách.

AO je důležitým atmosférickým cyklem Země, který má obvykle trvání několik týdnů až měsíců. Předpovědět tyto cykly lze obvykle s dvoutýdenním předstihem. Posouzení vlivu stratosférického polárního víru na AO umožňuje předpovědět průběh počasí z dlouhodobého hlediska a je úzce spojena s NAO, která ovlivňuje počasí především v Severním Atlantiku a Evropě. (Dutton, 2021)

Obr. 5: Pozitivní a negativní fáze AO v zimních měsících (zdroj: www.pmel.noaa.gov)



3.4 Severoatlantická oscilace (NAO)

Atlantický sektor atmosférických tlakových cyklů zahrnující celou oblast Arktidy a nejdůležitější klimatický index, který ovlivňuje počasí nad severním Atlantikem

v oblasti východního USA a západní Evropy je severoatlantická oscilace (NAO). Dipól nízkého tlaku je soustředěn nad Severním Atlantikem v oblasti mezi Grónskem a Islandem. Dipól vysokého tlaku se nachází v oblasti Azorských ostrovů. Index NAO je definován jako odchylka mezi těmito dvěma tlakovými oblastmi.

Pozitivní fáze NAO vede k silnějšímu západnímu proudění do západní Evropy v důsledku velkých tlakových rozdílů mezi Islandskou níží a Azorskou výší. V negativní fázi je tlakový rozdíl mezi oblastmi menší než obvykle, což vede k slabšímu západnímu proudění. Atlantský oceán v porovnání s Evropskou pevninou je v létě chladnější, což částečně zamezuje extrémním vlnám vysokých teplot. V zimě je oceán naopak teplejší a západní proudění přináší na kontinentální Evropu mírnější počasí. (Dutton, 2021)

4. Arktický oceán

Severní ledový oceán neboli Arktický oceán, je nejmenší ze světových oceánů, přičemž jeho proudy mají globální dosah. S převládající advekci, přivádí proudy z Atlantiku a Pacifiku vody s odlišnými vlastnostmi, které se vertikálně vrství podle hustoty. Významný vliv na oceán má sezónní zamrzání a tání vody, při kterém se zvyšuje, nebo snižuje salinita vody, což má vliv na globální termohalinní cirkulaci. Významný je přítok vod z Atlantického a Tichého oceánu, a také říční přítoky z kontinentálních mas, které přispívají k advekci a ovlivňují povrchovou ledovou pokrývku. Arktický oceán je specifický svou polohou v polární oblasti, kdy během polární noci může teplota vzduchu klesnout pod $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ochlazení je přitom omezeno na povrchovou vrstvu, což umožňuje vznik mořského ledu. V létě během polárního dne je oceán vystavován nepřetržitému krátkovlnnému záření, ale podstatná část přicházejícího záření je odražena zpět povrchem ledové pokrývky, čímž se udržuje chladnější léto. Přibližně polovina rozlohy oceánu je tvořena šelfy, geograficky rozdělené na Bartensovo, Karské, Laptěvské, Východosibiřské, Beaufortovo, Lincolnovo, Čukotské moře a další. Hlubokou část oceánu tvoří dvě hlavní pánve – Euroasijskou a Americkou pánev, které jsou od sebe odděleny Lomonosovovým hřbetem. (Rudels a Carmack, 2022)

4.1 Fyzikální a chemické charakteristiky

Teplota

Sluneční záření proniká do hloubky oceánu menší než 1000 m. Nejteplejší povrchová voda je charakteristická menší hustotou, v prvních 100-200 metrech se nachází smíšená vrstva vody a pod touto vrstvou dochází k náhlému poklesu teplot. Pod termoklinou zůstává teplota oceánu konstantní, pohybuje se kolem $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ a nedochází zde k výrazným teplotním změnám. V polárních oblastech není efekt termokliny tak výrazný a teploty se pohybují na nízké úrovni. (Webb, n.d.) Navzdory tomu, každá ze čtyř hlubokých pánví Arktického oceánu má odlišnou charakteristiku, všechny jsou si podobné vertikální stratifikaci, kdy se teplota a salinita zvyšují, dokud není dosaženo silné homogenní spodní vrstvy. (Rudels a Carmack, 2022)

Zvýšení teploty má zvyšující vliv na bazální metabolismus u heterotrofních organismů a způsobuje zvýšené nároky na aktivity spojené s procesem shánění a trávení potravy a vyhýbání se predátorům. Tyto energeticky náročné procesy snižují prostor pro růst a reprodukci. (Doney et al., 2011)

Povrchová teplota moře

Oceány absorbují až 90 % tepla z atmosféry, přičemž nejvýraznější nárůst teploty je pozorován na povrchu. Povrchová teplota moře je výrazně ovlivněna mořským ledem, tající vodou, dlouhodobým odtokem a tepelnou stratifikací hlubokých proudů. Průměrná roční povrchová teplota moří Arktického oceánu je přibližně 1,5 °C. V zimním období dosahuje nejvyšší teploty Norské moře, přesahující 6 °C, zatímco v přilehlých částech Ruska a Kanady, se teploty pohybují v rozmezí od 0,2 do 3 °C. Čukotské moře má průměrnou povrchovou teplotu 0,86 °C. Trend oteplování Arktického oceánu je rychlost přibližně 0,036 °C až 0,03 °C/rok. Severní část Barentsova moře vykazuje mírný ochlazovací trend v létě, což může být důsledkem jeho salinity, hustoty a hloubky, zatímco pobřeží v jižní části vykazuje trend oteplování. Studie naznačují vysokou variabilitu ročních a sezónních teplot napříč Arktickým oceánem. Dalším zjištěním je vysoká korelace mezi povrchovou teplotou moře, vzduchu a vodní párou, zejména v oblastech bez mořského ledu. Tato korelace může mít významný dopad na atmosférickou cirkulaci a může napomáhat vzniku polárních cyklonů. (Carvalho a Wang, 2020)

4.2 Mořský led

Abychom mohli správně charakterizovat stáří a tloušťku mořského ledu, je klíčové pochopit, jakým způsobem je možné mořský led klasifikovat:

- Nový led je technické označení definováno tloušťkou menší než 10 cm
- Mladý led je definovaný tloušťkou 10 až 30 cm a větší hustotou
- Led prvního roku bývá tlustší než 30 cm a v létě zcela roztaje
- Víceletý led charakterizovaný tloušťkou od 2 do 4 m

Podmínkou tvorby mořského ledu je na rozdíl od ledovců a jezerního ledu přítomnost slané vody a teplota oceánu ve svrchní vrstvě 100 až 150 metrů -1,8 °C. V zimě pokračuje růst ledu prvního roku. Pokud jsou podmínky na jaře a v létě příliš teplé, nebo pokud se nevytvořila dostatečná vrstva, led roztaje. Pokud teplotní podmínky nejsou tak extrémní, nebo se vytvořila dostatečně mocná vrstva, led přetrvá do následující zimy. Víceletý led má odlišné vlastnosti, je hustší a v důsledku letního tání obsahuje mnohem méně solanky a více vzduchových kapes.

Od roku 1995 docházelo k podstatnému úbytku víceletého ledu, což bylo spojováno s přetrvávající pozitivní arktickou oscilací, která je charakteristická silnějšími větry, které mohou vést k odvodu víceletého ledu z oblasti Beaufortova moře skrze Framův průliv východně do Grónska. Další významný pokles nastal v letech 2005-2007, opět způsobený vzorem pohybu ledu, který byl transportovaný směrem k Framovu průlivu. Od roku 2007 vykazuje víceletý led kolísání v rozsahu, ale z dlouhodobého hlediska se trend ústupu ledu nezvrátil. Podle převládajících proudů a větrů je mořský led

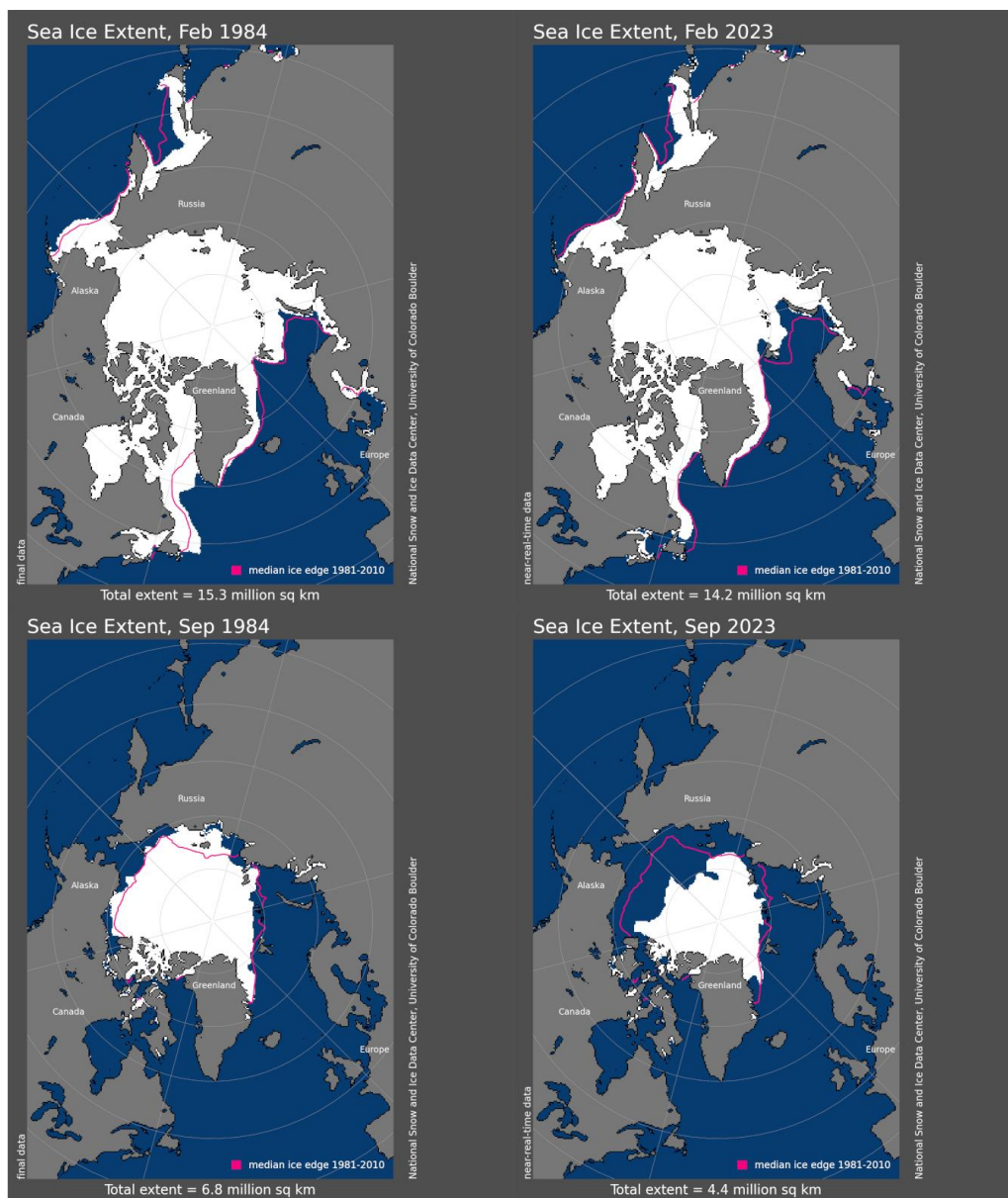
unášen přes celou Arktidu a skrze Framův průliv opouští Arktický oceán. Čím tenčí je vrstva ledu, tím rychlejší je tempo transportu. (NSIDC n.d.)

4.2.1 Rozsah a tloušťka mořského ledu

Zmrzlá oceánská voda, která cyklicky taje a mrzne můžeme charakterizovat jako mořský led. Plocha ledu je po většinu roku pokrytá sněhovou pokrývkou, což zvyšuje efekt albeda. Rozsah, tloušťka a přítomnost průtahů v mořském ledu má vliv na atmosférickou vlhkost, výměnu tepla mezi oceánem a atmosférou a narušení těchto procesů by mohlo vést k výskytu intenzivních srážek s negativním dopadem.

Cyklus zamrznání a tání ovlivňuje oceánské proudění a klimatické vzorce. Pro mořské savce je led nezbytným místem pro odpočinek, rozmnožování, výchovu mláďat a hledání potravy. Předčasná separace potomstva od matky, způsobena nedostatečnou vrstvou ledu nebo jeho ztrátou, vede k vysoké úmrtnosti mláďat. Sladká voda uvolněná z ledu je bohatá na fytoplankton a řasy, které obohacují vodu živinami a zvyšují její trofickou úroveň. Výzkumem národního úřadu pro letectví a astronautiku (NASA), byla zjištěna vysoká produkční úroveň mikroskopických organismů pod vrstvou ledu, která dělá z Arktidy každoročně jednu z nejvíce na biodiverzitu bohatých oblastí světa. (NDSIC)

Obr. 6: Únorová a zářijová rozloha ledu v Arktidě. Porovnání let 1984 a 2023 (vlastní zpracování, data: ncei.noaa.gov)



4.2.2 Salinita

Arktický oceán je charakterizován vrstvou studené povrchové vody, která je oddělena studenou haloklinou, a teplejší, slanější vrstvou hlubokých vod pocházejících z Atlantického oceánu. Vertikálnímu míchání zabráňuje stratifikace, která působí jako ochranná bariéra mořského ledu před vertikální výměnou tepla, živin a CO₂ z Atlantiku. Zvýšený přítok vod z Atlantického oceánu zvyšuje salinitu povrchové vrstvy, oslabuje haloklinu a zvyšuje teplotu Arktického oceánu. Tento proces nazývaný atlantifikace oceánu způsobuje změny ve stratifikaci oceánských vrstev a ovlivňuje

klimatické podmínky v oblasti. Pro předpověď budoucího vývoje a hlubšího pochopení působení těchto procesů, je potřeba dalších výzkumů. (Mulwijk et al., 2023)

Absorpce velkého množství CO₂ antropogenního původu vede ke snižování pH vody. Acidifikace oceánu má negativní vliv na organismy, které asimilují svoje tělesné schránky prostřednictvím kalcifikace. Z pozorování a modelových simulací byly zjištěny negativní změny v chování, reprodukci a celkovém přežívání některých kalcifikujících organismů, ale dopady těchto změn se liší v závislosti na jejich morfologii a lokalitě. Ztráta těchto organismů by měla vliv na biodiverzitu, stabilitu a produkci oceánu. (Cornwall et al., 2014)

Do roku 2100 Cornwall et al. (2014) předpokládá pokles pH o 0.35 jednotek v globálním celosvětovém průměru kyselosti oceánu. Arktický oceán má přirozeně nízké pH a v nadcházejících desetiletích je očekávána závažná změna související s okyselením vod.

4.3. Oceánská cirkulace

Dowling a Showman (2007) popisují oceánskou a atmosférickou cirkulaci založenou na stejných dynamických zákonech jako rozdílnou v mnoha faktorech. Prvním z nich je omezení oceánu kontinentálním uspořádáním. Na rozdíl od atmosférické cirkulace, kde převládá východo-západní proudění nad pevninou, je v oceánu možné takové proudění bez omezení pouze v Jižním oceánu, kde probíhá silné proudění kolem Antarktidy, které bylo popsáno v předcházející kapitole. Druhý faktor je způsob ohřívání vody, kdy sluneční světlo proniká na povrch Země a ohřívá atmosféru odspodu, zatímco oceán je ohříván od povrchové vrstvy směrem do hloubky. V obou systémech vzniká rozdíl ve vertikální konvekci. Třetím faktorem je pohánění cirkulace v atmosféře, založené na horizontálních rozdílech v hustotě, které v oceánu hraje důležitou roli větrné rozpohybování povrchu vody. Rotace Země je dalším faktorem, který má vliv na oba systémy, větrem rozpohybovaná voda nevytváří proudy po směru větru, ale pod vlivem Coriolisovy síly. Unikátním jevem napomáhajícím udržení nízké teploty v hloubkách všech oceánů je vertikální převrácení, tedy termohalinní cirkulace. V blízkosti pólů se povrchová voda ochladí na úroveň, která svou hustotou přesahuje vodu ve velkých hloubkách. Tento jev je nejvýraznější v Labradorském moři a v blízkosti Antarktidy. Veškerá hlubokomořská voda, včetně vody v rovníkové oblasti, pochází z oblasti pólu a uchovává si nízkou teplotu.

Povrchová cirkulace, poháněná větrem, je dynamická. Vítr vytváří na severní a jižní hemisféře proudy, které se setkávají v zónách konvergence a divergence, jež jsou klíčové pro transport živin. Hlubokomořská cirkulace, která je pomalá, je řízena hustotou vody, podmíněnou teplotou a salinitou. Má vliv na celý oceán, ale vytváří velmi slabé proudění. Ve specifických oblastech, jako je severní Atlantik se povrchové vody ochlazují a zamrzají, což vede ke zvýšení salinity a následnému poklesu vody do hlubších vrstev oceánu. Pokud bude v důsledku globálního oteplování docházet k

dalšímu tání ledu, ovlivní to přítok sladké vody do oceánu, sníží se hustota povrchové vody a mohlo by dojít k narušení vzniku hlubokomořských proudů. Oceánská cirkulace je proto citlivá na přítok sladké vody. Menší absorpce uhlíku a tepla oceánem by mohla zesílit globální oteplování a urychlit jeho dopady. (Ocean Climate, n.d.)

4.4 Koncentrace živin v oceánu

Vysoký přítok sladké vody a rozpuštěný mořský led snižují koncentraci slané vody ve svrchní vrstvě a amplifikují stratifikaci. V místech, kde proniká světlo, se tvoří vodní květy fytoplanktonu, které dodávají energii do vyšších trofických úrovní s výraznou sezónní rozdílností. Barentsovo, Čukotské a Beringovo moře, tedy okrajové arktické moře, jsou typické vysokou primární produkcí a můžeme je považovat za jedny z nejproduktivnějších mořských ekosystémů na Zemi. Z vysokého podílu živin profituje mnoho druhů mořských ptáků, ryb a savců, které v těchto místech vytvářejí shluky. (CAFF, 2013)

Dusík

Předpokládanými zdroji dusíku, který je limitujícím faktorem, jsou přílivy z okolních oceánů, z řek a prostřednictvím pobřežní půdní eroze. Čistá primární produkce v oceánu je podporována efektivní recyklací dusíku pocházejícího z pevniny, ke které z části přispívá zooplankton. (Terhaar, 2021)

Koncentrace živin v oceánu se odvíjí od vzdálenosti od pevniny a charakteristik oceánské proudění. Proudění živin z Tichého oceánu převažují nad přísunem živin atlantickým prouděním a na základě chemických analýz je možná determinace původu živin v oceánu. (NOAA, 2022)

Fosfor

Fosfor představuje klíčový makronutrient v mořských ekosystémech pro svoji využitelnost jako stavební prvek organismů na buněčné úrovni, které ho využívají ve formě anorganického fosfátu. Na rozdíl od dusíku, který lze získávat z atmosféry musí být fosfor doplňován z externích zdrojů ve formě atmosférického prachu, říčního odtoku a podzemních vod. V důsledku vysoké spotřeby fotosyntetizujícími organismy se fosfát vyskytuje ve svrchní vrstvě oceánu v nižších koncentracích. (Repeta, 2017)

5. Mořské ekosystémy

Snížení koncentrace podpovrchového kyslíku, zesílení stratifikace vodního sloupce, změny v přísunu živin a acidifikace oceánu jsou procesy, které úzce souvisí se zvyšujícím se atmosférickým CO₂ a globální změnou klimatu, které mají přímé dopady na mořské ekosystémy. Tyto procesy mohou vést nejen k formování nových ekosystémů s odlišným druhovým složením, ale také k posunům na úrovni populace, změnám v migračních trasách a interakcím mezi druhy. K narušení interakcí mezi druhy dochází v důsledku asynchronní fenologie, kdy se predátor a kořist kvůli rozdílům v časování biologických událostí nemusí setkat. Tyto posuny mění energetický tok mezi trofickými úrovněmi, od primárních producentů až po vyšší trofické úrovně, jako jsou ryby, mořští ptáci a savci, ale i směrem z vyšších trofických úrovní k nižší. Kaskádový efekt navíc může indukovat změny v biogeochemických cyklech ekosystému prostřednictvím nahrazení klíčových funkčních skupin, jako jsou kalcifikující organismy, což vede k narušení ekosystémových funkcí i při stabilní produktivitě a biodiverzitě. (Doney, et al. 2012)

Chemické, biologické a fyzikální charakteristiky jsou ohroženy změnami, které jsou spojené se změnou klimatu. Dochází k proměnám v distribuci a hojnosti klíčových druhů, kaskádovým efektům na intraspecifické úrovni v struktuře potravních sítí. Trend krátkodobých rozsahů letního mořského ledu, který je pozorovatelný ve všech úrovních ekosystému, je znepokojivým příkladem těchto změn. (CAFF, 2013)

5.1 Charakteristika

Arktické mořské vody jsou rozděleny na tichomořskou a atlantickou zónu, přičemž každá z nich má svou vlastní evoluční historii. V důsledku toho jsou mnohé rody reprezentovány různými druhy v obou oceánských pánvích. Potravní sítě v těchto zónách jsou diferenciované a zároveň zůstávají málo prozkoumané a pochopené. Polární organismy jsou charakteristické svou adaptabilitou na měnící se prostředí, ať už ve vodě nebo na ledu, a jsou zvláště citlivé na klimatické změny. Tyto změny, včetně výkyvů teplot, mohou významně ovlivňovat rozsah mořského ledu. (Smetacek a Nicol, 2005)

5.2 Biodiverzita

Podle srovnání biodiverzity mořských ekosystémů, Arktida a Antarktida hostí přibližně 7 600 mořských druhů. Klíčovým rozdílem je počet jedinců specifických druhů. V Antarktidě byly podmínky pro disperzi do otevřených vod Jižního oceánu a na ledové pevniny příznivější, což vedlo k vyššímu počtu jedinců ve srovnání s Arktidou. Tento rozdíl lze částečně vysvětlit pleistocenní historií ledových a

meziledových období, která ovlivnila distribuci druhů. Dále se biodiverzita mění v závislosti na zeměpisné šířce a směrem k vysoké Arktidě dochází k jejímu poklesu.

Mořské taxony ryb v Beringově moři jsou bohaté na druhové složení. Beringův průliv a východní Sibiř se vyznačují bohatstvím rostlin, suchozemských bezobratlých, pobřežních ptáků a savců pravděpodobně z důvodu existence nezaledněných refugií během čtvrtohor a izolaci oblasti na východě a západě průlivu během meziledových období s vyšší hladinou moře. U bentických bezobratlých je nejvyšší diverzita zaznamenána v oblasti Barentsova a Karského moře, avšak tato pozorování mohou být ovlivněna častým vzorkováním těchto oblastí. Celkem 378 druhů ryb představuje 1,3 % celosvětového počtu druhů, přičemž šestina z nich jsou vysoce specializované arktické nebo endemické druhy. Při započtení subarktických moří se celkový počet druhů zvyšuje na více než 600. Hodnocení stupně ohrožení těchto druhů podle kritérií IUCN (Mezinárodní unie pro ochranu přírody) je z kvůli nedostatku dat často nedostačující. (CAFF, 2013)

Podle Arctic Council (2009) a cirkumpolárního monitorovacího programu pro biodiverzitu (CBMP) jsou považované za klíčové druhy pro fungování mořského ekosystému následující druhy:

Mořští savci:

- Běluha (*Delphinapterus leucas*)
- Narval (*Monodon monoceros*)
- Velryba grónská (*Balaena mysticetus*)
- Tuleň pacifický (*Phoca largha*)
- Tuleň kroužkovaný (*Pusa hispida*)
- Tuleň vousatý (*Erignathus barbatus*)
- Tuleň páskovaný (*Histiophoca fasciata*)
- Tuleň grónský (*Pagophilus groenlandicus*)
- Tuleň kápový (*Cystophora cristata*)
- Mrož lední (*Odobenus rosmarus*)
- Lední medvěd (*Ursus maritimus*)

Mořští ptáci:

- Racek šedý (*Larus hyperboreus*)
- Racek sněžní (*Pagophila eburnea*)
- Alkounek nejmenší (*Aethia pusilla*)
- Alkoun malý (*Alle alle*)

- Alkoun úzkozobý (*Uria aalge*)
- Alkoun tlustozobý (*Uria lomvia*)
- Racek tříprstý (*Rissa tridactyla*)
- Kajka mořská (*Somateria mollissima*)

Mořské ryby:

- Huňáček severní (*Mallotus villosus*)
- Treska polární (*Boreogadus saida*)
- Platýs černý (*Reinhardtius hippoglossoides*)

V průběhu dvou milionů let působily silné selekční tlaky extrémního prostředí Arktidy na organismy, které se musely adaptovat na drsné klimatické podmínky. Evoluce vedla k výběru těch nejodolnějších organismů a specialistů, kteří jsou v současnosti ohroženi změnou klimatu a posuny areálu rozšíření v časovém horizontu, na který nebyli připraveni. Mezi důvody ohrožení druhů, popsány v předchozích kapitolách, patří zvýšení průměrné zimní teploty, zimní deště způsobující vznik ledových krust, změny ve struktuře populací, změny v rozsahu mořského ledu a další. (CAFF, 2013)

5.3 Mořští savci

Všechny mořské savce jsou pro region Arktidy endemické a zaujímají samostatnou ekologickou niku spojenou s úzkou afiliací k mořskému ledu. Lze je považovat za druhy významné a výjimečné, nejen z hlediska globální diverzity, ale i z hlediska kulturní hodnoty. Sezónní roční led je důležitým prostředím pro porod a výchovu potomků ploutvonožců a slouží jako podklad pro sezónní línání srsti; tento led využívají celoročně, pokud je k dispozici. Lední medvědi využívají led pro lov tuleňů a samice jej používají jako platformu pro výstavbu doupěte. Pro velryby poskytuje úkryt před bouřemi a útočiště pro mláďata. V otevřené vodě poskytuje led ochranu před predátory a konkurenty.

Esenciální ze všech zmíněných forem ledu je driftový led, který využívají savce jako habitat. Charakteristickým rysem savců je dlouhověkost a cyklická životní strategie. Disponují omezeným potenciálem pro nalézání nových habitatů a adaptaci. Nelze se spoléhat pouze na behaviorální, fyziologickou a morfologickou plasticitu, i když je to nezbytně nutné vzhledem k očekávaným negativním dopadům spojeným se změnou klimatu. Navíc, mořské savce ohrožuje riziko kolizí s lodní dopravou, zvýšená expozice kontaminantům a potenciální riziko onemocnění. Aktualizovaná zpráva o stavu mořské biodiverzity vydaná organizací CAFF (Ochrana Arktické flóry a fauny) signalizuje pokles populací u tří klíčových druhů mořských savců, konkrétně ledních medvědů, narvalů a běluh. Celkové trendy u ostatních druhů zůstávají neznámé. (Kovacs et al., 2021)

Obr. 7: Trendy v početnosti arktických mořských savců, které jsou považovány za klíčové složky ekosystému v roce 2020 (www.oaarchive.arctic-council.org)

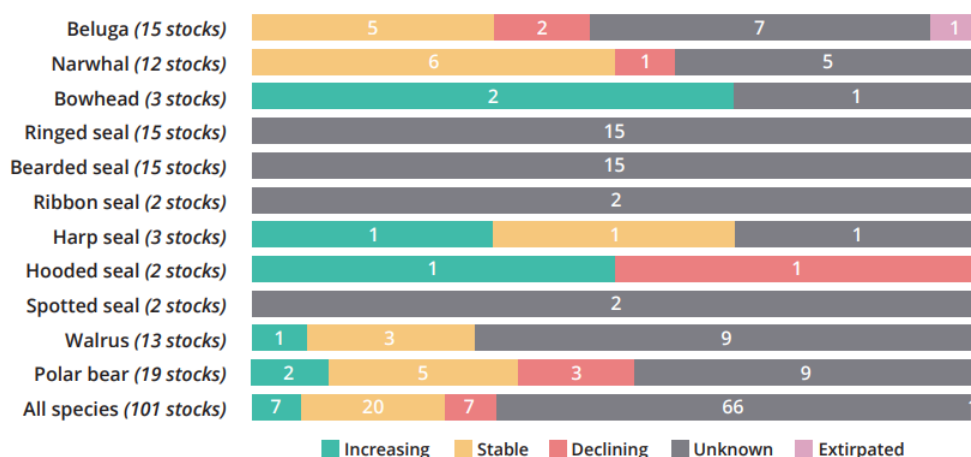


Figure 1. Marine mammal FEC trends 2020

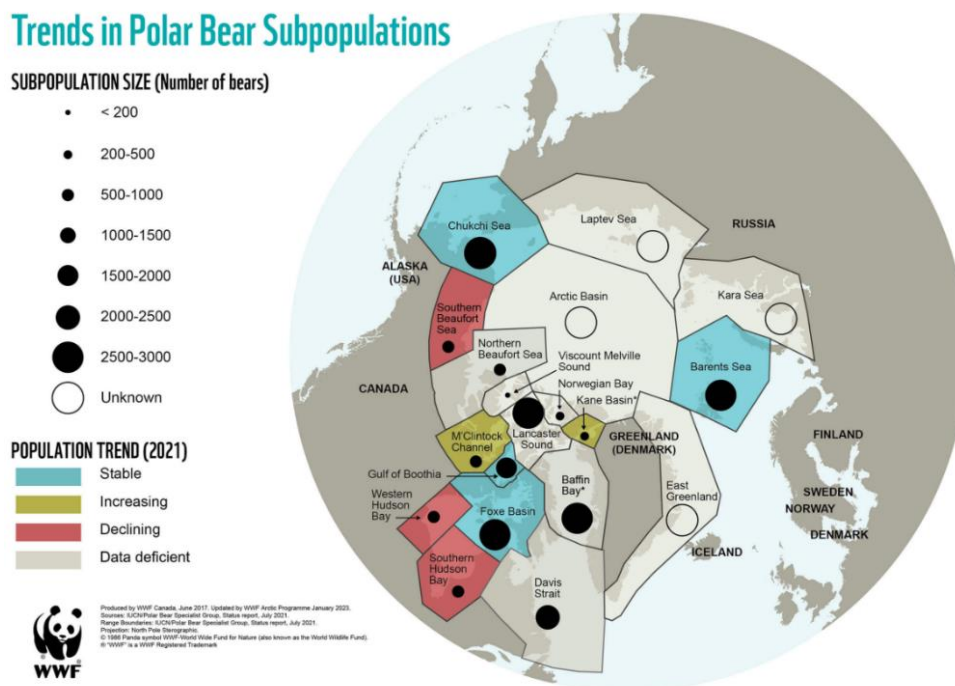
Lední medvěd (*Ursus arctos*)

V historii času evoluční proces umožnil vznik nového druhu, pocházejícího z medvěda hnědého (*Ursus arctos*), ledního medvěda (*Ursus maritimus*). Vysoká závislost na mořském ledu charakterizuje druh jako pagofilní. Lední medvědi obývají oblasti s výskytem ročního ledu v blízkosti pobřeží, kde je biologická produktivita nejvyšší. V krátkodobém horizontu mohou medvědi z globálního oteplování profitovat, protože silný víceletý led ustoupí a nahradí ho tenký jednoletý led, který je vhodnějším stanovištěm pro jejich primární zdroj obživy – tuleň. Lední medvědi jsou specialisti na lov tuleňů, a hlavní kořist představuje tuleň kroužkovaný (*Phoca hispida*) a tuleň vousatý (*Erignathus barbatus*). Jako příležitostní zdroj potravy využívají i tuleň grónské (*Pagophilus groenlandica*), běluhy (*Delphinapterus leucas*), narvaly (*Monodon monoceros*) a mrože (*Odobenus rosmarus*). Z dlouhodobého hlediska má ztráta víceletého ledu pro medvědy negativní dopad z důvodu vyšší energetické náročnosti při shánění potravy. Tuleň využívají dýchací otvory v ledu a při zvýšeném množství oblastí s otevřenou vodou se jejich přítomnost stává nepředvídatelnou. Jejich životní strategie spočívá v konzumaci tuku kořisti a asimilaci velkého množství tukových zásob. Po nasycení zbytky z kořisti opouštějí, a příležitost dostávají nedospělí medvědi, nebo jiné druhy. Pokud si samice nevytvoří dostatek tukových zásob, sníží se jejich tělesná kondice, která přímo koreluje s hmotností mláďat. V konečném důsledku se sníží podíl březích samic, nebo se sníží počet potomků ve vrhu. Tenčí led je také nestabilní a lehce podléhá větrné erozi, zároveň s tím musí lední medvědi vynaložit více pohybu při plavání a chůzi, s cílem udržet blízkost k požadované oblasti.

Studie na ledních medvědech v kanadské Arktidě odhalily podstatné změny ve velikosti těla a reprodukčního výkonu v důsledku změn v rozsahu ledové pokrývky. V západní části Hudsonova zálivu prokazatelně dochází ke zkracování doby krmení

medvědů na tuleních, a to konkrétně o 2,5 týdně méně, než před 30 lety. Lední medvědi projevují významnou behaviorální plasticitu, avšak ale přesto prognózy naznačují, že perspektiva udržitelné existence tohoto druhu se stává nejistou v případě úplného zániku mořského ledu. (Derocher et al., 2004)

Obr. 8: Trendy v početnosti subpopulací ledního medvěda (www.arcticwwf.org)



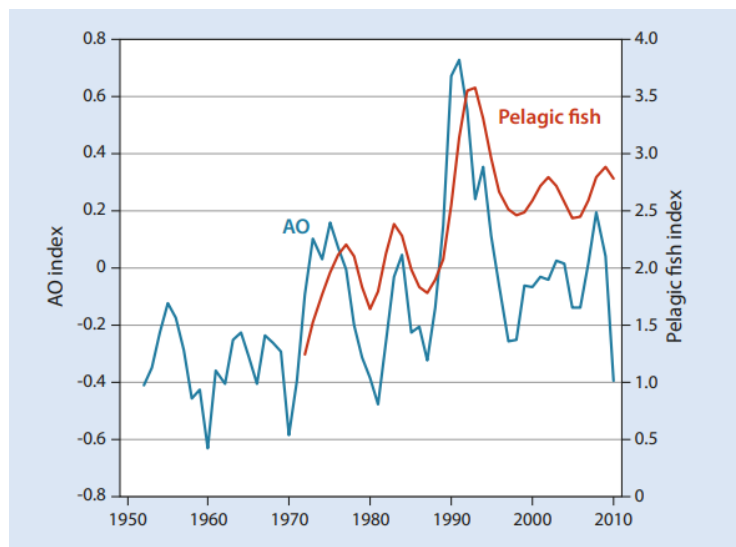
Celosvětový odhad populace ledních medvědů se pohybuje mezi 22 000 až 31 000 jedinci podle údajů Mezinárodního svazu ochrany přírody (IUCN). Rozsah těchto odhadů odráží variabilitu v dostupných datech. Lední medvědi byli klasifikováni do 19 subpopulací, přičemž 60-80 % všech ledních medvědů žije v Kanadě. Světový fond na ochranu přírody v Arktidě (Arctic WWF) varuje před budoucí ztrátou téměř veškerého arktického mořského ledu. Podle této prognózy by měly být poslední oblasti, kde by se měl udržet led, na okraji severovýchodní Kanady a severního Grónska. Dále předpokládá, že počet ledních medvědů do roku 2050 klesne o 30 %. (Arctic WWF, n.d.)

5.4 Mořské ryby

Arktické moře obývá přibližně 250 druhů mořských ryb. Pokud zahrneme i přilehlé oblasti, počet druhů stoupá na téměř 640. Jak bylo zmíněno, oblasti spojující Arktický oceán s Atlantickým a Tichým oceánem, spolu s ústím velkých arktických řek, jsou místy s nejvyšší biodiverzitou. Za arktické speciality lze považovat 63 druhů mořských ryb. Podle indexu trendů početnosti mořského života (ASTI) populace

mořských ryb zaznamenala růst mezi lety 1970 a 1990, po kterém následovala stabilizace. Tento trend naznačuje přímou provázanost mezi početností ryb a celkovým trendem ASTI, což poukazuje na důležitost těchto organismů v mořském ekosystému. (CAFF, 2013)

Obr. 9: Porovnání tříletých trendů pelagických ryb a Arktické oscilace (www.abds.is)



Zajímavé je také zjištění, že fluktuální desetileté cykly pelagických ryb výrazně korelují s velkoplošnými klimatickými oscilacemi. Tyto oscilace mohou mít zásadní vliv na teplotu oceánu a dostupnost potravy, což přímo ovlivňuje početnost a distribuci mořských ryb. (CAFF, 2013)

Subarktické boreální druhy, jako například tichomořská treska (*Gadus macrocephalus*) a treska pestrá (*Gadus chalcogrammus*), mohou z pokračujícího oteplování profitovat a pozitivně měnit svou distribuci a abundanci. Naopak, arktické druhy mohou být negativně ovlivněny zvýšenou konkurencí a konektivitou mezi populacemi. Globální stěhování boreálních druhů severně do vyšších zeměpisných šířek může představovat výzvu pro původní druhy Arktidy. V Barentsově moři, které se rychle otepluje, dochází ke změnám v prostorovém rozložení rybích společenstev. Podobné změny byly pozorovány v Beringově moři, kde severní proudění ovlivňuje složení druhů v Čukotském moři spolu s přínosem tichomořských planktonních organismů. (Levine et al., 2022)

Polární treska (*Boreogadus saida*)

Polární treska, také nazývaná arktická treska, je pelagický druh dominující v tichomořském arktickém ekosystému. Vyskytuje se v celé arktické pánvi i okolních okrajových mořích. Tento druh je významnou součástí potravinového řetězce, jako kořist bohatá na lipidy, poskytuje propojení mezi nižšími trofickými úrovněmi a rybožravými druhy. Pro více než 20 % mořských ptáků a více než 40 % mořských

savců představuje treska polární podstatnou součást potravy. Arktické potravní sítě čelí hrozbám v důsledku změn v transportu tepla, redukce mořského ledu a zvýšeného radiačního oteplování od slunce. Tyto změny mají potenciál zásadně ovlivnit distribuci a hojnost polární tresky. (Levine et al., 2022)

Podle Gorska et al. (2023) může nárůst v početnosti a vysoký predační potenciál atlantických ryb negativně ovlivnit přežití tresky polární, která je považována za druh s vysokou ekologickou a ekonomickou hodnotou v arktických vodách. Přítomnost a zvyšující se abundance tresky obecné (*Gadus morhua*) představuje značné ohrožení pro perzistenci polární tresky, což je způsobeno jejím vysokým predačním potenciálem a potravní konkurencí. Hydroakustický výzkum provedený v Kongsfjordenu na Špicberkách odhalil probíhající proces usazování atlantické tresky, při kterém došlo ke změně velikostní struktury ryb z unimodální distribuce na trimodální distribuci, naměřenou v roce 2022. Oproti roku 2013 na tomto místě došlo k poklesu podílu tresky polární z 80 % na 48,9 %.

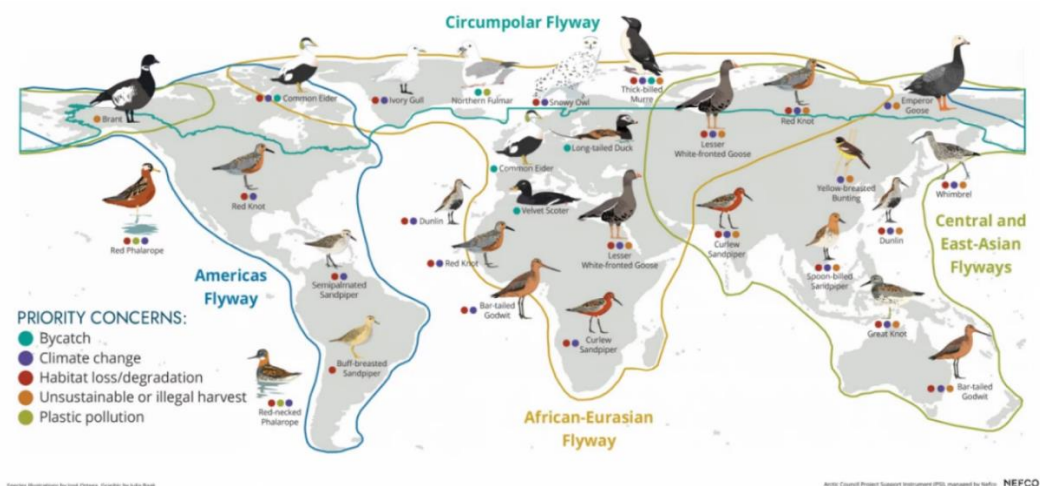
5.5 Mořští ptáci

V letním období hnízdní sezóny je Arktida domovem přibližně 200 druhů ptáků, mezi nimi dominují vodní ptáci, pobřežní ptáci a mořští ptáci. Unikátnost arktických mořských ptáků spočívá v jejich rozmanitosti, která je srovnatelná s rozmanitostí mořských ptáků v nižších zeměpisných šířkách a na severní hemisféře vykazují největší hnízdní hustotu. Charakteristická je také vysoká míra endemismu, což má významný vliv na arktické ekosystémy. Studium mořských ptáků odhalilo, že jejich populace jsou málokdy stabilní a klesající trendy mohou signalizovat spíše dopady z dlouhodobého zatížení mořského ekosystému, například způsobené nadměrným lovem velryb nebo jiných mořských zdrojů. Rozsáhlé migrační vzorce arktických ptáků implikují, že jejich populační dynamika může být ovlivněna událostmi, které se odehrávají i mimo Arktidu, a to jak pozitivně, tak i negativně. Globální klimatické změny vedou k fenologickým posunům a mají vliv na rozmnožovací cykly, migraci, zimoviště a průběh hnízdní sezony. (CAFF, 2013)

Po ukončení hnízdní sezony opouští Arktidu přibližně miliarda jedinců, aby migrovali do svých zimovišť, přičemž v tomto období dochází k vysoké úmrtnosti. Změny klimatu mohou vést ke změnám životní strategie druhů, z migrační na rezidentní strategii a naopak. Ke konci pliocenního období, v průběhu mírných klimatických podmínek došlo ke kolonizaci vysoké i nízké Arktidy, což vedlo k hybridizaci nebo izolaci druhů z Tichomoří. V současné době představuje fyzickou bariéru pro arktické pánve mořský led, a schopnost překonat tuto bariéru byla prokázána pouze u několik druhů mořských ptáků, ryb a mořských savců. Ztráta mořského ledu by vedla k zvýšené transarktické migraci mezi Atlantickým a Tichým oceánem. Dříve se předpokládalo, že omezení světla v průběhu polární noci představuje zásadní limit pro adaptační strategie živočichů, nicméně nedávné studie ukazují, že ptáci jsou schopni se efektivně vyrovnat i s velmi omezenými světelnými podmínkami. Druhy, které

potenciálně mohou zůstat aktivní během polární noci, zahrnují alkovitě, rackovitě, ale také některé druhy kachen, kormoránů, buřňáků, buřňáčků a potáplic. (Clairbaux et al., 2019)

Obr. 10: Mapa migračních tras polárních ptáků a příčiny jejich ohrožení (www.caff.is)



Alkoun malý (*Alle alle*)

Alkoun malý je druh mořského ptáka úzce spojený s Arktidou, jehož areál rozšíření zasahuje až do palearktické oblasti. Patří mezi nejpočetnější mořské ptáky a jeho rozmnožovací strategie zahrnuje koloniální hnízdění výhradně ve Vysoké Arktidě. Alkouni si pro svá hnízda vybírají skalní štěrbinu a svahy v blízkosti mořského pobřeží, kde mají přímý přístup k potravě. Největší hnízdní agregace tohoto druhu jsou pozorovány v Grónsku a na Špicberkách. Na rozdíl od jiných mořských ptáků atlantického sektoru Arktidy se alkouni malí živí převážně zooplanktonem. Transportem živin z moře na pevninu, kde hnízdí, prostřednictvím guána přispívají k obohacení živinově chudých suchozemských ekosystémů. V blízkosti hnízdních oblastí se tak tvoří rozmanité ekosystémy s bohatou primární produkcí a diverzitou vegetace, což přitahuje různé druhy býložravců, včetně hus, sobů, pižmoňů, a různých druhů bezobratlých. Kolonie alkounů malých rovněž ovlivňují sladkovodní ekosystémy a ve větší míře přispívají k vodní biomas, čímž podporují biodiverzitu v těchto oblastech. Předpokládá se, že vyhubení velryby grónské (*Baleana mysticetus*) v 17. století mělo výrazný pozitivní dopad na populace alkounů malých tím, že uvolnilo značné množství zooplanktonu, který by jinak byl zkonsumován těmito velrybami. Vzhledem k jejich životní strategii jsou alkouni často používáni jako modelový druh pro hodnocení a monitorování změn životního prostředí a klimatu. (Wojczulanis-Jakubas et al., 2022)

5.6 Plankton

Oceánské proudy, stratifikace vodního sloupce a sezónnost představují opakující se procesy, které umožňují předpovídat sezónní vzorce chování jednotlivých organismů a celých společenstev, přičemž výkyvy v těchto procesech signalizují potenciální změny. Planktonní společenstva mají omezenou schopnost aktivního pohybu ve vodním sloupci a některé druhy jsou přímo konzumovány v rámci vodního sloupce, zatímco jiné mají tendenci klesat k mořskému dnu, kde poskytují bohatý potravní zdroj pro zoobentos, nebo se jejich schránky ukládají jako biologické depozity uhlíku. Bakterioplankton hraje zásadní roli v cyklu rozkladu organického uhlíku v mořských ekosystémech a podílí se na mineralizaci uhlíku. Fytoplankton představuje hnací sílu pelagických potravních sítí, které udržují uhlík v epipelagické vrstvě vodního sloupce.

Klimatické změny mají zásadní vliv na dynamiku oceánské proudění a modifikují délku trvání mořského ledu ve prospěch otevřené vody. Tato otevřená voda je více náchylná k míchání vyvolanému větrem, což může vést ke změně struktury velikosti fytoplanktonu. Zvýšená akumulace sladké vody na povrchu oceánu může indukovat změny ve společenstvech původních arktických druhů planktonu, které nemusí být dostatečně adaptovány na fluktuace v salinitě. Sezónní variabilita pokryvu mořským ledem determinuje časování a složení planktonních organismů, na základě dostupnosti světla a trvání jarního květu, a také celkovou produktivitu a funkční stabilitu mořských ekosystémů. (CAFF, 2017)

Fytoplankton

Fytoplankton tvoří fundamentální pilíř arktických mořských sítí, fungujících jako primární zdroj potravy pro koryše a vyšší trofické úrovně, včetně ryb a selektivních mořských ptáků. Změny v potravním řetězci budou prvním indikačním signálem počínajících změn v mořském ekosystému. Většina druhů fytoplanktonu v Arktidě má panarktický původ, což je výsledkem dlouhodobého transportu prostřednictvím arktických mořských proudů, které udržují tyto populace. Dalšími vstupními bránami, kterými fytoplankton proniká do arktických vod, jsou Barentsovo moře a Beringův průliv. (CAFF, 2017)

Zooplankton

Největší podíl zooplanktonu je v Arktidě zastoupen koryši z řádu klanonožců (*Copepoda*). Jsou nezbytným stavebním kamenem v potravinovém řetězci, poskytují nutričně bohatý zdroj esenciálních lipidů pro mnoho druhů ryb, vybrané mořské ptáky a plejtvákovce (*Cetacea*). Celkově se v Arktidě vyskytuje přibližně 350 druhů zooplanktonu, což reflektuje vysokou biodiverzitu a adaptabilitu na náročné podmínky. Důležitou kořist pro mořské obratlovce představuje kril, který se převážně vyskytuje v Beringově a Barentsově moři a v oblastech s vyšší produktivitou, spojenou s velkým přítokem říční vody. (CAFF, 2017)

Klanonožci (Copepoda)

Klanonožci rodu *Calanus* jsou dominantní klíčovou složkou mořských ekosystémů, přesahující nejen svou biomasou, ale i významem v potravním řetězci a biogeochemických cyklech. Druhy *Calanus glacialis* a *Calanus hyperboreus* jsou původní složky Arktického společenstva a jsou přizpůsobené výhradně arktickým podmínkám. K celkovému vzrůstu biomasy tohoto rodu v Arktidě přispěl nedávný distribuční posun menšího a nutričně méně výhodného druhu *Calanus finmarchicus* z atlantických vod. Tento trend může vést k dominanci menšího boreálního druhu nad většími a nutričně cennějšími arktickými druhy. Snížení velikosti lipidového zdroje pro planktonní organismy a vyšší predátory má potenciál ovlivnit potravní strukturu mořských ptáků alkounů malých, kteří se zaměřují specificky na větší druhy klanonožců *Calanus*. Ve Framském průlivu dochází k pozorované transformaci, která vytváří vhodné podmínky pro růst a rozmnožování *C. finmarchicus*, a to především s ústupem sezónního ledu a přítoku teplé vody do regionu. Životní cyklus těchto klanonožců zahrnuje přezimování ve stadiu diapauzy, kdy jsou lipidové zásoby klíčové pro zajištění energetického přísunu. Kritickým faktorem je správné načasování období rozmnožování tak, aby bylo v souladu s květem fytoplanktonu, který je závislý na tání mořského ledu. Předčasné rozmnožování může vést k nedostatku potravy pro larvální stadia, zatímco pozdní tření může způsobit nedostatečné vytvoření lipidových zásob. To může negativně ovlivnit populaci polární tresky (*Boreogadus saida*), jejíž mladá vývojová stadia silně preferují konzumaci *C. glacialis*, a naopak, boreální druhy jako treska obecná (*Gadus morhua*), makrela obecná (*Scomber scombrus*) a huňáček severní (*Mallotus villosus*) preferují konzumaci *C. finmarchicus*, který je v současnosti na vzestupu. (Tarling, et al., 2022)

6. Terestrické ekosystémy

V reakci na globální ochlazení byly zalesněné polární oblasti v pozdním pliocénu nahrazeny tundrou, která se postupem času rozšířila podél celého severního polárního kruhu. Současná arktická tundra je výsledkem dlouhodobého historického vývoje a klimatických změn. Zajímavostí arktických biotopů je četná přítomnost polyploidních cévnatých rostlin, které svědčí o opakovaných epizodách fragmentace populace spojených s cyklickým střídáním glaciálních a interglaciálních období. Vzhledem ke geografické poloze terestrické bioty existuje v polárních regionech jen velmi omezený prostor pro translokaci druhů. (CAFF, 2013)

6.1 Charakteristika

Na rozsáhlé suchozemské ploše, která zaujímá přibližně 7 milionů kilometrů čtverečních, je polovina území pokryta vegetací charakteristickou pro oblast tundry. Zbývající část území se skládá z ledu, holé půdy a sladkovodních ekosystémů. Vegetační produkce tundry vykazuje výrazný latitudinální gradient, kde primární produkce klesá od jižnějších oblastí nízké Arktidy směrem k odlehlým vysokým arktickým ostrovům. (Aronsson et al., 2021)

Charakteristické jsou změny v distribuci druhů, kolísání v početnosti a dynamický výskyt metapopulací. Biologické aktivity se mohou odehrávat na různých lokalitách v závislosti na sezóně a potřebách organismů. Tyto změny v distribuci jsou důsledkem environmentálních faktorů, včetně dostupnosti potravy, přítomnosti predátorů, lidské aktivity, klimatických podmínek a mění se v závislosti na potřebách organismů. (CAFF, 2013)

6.2 Biodiverzita

Proces transformace z lesního pokryvu na tundrový ekosystém probíhal během posledních tří milionů let. V průběhu pleistocénu docházelo k vymírání druhů, přežívání v glaciálních refugiích, posunům v areálech rozšíření a evoluci *in situ*. Při přechodu z pleistocénu do holocénu měly změny v klimatických vzorcích také vliv na složení tundrové vegetace. S rostoucími teplotami a táním ledové pokrývky se měnilo graminoidní společenstvo na vlhčí typ vegetace, který podporoval vznik rašelinišť a tundrových keřů a způsobil vyhynutí několika druhů býložravců. V důsledku klimatických změn nedocházelo na prostorové škále k trvalé specializaci, ale k diverzifikaci druhů, které přežily izolovaně v refugiích. Oblast Beringie a přilehlé části Sibíře představovaly významná historická útočiště. Tato teorie je podpořena fylogenetickým výzkumem Weidera a Hobæka (2000), který identifikoval pokles vnitrodruhové biodiverzity a genetického polymorfismu ve vyšších zeměpisných šířkách, což bylo nepochybně ovlivněno pleistocenními ledovými cykly. Izolovanost a

extrémní podmínky naopak podnítli adaptivní vlastnosti, což dokazuje, že arktické organismy jsou schopny z hlediska evoluční historie dlouhodobé adaptace a vyvíjení strategií. Posledních 10 000 let bylo charakteristické stabilními klimatickými podmínkami, ale při současných environmentálních změnách budou dané adaptivní vlastnosti a strategie pro druhy klíčové. (Weider a Hobæk; 2000CAFF, 2013)

Savci s širším cirkumpolárním rozšířením a specializací na arktické prostředí zahrnují druhy jako polární liška (*Vulpes lagopus*), polární zajíc (*Lepus arcticus*), pižmoň (*Ovibos moschatus*) a některé druhy lumíků (*Dicrostonyx spp.*). Mezi druhy s omezeným výskytem areálu, obývající převážně arktické ostrovy, patří aljašský zajíc (*Lepus othus*), aljašský svišť (*Marmota broweri*) a několik specifických druhů lumíku. Tundrový rejsek (*Sorex tundrensis*), norský lumík (*Lemmus lemmus*), vlk (*Canis lupus*), hnědý medvěd (*Ursus arctos*) a rosomák (*Gulo gulo*) jsou příkladem ekotonních druhů s vazbami na historická glaciální refugia. Liška obecná (*Vulpes vulpes*) je považována za relativně nového kolonizátora arktických oblastí holocenní éry a bude podrobněji rozebrána v následující sekci. (CAFF, 2013)

6.3 Terestriční savci

Atlantická a Arktická oscilace ovlivňují demografické vzorce savců a produktivitu rostlin prostřednictvím sezónních vzorů počasí. Extrémní klimatické jevy mohou způsobit teplejší zimy, četnou frekvenci požárů, mrznoucí déšť a námrazy. Pokud začne produkce vegetace příliš brzy, samice sobů a jiných býložravců mohou přijít o cenné zdroje živin v čase gravidity. Zatím není známo, zda si býložravci dokážou přizpůsobit migrační a reprodukční načasování, kde se jeví být problematická zejména variabilita v počasí a žádný univerzální vzorec chování nemusí být výhodný. Rody sobů *Dolphin* – *Union* každoročně překračují několik desítek kilometrů mořského ledu, aby se dostali na svá zimoviště na pevnině. Zvýšené teploty brání v tvorbě ledové pokrývky, posouvají čas migrace a nedostatečná vrstva ledu zvyšuje riziko úmrtí při pádu. Arktické býložravce obývají většinu dostupných oblastí vysoké a nízké Arktidy, a předpoklad další expanze je omezen mezidruhovou konkurencí a migračními bariérami, což značně definuje areál jejich výskytu. Naopak probíhající expanze boreálních druhů směrem na sever může potlačovat původní populace a snižovat nosnou kapacitu prostředí. Populace medvěda hnědého může zaznamenat růst z důvodu nabídky nových ekologických nik a teplejším subarktickým podmínkám. Je nevyhnutné zdůraznit nedostatek dat týkajících se demografických a populačních trendů klíčových druhů, zejména kvůli logistickým překážkám v odlehlých oblastech a vysoké finanční náročnosti. Absence expanze u arktických býložravců může být primárně způsobena tím, že tyto druhy již obsadily většinu dostupných regionů, jsou omezeny nepřekonatelnými bariérami, nebo jejich rozšíření je limitováno konkurencí s příbuznými druhy. (CAFF, 2013)

Liška polární (*Vulpes lagopus*)

Pravděpodobně byla liška polární pionýrským savcem, který po skončení doby ledové kolonizoval Švédsko a Finsko. V současnosti má cirkumpolární rozšíření a vyskytuje se na Aljašce, v Kanadě, Grónsku, na Islandu, v Rusku a ve Skandinávii. Charakteristické jsou zejména dvě různé potravní strategie, založené na tom, zda se populace vyskytuje ve vnitrozemí nebo při pobřeží. Vnitrozemské populace jsou potravně závislé na lovu lumíku (*Lemmus spp.*) a hrabošů (*Microtus spp.*). Typické jsou pulzy rozmnožování a hojnosti těchto hlodavců, které se cyklicky opakují každých 3-5 let a po nich následují prudké fluktuace. Početnost populací polárních lišek také koreluje s počty lumíků s přibližně ročním zpožděním. Pobřežní populace se živí převážně mořským ptactvem, kadávery velkých savců, rybami a jinými mořskými zdroji, které jsou dostupné. Odhaduje se, že klimatické změny ovlivní polární lišky komplexním způsobem. Největší hrozbu představuje ztráta jejich přirozeného habitatu – tundry, která se klimatickými změnami transformuje na boreální společenstvo lesů, které je pro polární lišky nevhodné, zatímco lišky obecné (*Vulpes vulpes*) budou z rozšířeného areálu profitovat. Expanze lišky obecné představuje potravní konkurenci a hrozbu predace pro mláďata, ale i dospělé jedince. Populace polárních lišek obývajících pobřežní regiony mohou být dotčeny snížením počtu polárních medvědů, kteří po sobě zanechávají tuleně kroužkové, které lišky využívají jako alternativní, na tuk bohatý, zdroj potravy. Specifické populace v Norsku, Finsku a Švédsku jsou považovány za kriticky ohrožené. (IUCN, 2009)

6.4 Terestrická avifauna

Nejzastoupenější skupinou ptáků hnízdících v suchozemské Arktidě představují husy (*Anserini*) a bahňáci (*Scolopacidae*, *Charadriidae*). Po skončení hnízdní sezóny se ptáci přesouvají do boreálních a tropických oblastí a někteří z nich migrují až do Antarktidy, čímž je udržována vysoká konektivita mezi regiony. Tímto způsobem působí na migrující ptáky tlaková fronta z antropogenní činnosti a ze ztráty habitatů. Za největší stresor je identifikován nesoulad mezi biologickými událostmi a enviromentálními signály, jako je vrchol dostupnosti potravy. Problém se týká insektivorních i herbivorních ptáků. Ačkoliv může dojít ke snížení nákladů na tělesnou termoregulaci, tento efekt přináší výhody jen v minimálním rozsahu. (Smith et al., 2020)

Studie McKinnon, Nol, a Juillet (2013) zkoumala vliv klimatických změn na energetické požadavky hnízdních mláďat bahňáků rodu *Calidris*. Bylo zjištěno, že vyšší teploty mohou částečně kompenzovat omezenou potravní nabídku během růstu díky nižším energetickým nárokům na termoregulaci. Zvýšená teplota v období odchovu mláďat může také snížit nároky na rodičovskou péči. Nicméně pro zobecnění těchto výsledků je nutná aplikace studia v širším kontextu.

Důležité je také zohlednit schopnost bahňáků k behaviorální a fyziologické plasticitě, vůči řadě dalších potenciálních klimatických tlaků, jako je úbytek permafrostu a zvýšené riziko predace.

Protichůdné klimatické trendy působí i na husy běločelé (*Branta leucopsis*) ve Špicberkách. V důsledku rychlejšího nástupu klimatických projevů jarního období se zlepšily reprodukční podmínky a míra přežití na zimovištích. Na druhou stranu byl na husy vyvíjen vyšší predační tlak ze strany predátorů, především polárních medvědů a lišek. Celkově lze říct, že pozitivní přínosy pro arktické husy v ranních stádiích života jsou kompenzovány ztrátami způsobenými nepřímými dopady změn klimatu. (Matthews et al., 2019)

Sovice sněžní (*Bubo scandiacus*)

Sovice sněžní se rozmnožují výhradně v Arktidě a je těžké předpovědět jejich migrační strategie. Jedinci, kteří zůstávají v čase zimního období v Arktidě, se krmí především lumíky a hraboši, i když je jejich strava v zimě více diverzifikovaná. Reprodukční úspěšnost a velikost snůšky vajec se odvíjí od abundance hlodavců. Většina dospělých jedinců zůstává v Arktidě mimo hnízdní sezonu bez ohledu na vrchol hojnosti, nebo fluktuaci hlodavců, zatímco juvenilní a v lovu méně zkušené jedinci opouštějí Arktidu. (Robillard et al., 2016)

V současnosti je početnost odhadována na 8 až 28 tisíc jedinců. Dlouhodobý pokles početnosti po celém areálu rozšíření vedl k zařazení do kategorie zranitelné druhu v seznamu IUCN. Pokles počtu lumíků by mohl negativně ovlivnit trendy populace sov a dalších predátorů. (Smith et al., 2020)

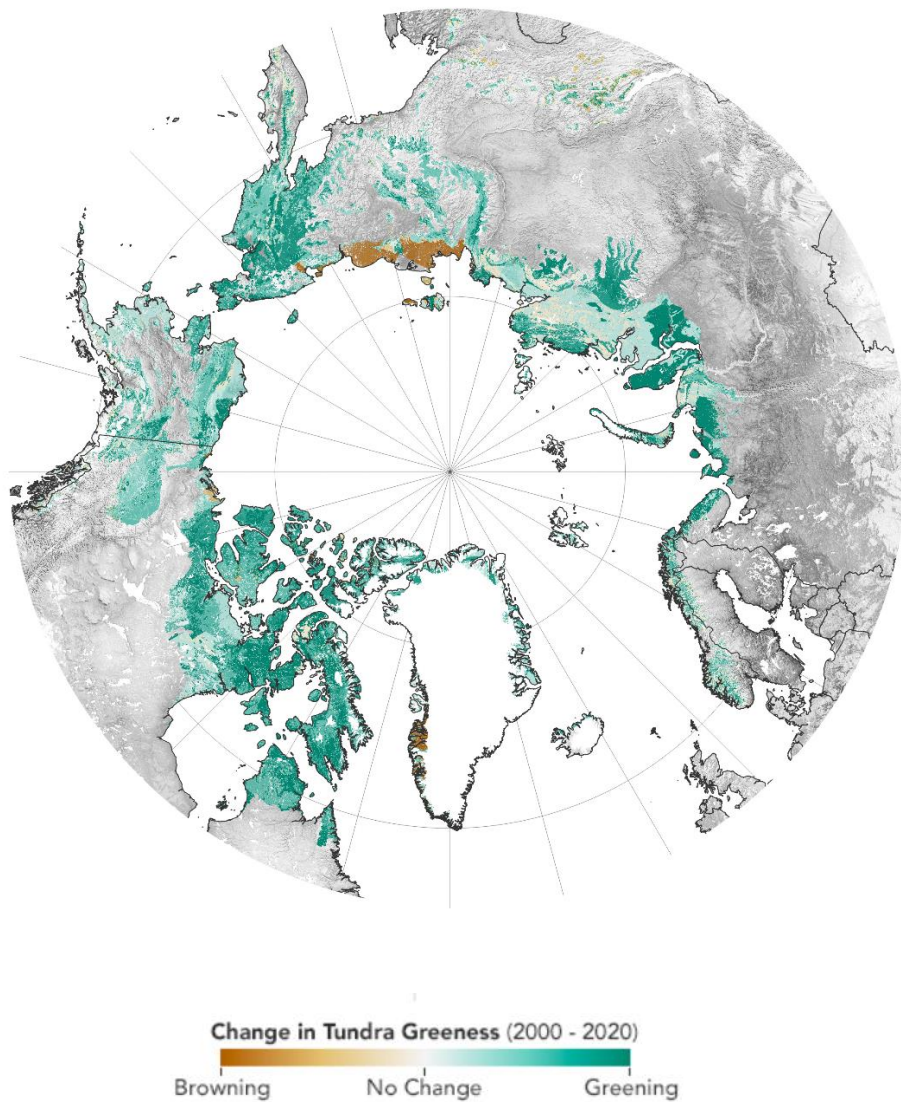
6.5 Tundra

Specifické klimatické podmínky tundry, charakteristické nízkými teplotami a omezenými světelnými podmínkami, umožňují existenci pouze několika druhům rostlin. Dominantními složkami vegetace jsou cévnaté rostliny, mechorosty a lišejníky. Přibližně 5 % veškerých travin a bylin v tundře je endemických. Mnoho arktických druhů rostlin zažilo v postglaciální době výrazné klimatické změny, a otázkou zůstává, do jaké míry budou schopné konkurovat s boreálním přílivem druhů. Vrbiny (*Salix spp.*) dosahují vyšší produkce biomasy, čímž poskytují kvalitnější habitat a zdroj potravy pro boreální býložravce. (CAFF, 2013) Výzkum Tape et al. (2018) podrobně zkoumá transformaci aljašské tundry působením bobrů a zdůrazňuje markantní nárůst bobřích přehrad.

Expanze keřů, známá jako fenomén “*Arctic greening*”, koreluje s rostoucími teplotami a je ovlivněna i dalšími faktory, jako jsou disturbance, složení a vlhkost půdy a dynamika sněhu. Konkurenceschopnost keřů se změnami klimatu zvýšila. Změny vyvolané expanzí keřů mohou také zpětnovazebně ovlivnit klima. Narušení povrchové energetické bilance může ohrozit rozsáhlou vrstvu permafrostu a vystavit uložený uhlík

mikrobiálnímu rozkladu. (Mekonnen et al., 2021) Frost et al. (2022) uvádějí, že analýza dlouhodobých satelitních dat NASA z let 1982 až 2022 ukazuje, že osm nejvyšších hodnot zazelenění tundry bylo zaznamenáno v posledních 12 letech. Z krátkodobého hlediska může intenzivnější fotosyntéza a vyšší absorpce CO₂ působit prospěšně. Z dlouhodobého hlediska však s pokračujícím trendem oteplování může převládat proces známý jako “*Arctic browning*”, neboli hnědnutí Arktidy, který je způsoben úhynem rostlin. (NDSIC, 2022)

Obr. 11: Změny ve vegetaci tundry založena na pozorováních ze satelitů v letech 2000-2020 (www.earthobservatory.nasa.gov)



7. Sladkovodní ekosystémy

Arktické sladkovodní ekosystémy, které zahrnují řeky, jezera a mokřady, procházejí významnými změnami kvůli klimatické variabilitě a antropogenním vlivům. (CAFF, 2013) Masy sladké vody, které obohacují Severní ledový oceán a pocházejí z pevnin Severní Ameriky a Eurasie, představují 10 % celkového průtoku světových řek. Změna klimatu amplifikuje hydrologický systém sladkých vod tím, že umožňuje proudění většího množství sladké vody a rozvádění vlhkosti z nižších zeměpisných šířek směrem k pólům, což má za následek nárůst srážek v Arktidě. Častější výskyt deště a sněžení, zvýšený říční tok a přítok do oceánu transformuje nejen sladkovodní, ale i mořské ekosystémy. Podle hydrologických modelů by se říční tok v mnoha regionech Arktidy mohl zvýšit o 25 až 50 %. (CliC/AMAP/IASC, 2016)

Klimatické změny přinášejí řadu bezprostředních i nepřímých efektů, mezi které patří:

- Změny v časování biologických cyklů organismů
- Posuny ve vegetačním růstu rostlin
- Invaze nepůvodních druhů
- Změny v rozsahu a distribuci druhů
- Změny ve vzdálenosti mezi sladkovodními refugii
- Změny v primární, sekundární a bakteriolanktonové produkci ekosystémů
- Změny v biochemických cyklech
- Výskyt extrémních hydrologických a meteorologických událostí
- Ztráta habitatů

Druhy a populace budou na tyto změny reagovat rozdílně, přičemž dominantní adaptací bude spíše fenotypová, než genotypová odpověď. (CAFF, 2013)

7.1 Charakteristika

Nízké teploty, krátká vegetační sezóna, nízký obsah živin a primární produkce představují hlavní limitující faktory pro organismy v arktických ekosystémech. Nízká produktivita v jezerech je nicméně více spojena s omezeným příjmem slunečního záření, než nedostatkem živin. Hlavním indikátorem probíhajících změn v ekosystémech jsou změny v rozsahu oblastí pokrytých ledem. Za posledních 150 let došlo ke snížení doby trvání lední pokrývky o dva týdny. V lentských systémech působí oteplování na zvýšení produktivity vodních rostlin a řas a vede k diferenciaci v hojnosti druhů. Led plní funkci ochranné bariéry, která brání kolonizaci prostředí

teplomilnými druhy. (CAFF, 2013) Charakteristická dynamika ekosystému se projevuje v jarním období při tání sněhu, kdy vodní biotopy vznikají nebo zanikají v závislosti na přítoku nebo odtoku vody. Zejména v zimním období představují sněhové srážky zdroj vody pro všechny biotopy. Pokud dochází k nadměrnému tání permafrostu, může nastat kolaps termokrastových jezer. (Elster a Ditrich, 2023)

7.2 Biodiverzita

Vodní toky, jezera a mokřady jsou mezi nejčistšími ekosystémy na Zemi a vyznačují se specifickou biodiverzitou. (Kosek a Ruman, 2021) Místní druhy jsou ohroženy vyhynutím v důsledku konkurence schopnějších nepůvodních druhů, což vede k jejich následnému vyloučení. Tání permafrostu způsobuje zaplavení řek bahnem a sedimenty, což snižuje ve vodním prostředí obsah kyslíku. Největší ohnisko diverzity bezobratlých je soustředěno ve Fennoskandinávských vnitrozemských jezerech. Jezera na pobřeží Aljašky jsou nejhojnější na diverzitu ryb, zatímco jezera na severu Kanady, Grónska, Islandu a Ruska jsou v tomto ohledu nejméně diverzifikovaná. Vyšší teplota a kontakt s pevninou se zdají být klíčové pro definici diverzity v regionech.

V kanadských pobřežních oblastech se stabilnějšími klimatickými podmínkami bylo během posledních dvou století zaznamenáno menší množství změn, v rozmanitosti sladkovodních druhů sinic než v oblastech výrazně zasaženými změnami klimatu. (Arctic Council, 2020)

7.3 Plankton

Fytoplanktonní mikroskopické řasy se vyskytují ve velké míře a diverzitě především ve Fennoskandinávii a v některých regionech Aljašky. Rozdíly v diverzitě mezi regiony jsou určeny typem vodního tělesa, jeho velikostí, nebo kvalitou vody. (Lento et al., 2019) Z ekologického hlediska jsou řasy významnými složkami, protože poskytují základ potravním sítím a přispívají k biogennímu toku uhlíku téměř ve všech vodních i suchozemských biotopech. (CAFF, 2013) Nepříznivý vliv může nastat v případě přemnožení určitých typů bakterií, zejména těch, které produkují toxiny, jako jsou cyanobakterie. Ačkoli v současnosti cyanobakterie nevykazují dlouhodobé jednosměrné trendy růstu, během deseti nejteplejších let zaznamenaných v Arktidě byla také zaznamenána vrcholová léta cyanobakterií. (Lento et al., 2019)

U zooplanktonních společenstev se očekává posun teplotních pásem s vysokou biodiverzitou směrem k severnějším oblastem, což umožní vstup nových druhů do jižních částí Arktidy. (CAFF, 2013)

7.4 Ryby

Diverzita sladkovodních ryb v Arktidě je výsledkem dlouhodobých historických procesů zalednění a odlednění, které formovaly jejich evoluční historii během pozdního pleistocénu a holocénu. Na rozdíl od mořských ryb, jejichž evoluční linie sahají až do neogénu, představují sladkovodní ryby poměrně mladou skupinu s vysokou mírou plasticity. V současné době tvoří sladkovodní a diadromní ryby v Arktidě přibližně 1 % celosvětové diverzity ichtyofauny. (CAFF, 2013)

Jediným původním druhem arktických jezer je anadromní siven severní (*Salvelinus alpinus*), který patří mezi omezeně se vyskytující druhy ryb. Mimo období rozmnožování tento druh obývá příbřežní mořské vody, ačkoli existují i čistě vnitrozemské populace, které dosahují menších rozměrů. V důsledku jeho přítomnosti dochází k regulaci početnosti zooplanktonu a zároveň představuje důležitou složku potravy pro arktické ptáky. (Elster a Ditrich, 2023)

Arktické delty poskytují zimoviště pro mnoho druhů ryb, které tolerují brakické vody, díky stálému přítoku sladké vody pod vrstvou ledu. Zvyšující se teploty mohou vést k narušení průtokového režimu a dostupnosti vhodných zimovišť a také mohou výrazně ovlivnit místní rybolov. (Prowse et al., 2006)

V izolovaných ekosystémech, kde je disperze druhů omezená, může docházet k redukci stenotermních druhů a poklesu celkové diverzity v důsledku klimatických změn, aniž by došlo k jejich nahrazení eurytermními druhy pocházejícími z migrace. Tento trend je očekávaný zejména u ichtyofauny, jejíž distribuční vzory jsou závislé na propojenosti prostředí. (Elster a Ditrich, 2023)

7.5 Abiotické faktory

V důsledku klimatických změn se mění fyzikální a chemické charakteristiky v prostředí a dopady těchto změn transformují ekosystémy. Specifickou zátěží pro jezerní ekosystémy je uvolňování chemických látek a sedimentárního materiálu z permafrostu. Jezerní a říční lokality napříč celou Arktidou vykazují oligotrofizaci spojenou s poklesem obsahem fosforu v jižnějších regionech, zatímco v severnějších regionech dochází k prohlubování aktivní vrstvy, spojené s rostoucím trendem fosforu. (Culp et al., 2021)

8. Antropogenní vlivy

Nejrozsáhlejší a nejškodlivější antropogenní dopad pro Arktidu v současnosti představuje změna klimatu. Nárůst lidské populace s sebou nese rozvoj turismu a nárůst průmyslových aktivit výstavbu infrastruktury. Rozvoj akvakultury a umělé navyšování populací, jako je to u tichooceánského lososa (*Oncorhynchus spp.*), vyvolává stresové působení. Reintrodukce a translokace druhů za účelem ekonomického zisku, nebo obnovy populací způsobila změny v jejich rozšíření. Pižmoni (*Ovibos ovmoschatus*), kteří byli vypuštěni lidmi, se postupem času rozrůstali a rozšířili do mnoha oblastí. Populace sobů, kteří byli před 100 lety zdecimované nadměrným lovem, byli opětovně reintrodukované na Špicberkách. Avšak přemnožené semi-domestikované soby mohou narušit ekologickou rovnováhu a podporovat akceleraci predátorů jako jsou lišky obecné (*Vulpes vulpes*). Dalším příkladem antropogenního ovlivnění bylo zavlečení ondatry (*Ondatra zibethicus*) do palearktických oblastí. (CAFF, 2013)

8.1. Změna klimatu

Mezinárodní panel pro změnu klimatu IPCC ve své výroční zprávě z roku 2023 deklaruje, že změnu klimatu je nezpochybnitelně způsobená lidskou činností. Největším hybatelem těchto změn je vypouštění skleníkových plynů do atmosféry v období trvajícím déle než jedno století, přičemž intenzita emitování se odlišuje mezi regiony a zeměmi. Největší podíl v atmosféře ze skleníkových plynů tvoří oxid uhličitý (CO₂) a metan (CH₄). Antropogenní činnosti, při kterých jsou tyto plyny uvolňovány zahrnují spalování fosilních paliv, odlesňování, zemědělské činnosti a výroba cementu. (IPCC, 2023)

Spalování fosilních paliv

Spalování fosilních paliv patří mezi klíčové antropogenní činnosti s významným dopadem na klimatický systém Země. Výsledkem spalování je uvolňování velkého množství oxidu uhličitého (CO₂) a metanu (CH₄) do atmosféry v důsledku spalování uhlí, zemního plynu a ropy. Výroba energie uvolňuje emise, které přispívají ke změně klimatu. (MarineBio Conservation Society, n.d.)

Uhlík uložený pod zemským povrchem je součástí přirozeného cyklu uhlíku a je mnohem stabilnější. Bez spalování lidskou činností by se uložený uhlík pravděpodobně nedostal do atmosféry. (Dean, 2019) Méně, než polovina emisí CO₂ zůstává v atmosféře, jedna čtvrtina je absorbována oceánem a necelých 30 procent pohlcují suchozemské ekosystémy. Podle světové meteorologické organizace WMO jsou současné hodnoty CO₂ v atmosféře srovnatelné s koncentrací před 3-5 miliony

let, kdy byla teplota Země o 2-3 stupně vyšší a hladina moře o 10-20 metrů vyšší, než v současnosti. (WMO, 2023)

Odlesňování

Deforestrace kácením, nebo vypalováním lesů vede k uvolňování uloženého uhlíku z lesního společenstva do atmosféry. Globální ztráta tropických pralesů, přispěla 4,8 miliardami tun CO₂ v období mezi lety 2015-2017. Ztráta dřevní biomasy způsobuje, že stávající lesy již nemohou absorbovat takové množství oxidu uhličitého, než kolik je vypouštěno lidskou činností. (Dean, 2019)

Zemědělství

Emise skleníkových plynů způsobená zemědělstvím je procesem přirozených jevů. Silný skleníkový plyn metan je uvolňován při enterické fermentaci hospodářských zvířat a při způsobu, jakým jsou spravovány hnojiva. Při zemědělské činnosti dochází k emisím tří hlavních plynů: oxid uhličitý (CO₂), oxid dusičitý (NO₂), metan (CH₄) a každý z těchto plynů má odlišný dopad na klimatický systém. (Joiner a Toman, 2023)

Výroba cementu

Cementářský průmysl se řadí mezi přední spotřebitele energie a producenty oxidu uhličitého, čímž významně přispívá ke změně klimatu. Tento sektor každoročně přispívá k 5-8 % celosvětových antropogenních emisí CO₂. (Cheng et al., 2023)

8.2 Lodní doprava

Rozvoj lodní dopravy přináší zvýšené požadavky na mezinárodní obchod a vede k nárůstu počtu a tonáže lodí. Využití arktických námořních tras má potenciál výrazně zlepšit efektivitu obchodu a závislost na tradičních lodních trasách. Lin et al. (2023) očekávají, že do roku 2045 bude až 82 % arktických vod bez ledového pokryvu, což otevře nové možnosti dalšímu rozvoji lodní dopravy. (Lin et al., 2023) Počet lodí proplouvajících Arktidou každoročně narůstá o 20 %. (Saebi et al., 2020)

Rozšiřování arktických námořních tras může odklonit 5 % celkové lodní dopravy směrem k Arktidě, a to přes Severovýchodní, Severozápadní a plánovanou transarktickou trasu. Z měděných nátěrů na lodích, které se používají k prevenci přichycení bakterií, řas a bezobratlých k trupu, se mohou uvolňovat ionty mědi, jež mohou negativně ovlivnit růst a přežití bentických mořských organismů. Dalším produktem, který se z těchto nátěrů uvolňuje jsou mikroplasty. Ty byly detekovány v mnoha světových regionech ovlivněných lodní dopravou. S rostoucí intenzitou lodní dopravy se také očekává zvýšené množství znečišťujících látek v mořském prostředí.

Únik ropy do moře může mít devastující účinky na mořské organismy, včetně inhibice růstu, narušení reprodukčního cyklu, nemoci, nebo smrt. Ropné skvrny znečišťují

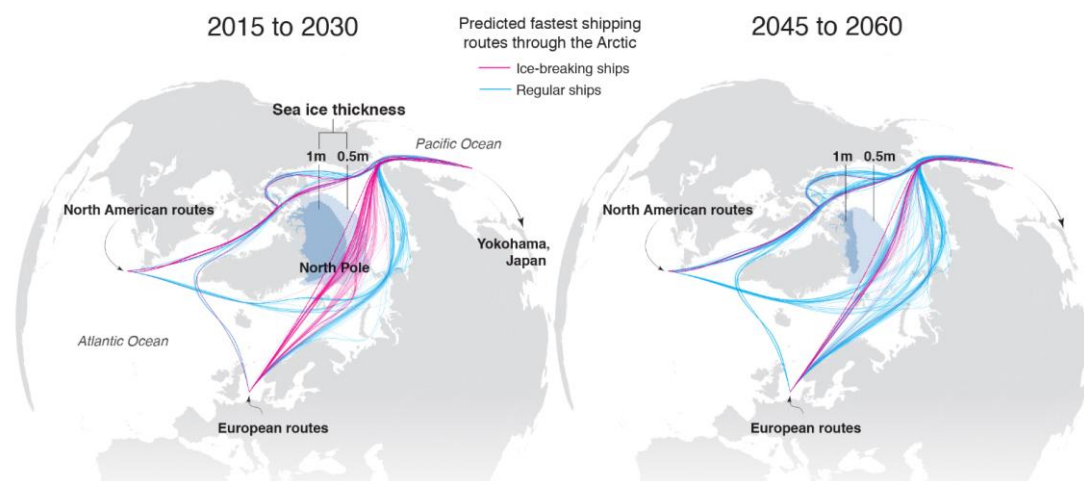
mořský povrch a jejich přichycení k srsti nebo peří megafauny snižuje schopnost plavání a létání. U ryb mohou tyto skvrny vyvolat nekrózu žaber, abnormální dělení buněk a poškození kůže. Ryby v mořském prostředí hrají klíčovou roli v potravním řetězci, a jejich kontaminace může ovlivnit celý potravní systém skrze kaskádové efekty. V Barentsově moři byly objeveny malé ropné skvrny ve čtyřech z devíti zkoumaných oblastí, což naznačuje možnou souvislost s ropnými úniky. Vzduch je také znečišťován emisemi uvolněnými z pohonů lodí, včetně uhlovodíků a těkavých organických sloučenin při spalování ropy. Oxidy síry a dusíku přispívají k acidifikaci oceánu a mohou společně s dalšími plyny při fotochemických reakcích poškozovat životní prostředí.

Od roku 2017 je v platnosti „Polární kodex“ zavedený mezinárodní námořní organizací (IMO), který zakazuje vypouštění odpadních vod z lodí do Arktického oceánu. Avšak, dodržení tohoto zákazu není zaručeno a absence monitorovacích opatření může vést k nelegálnímu vypouštění škodlivých látek. Hluk generovaný lodní dopravou výrazně ovlivňuje mořské savce, které využívají akustické prostředí regionu pro reprodukci, komunikaci a orientaci. Nízkofrekvenční hluk může narušit migrační vzorce běluh, velryb grónských a dalších kytovců. V závislosti na typu motoru a rychlosti plavidla může ledoborec ovlivnit mořské savce na vzdálenost až dvou kilometrů, přičemž výletní lodě mohou působit negativně až do vzdálenosti 52 km.

Světelné znečištění emitované lodními světlomety má dosah na zooplankton a pelagickou zónu. Ptáky mohou ztratit orientaci a nezřídka hrozí i kolize s lodí. Podle statistik se každým rokem v Grónsku srazí nejméně 2 050 ptáků. Kolize s lodí má často fatální následky a mořští savci kteří se shlukují do skupin, jsou zvláště ohroženi. Až polovina subpopulací endemických mořských savců je vystavena na arktických trasách riziku. (Qi et al., 2023)

Invazivní druhy jsou do Arktidy nejčastěji zavlečené prostřednictvím transportu balastní vody, která je z lodí vypouštěna. Změna klimatu způsobuje, že zavlečené druhy se mohou lépe adaptovat novým podmínkám, ale zároveň vyžaduje jistou toleranci druhů. (Saebi et al., 2020) Za nejúspěšnější skupiny, jejichž životní strategie tolerují široké spektrum podmínek, jsou považováni krabi, měkkýši a korýši. Podmínky v Hudsonově zálivu v kanadské Arktidě, kde je snížení pokryvu mořským ledem nejvýraznější, představují nejvíce příznivé prostředí pro usazování nových druhů. (Goldsmit et al., 2021)

Obr. 12: předpokládané lodní trasy vedoucí přes Arktidu do roku 2060 (www.arctictoday.com)



8.3 Těžba přírodních zdrojů

Arktida disponuje rozsáhlými, dosud nevyužitými zdroji ropy a zemního plynu, avšak činnosti spojené s těžbou s sebou přinášejí významná rizika pro arktické ekosystémy. Průzkumy, vrtné a těžební činnosti v pobřežních vodách mohou ohrozit ryby a mořské savce, které jsou obzvláště citlivé na znečištění a úniky ropy způsobené havárií. Na kontinentálních šelfech Arktidy se nachází odhadem 5 % celosvětových prokázaných zásob ropy a 21 % zásob zemního plynu. Těžba ropy a emise skleníkových plynů přispívají k celkové klimatické krizi, přičemž arktické země v roce 2016 přispěly k celosvětovým emisím CO₂ podílem 22 %. (Borshchevskaia et al., 2022)

Únik ropy do vod pokrytých ledem představuje závažné riziko, jelikož odstranění je téměř nemožné. Dlouhodobé působení ropného filmu na led navíc absorbuje více tepla a urychluje tání. (Qi et al., 2023) Tyto úniky mohou mít vliv na potravní řetězce, neboť některé mořské organismy, jako například slávky, na kterých se živí mroži, akumulují toxiny z ropného znečištění. (Helle et al., 2020)

8.4 Rybolov

Subarktické šelfové oblasti jsou významnými rybolovnými zónami. Loví se zde hlavně treska aljašská (*Gadus chalcogrammus*), treska atlantická (*Gadus morhua*) a pacifická (*Gadus macrocephalus*), sled atlantický (*Clupea harengus*) a pacifický (*Clupea pallasii*) losos (*Salmo spp.*) a huňáček (*Mallotus villosus*). Mořský led v centrální části Arktidy omezuje lidem přístup, čímž chrání oblast před rybolovem a dalšími lidskými zásahy. Tyto ekosystémy podporují ve vysokoarktických šelfových mořích pelagické – bentické vazby a produktivní bentické společenství. Subarktické ekosystémy charakterizuje vysoká pelagická produktivita. Ubývající mořský led v kombinaci se změnami fyzických charakteristik oceánu a invazí nepůvodních druhů oslabí pelagicko-bentické vazby.

Tažný lov je dominantní metodou rybolovu a reaguje na meziroční ztráty ledu rozšiřováním. Expanze rybolovu je regulována kvótami a řídí se environmentálními, regulačními a socioekonomickými faktory. Zákaz komerčního rybolovu v arktických federálních vodách severně od Beringova průlivu a ochranná zóna rybolovu kolem souostroví Svalbard chrání vysokoarktické bentické ekosystémy. (Fauchald et al., 2021)

Rybolov se zaměřuje na velké, dlouhověké druhy, které se vyskytují hojně na lokální úrovni. Tyto druhy ryb se rozmnožují epizodicky a vykazují vysokou mortalitu mláďat, což zvyšuje jejich zranitelnost vůči nadměrnému lovu. Komerční rybolov je hlavní ekonomickou aktivitou v Barentsově a Beringově moři, stejně jako v grónských a islandských vodách, i když některé oblasti zaznamenaly významné změny, v druzích lovených ryb, jako je přechod z tresky na krevety v jihozápadním Grónsku. (CAFF, 2013)

Sněžný krab je zásadním druhem pro komerční rybolov a v Arktickém oceánu se vyskytuje jako alochtonní druh. Pro svůj vývoj vyžaduje specifické podmínky a je citlivý na změny teplot. Klimatické změny vedou k jeho posunu v rozšíření a degradaci populace ve významných rybolovných oblastech. (Uryupova, 2023)

9. Diskuse

Země prošla v průběhu posledních desítek až milionů let různými klimatickými změnami, které byly zásadní pro rozvoj biologické rozmanitosti. Svening (2015) ve své studii uvádí, že dnešní druhová skladba je výsledkem evoluční diverzifikace díky změnám klimatu (Svenning, 2015). Moje bakalářská práce ukazuje druhovou rozmanitost bioty v arktické oblasti, ale také zranitelnost těchto unikátních organismů. Arktida je tedy, podle různých autorů (např. CAFF, 2013) nyní domovem rozmanité škály rostlinných a živočišných druhů, přizpůsobených unikátním podmínkám. Ekosystémy se rozprostírají od ledovců přes mokřady a od malých rybníků k rozsáhlému oceánu. (CAFF, 2013, Svenning, 2015 a další).

Arktida představuje klíčový region pro klimatický systém Země a v současnosti čelí bezprecedentním výzvám způsobeným antropogenní činností. Z pozorování recentních dat Mezivládního panelu pro změnu klimatu vyplývá skutečnost, že došlo ke zvýšení teploty Země o 1,1 °C, ve srovnání s předindustriální dobou. (IPCC, 2023)

Klimatické podmínky na Arktidě se mění rychleji než na zbytku planety, což je dáno především jevem arktické amplifikace. Tento proces vede k rapidnímu úbytku ledové pokrývky (viz obr. 6), snižuje albedo a má potenciál transformovat Arktidu na potenciální zdroj tepla prostřednictvím zpětnovazebných efektů.

Změny v oceánských a atmosférických prouděních, spolu s úbytkem ledu, narušují energetické toky na všech úrovních a vedou k posunům v distribuci a abundanci mořských druhů. Expanze alochtonních autotrofů způsobuje fluktuaci v nutrientech v mořském i sladkovodním prostředí. Migrace boreálních druhů představuje pro arktické druhy s úzkou ekologickou valencí významnou konkurenci o zdroje, habitat a místo pro reprodukci. Velké predátory, jako jsou liška polární, medvěd lední a sovice sněžní, se potýkají s nedostatkem potravy a jsou nuceni přecházet na jiný, častokrát nevhodný zdroj potravy.

Býložravce při přesunech za účelem hledání potravy musí absolvovat delší a riskantnější cesty, při kterých jsou vystaveni většímu riziku úmrtí z vyčerpanosti, nebo napadení predátorem. V terestrickém prostředí vede rozsáhlá eroze permafrostu k ztrátě habitatů. Expandující vegetace keřů omezuje společenství lišejníků a mečů, čímž snižuje albedo a způsobuje fenomén nazývaný ozelenění a hnědnutí tundry (viz obr. 11). Zásoby uhlíku v permafrostu jsou vystaveny potenciálnímu mikrobiálnímu rozkladu. V současnosti není jasné, jakou mírou Arktida přispěje nebo zredukuje celkové množství skleníkových plynů v atmosféře.

Antropogenní činnosti probíhající přímo na Arktidě, nebo prostřednictvím klimatických změn přispívají vysokou mírou ke kumulativním stresorům.

Závěr

Tato bakalářská práce se zaměřila na identifikaci klíčových faktorů ovlivňujících jednotlivé ekosystémy a přispěla ke komplexnějšímu pochopení dané problematiky. Ukazuje na významnou roli Arktidy a zdůrazňuje potřebu dalšího výzkumu a mezinárodní spolupráce v této oblasti. Může pomoci zvýšit povědomí o důležitosti Arktidy pro globální klimatický systém a identifikaci raných varovných signálů změny klimatu.

Zdroje

Aartsma P., Asplund J., Odland A., Reinhart S. a Renssen H., 2020: 'Surface albedo of alpine lichen heaths and shrub vegetation', *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 52(1), 312-322. (Online) Dostupné na: DOI: 10.1080/15230430.2020.1778890. (cit. dne: 25. listopadu 2023).

Acot P., 2005: 'Historie a naměny klimatu.' Praha: Nakladatelství Karolinum, Univerzita Karlova.

Arctic Council. (2009). "Arctic Marine Shipping Assessment Report 2009." Protection of the Arctic Marine Environment (PAME). Dostupné na: <https://oaarchive.arctic-council.org/server/api/core/bitstreams/4e41246d-70e3-4dd7-bd66-e1ee2d21635f/content> (cit. dne 10. února 2024).

Arctic Council. (2020). "Arctic Freshwater Biodiversity: 5 Trends to Know." (online) Dostupné na: <https://arctic-council.org/news/arctic-freshwater-biodiversity-5-trends-to-know/> (cit. dne 13. února 2024).

Arctic WWF. (n.d.). Polar bear population. Dostupné na: <https://www.arcticwwf.org/wildlife/polar-bear/polar-bear-population/> (cit. dne: 11. února 2024).

Aronsson, M. et al. (2021). State of the Arctic Terrestrial Biodiversity Report. Conservation of Arctic Flora and Fauna International Secretariat, Akureyri, Iceland. ISBN 978-9935-431-94-3. (cit. dne 24. března 2023).

Bjorkman Anne D., Criado, M. G., Myers-Smith I. H. Ravolainen V., Jónsdóttir I. S., Westergaard K. B., Lawler J. P., Aronsson M., Bennett B., Gardfjell H., Heiðmarsson S., Steward L. a Normand S., 2020: 'Status and trends in Arctic vegetation: Evidence from experimental warming and long-term monitoring', *Ambio*, 49, pp. 678–692. DOI: 10.1007/s13280-019-01161-6. Dostupné na: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13280-019-01161-6> (cit. dne: 25. listopadu 2023).

Blakey R., 2021: 'Paleotectonic and paleogeographic history of the Arctic region.' *Atlantic Geology*, 57, pp. 7–39. (online) Dostupné na: <https://doi.org/10.4138/atlgol.2021.002> (cit. dne 12. listopadu 2023).

Boger, S.D., 2011: 'Antarctica — Before and after Gondwana.' *Gondwana Research*, 19(2), (online) Dostupné na: <https://doi.org/10.1016/j.gr.2010.09.003> (cit. dne 28. října 2023).

Borshchevskaia, E., Gorokhovskaya, V., Khludova, M., Mangutov, E. & Shapulenko, A. (2022). "Pollution in the Arctic: Oil and Gas Extraction on the Continental Shelf as a Major Contributor." Article. (cit. dne: 20. března 2024).

CAFF. (2013). "Arctic Biodiversity Assessment: Status and trends in Arctic biodiversity." Akureyri: Conservation of Arctic Flora and Fauna.

CAFF. (2017). State of the Arctic Marine Biodiversity Report. Akureyri, Iceland: Conservation of Arctic Flora and Fauna International Secretariat. ISBN 978-9935-431-63-9. Dostupné na: <https://www.arlis.org/docs/vol1/M/987005384.pdf> (cit. dne: 20. února 2024).

Carvalho, K.S. a Wang, S. (2020): "Sea surface temperature variability in the Arctic Ocean and its marginal seas in a changing climate: Patterns and mechanisms", *Ocean Science*, (Online) Dostupné na: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921818120301569> (cit. dne: 04. prosince 2023).

Cheng, D., Reiner, D.M., Yang, F. et al. (2023). "Projecting future carbon emissions from cement production in developing countries." *Nature Communications*, (online) 14, 8213. Dostupné na: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-43660-x> (Přístup dne: 25. března 2024).

IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)). IPCC, Geneva, Switzerland, 184 pp., doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.

Clairbaux, M., Fort, J., Mathewson, P., Porter, W., Strøm, H. a Grémillet, D. (2019): "Climate change could overturn bird migration: Transarctic flights and high-latitude residency in a sea ice free Arctic." *Scientific Reports*, 9, Article 17767. Dostupné na: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54228-5> (cit. dne: 17. února 2024).

CliC/AMAP/IASC. (2016). "The Arctic Freshwater System in a Changing Climate." WCRP Climate and Cryosphere (CliC) Project, Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), International Arctic Science Committee (IASC). (cit. dne 16. března 2024).

Cocks, L., 2013: 'Gondwana from top to base in space and time'. *Gondwana Research*, 24, pp. 999-1030, (online), Dostupné na: <https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.06.012> (cit. dne 28. října 2023).

Condie K.C., 2011: Chapter 8 - The Supercontinent Cycle. In: K.C. Condie, ed. *Earth as an Evolving Planetary System* (Second Edition). Boston: Academic Press, pp.317-355, (online) Dostupné na: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385227-4.00003-1> (cit. dne 28. října 2023).

Convey P., Bindshadler R., di Prisco G., Fahrbach E., Gutt J., Hodgson D. A., Mayewski P.A., Summerhayes C.P. a Turner J., 2009: 'Antarctic Climate Change and the Environment', *Antarctic Science*, 21, pp. 541-563, (online) Dostupné na: <https://doi.org/10.1017/S0954102009990642> (cit. dne 28. října 2023).

Cornwall, C.E., Boyd, P.W., McGraw, C.M., Hepburn, C.D., Pilditch, C.A., Morris, C.A., Smith, A.M. a Hurd, C.L. (2014): "Diffusion Boundary Layers Ameliorate the Negative Effects of Ocean Acidification on the Temperate Coralline Macroalga *Arthrocardia corymbosa*", *PLOS ONE*. (Online) Dostupné na: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0097235> (cit. dne 12. prosince 2023).

Culp, J.M., Goedkoop, W., Christensen, T., Christoffersen, K. S., Fefilova, E., Liljaniemi, P., Novichkova, A. A., Ólafsson, J. S., Sandøy, S., NAIMmerman, Ch. E.,

- Lento, J. (2021). "Arctic Freshwater Biodiversity: Establishing baselines, trends, and drivers of ecological change." *Freshwater Biology*, (online) Dostupné na: <https://doi.org/10.1111/fw.13831>. (cit. dne 28. února 2024).
- Dean, A. (2019). "Deforestation and Climate Change." (online) Climate Council. Dostupné na: <https://www.climatecouncil.org.au/deforestation/> (cit. dne: 25. března 2024).
- Derocher, A.E., Lunn, N.J. a Stirling, I. (2004): "Polar Bears in a Warming Climate." *Integrative and Comparative Biology*, 44(2), str. 163–176. Dostupné na: <https://doi.org/10.1093/icb/44.2.163> (cit. dne: 11. února 2024).
- Doney, S.C., Ruckelshaus, M., Duffy, J.E., Barry, J.P., Chan, F., English, C.A., Galindo, H.M., Grebmeier, J.M., Hollowed, A.B., Knowlton, N., Polovina, J., Rabalais, N.N., Sydeman, W.J. a Talley, L.D. (2012): "Climate Change Impacts on Marine Ecosystems." *Annual Review of Marine Science*, 4(1), 11-37. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-041911-111611> (cit. dne 12. ledna 2024).
- Dowling, T.E., Showman, A.P., 2007: 'Earth as a Planet: Atmosphere and Oceans' in McFadden, L.-A., Weissman, P.R., Johnson, T.V. (eds.) *Encyclopedia of the Solar System (Second Edition)*, Academic Press, pp. 169-188. Dostupné na: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978012088589350013X> (cit. dne: 28. listopadu 2023). Online kniha
- Dutton J., 2021: 'What is the All Important Arctic Oscillation?', WCS Blog, World Climate Service, (online) Dostupné na: <https://www.worldclimateservice.com/2021/09/01/arctic-oscillation/> (cit. dne: 16. listopadu 2023).
- Dutton, J., 2021: 'What is the North Atlantic Oscillation?' (online) World Climate Service. Dostupné na: <https://www.worldclimateservice.com/2021/08/26/north-atlantic-oscillation/> (cit. dne: 18. listopadu 2023)
- Eberle J.J., Fricke H. C., Humphrey J. D., Hackett L., Newbrey M.G. a Hutchison J. H., 2010: 'Seasonal variability in Arctic temperatures during early Eocene time. *Earth and Planetary Science Letters*, (online) 296(3-4), pp.481-486. Dostupné na: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.06.005> (cit. dne 26. října 2023).
- Editors of Encyclopaedia Britannica. (2023, October 27): 'Gondwana'. *Encyclopedia Britannica*, (online) Dostupné na: <https://www.britannica.com/place/Gondwana-supercontinent> (cit. dne 28. října 2023).
- Elster, J. a Ditrich, O. (eds.) (2023). "Polární ekologie Svalbardu." České Budějovice: Nakladatelství Jihočeské univerzity v Českých Budějovicích.
- Fauchald, P., Arneberg, P., Debernard, J.B., Lind, S., Olsen, E. & Hausner, V.H. (2021). "Poleward shifts in marine fisheries under Arctic warming." *Environmental Research Letters*, 16(7), 074057. Dostupné na: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac1010> (cit. dne: 10. března 2024).
- Frost, G.V., Macander, M.J. a Bhatt, U.S. (2022): "Arctic Report Card 2022: Tundra Greenness." NOAA technical report OAR ARC; 22-09. Dostupné na: <https://doi.org/10.25923/g8w3-6v31> (cit. dne 28. prosince 2023).

Goldsmith, J., McKindsey, C.W., Stewart, D.B. & Howland, K.L. (2021). "Screening for High-Risk Marine Invaders in the Hudson Bay Region, Canadian Arctic." *Frontiers in Ecology and Evolution*, 9. Dostupné na: <https://doi.org/10.3389/fevo.2021.627497> (cit. dne: 12. března 2024).

Gorska, N., Schmidt, B., Węśławski, J.M., Grabowski, M., Dragan-Górska, A., Snacnauska, J. a Besnacnaynska-Möller, A. (2023): "Fish in Kongsfjorden under the influence of climate warming." *Frontiers in Marine Science*, 10. Dostupné na: <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1213081> (cit. dne: 12. února 2024).

Helle, I., Mäkinen, J., Nevalainen, M., Afenyo, M. & Vanhatalo, J. (2020). "Impacts of Oil Spills on Arctic Marine Ecosystems: A Quantitative and Probabilistic Risk Assessment Perspective." *Environmental Science & Technology*, 54(4), 2112-2121. Dostupné na: <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b07086> (cit. dne: 02. března 2024).

Helle, I., Mäkinen, J., Nevalainen, M., Afenyo, M. & Vanhatalo, J. (2020). "Impacts of Oil Spills on Arctic Marine Ecosystems: A Quantitative and Probabilistic Risk Assessment Perspective." *Environmental Science & Technology*, 54(4), 2112-2121. Dostupné na: <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b07086> (cit. dne: 20. března 2024).

CHLUPÁČ, Ivo. *Geologická minulost České republiky*. Vyd. 2., opr. Praha, 2011, 436 s. ISBN 978-802-0019-615.

IUCN. (2009). "Species and climate change: More than just the Polar Bear." (pdf) Dostupné na: https://www.iucn.org/sites/default/files/import/downloads/species_and_climate_change_1.pdf (cit. dne: 08. března 2024).

Joiner, E. a Toman, M.A. (2023). "Agricultural Greenhouse Gas Emissions 101." (online) *Resources for the Future*. Dostupné na: <https://www.rff.org/publications/explainers/agricultural-greenhouse-gas-emissions-101/> (cit. dne: 21. března 2024).

Jones M.C., Grosse G., Treat C., Turetsky M., Anthony K. W. a Brosius L., 2023: 'Past permafrost dynamics can inform future permafrost carbon-climate feedbacks', *Communications Earth & Environment*, 4, Article number: 272. Dostupné na: <https://www.nature.com/articles/s43247-023-00886-3#Sec1> (cit. dne: 22. listopadu 2023).

Jones, B.M., Irrgang, A. M., Farquharson, L. M. (2020): "Arctic Report Card 2020: Coastal Permafrost Erosion", *Arctic Report Card*, United States. National Oceanic and Atmospheric Administration. Office of Oceanic and Atmospheric Research. (Online) Dostupné na: <https://doi.org/10.25923/e47w-dw52> (cit. dne: 9. prosince 2023).

Jones, B.M., Irrgang, A. M., Farquharson, L. M. (2020): „Arctic Report Card 2020: Coastal Permafrost Erosion“, *Arctic Report Card*, United States. National Oceanic and Atmospheric Administration. Office of Oceanic and Atmospheric Research. (Online) Dostupné na: <https://doi.org/10.25923/e47w-dw52> (cit. dne: 9. prosince 2023).

- Kennett, J.P., 1977: 'Cenozoic evolution of Antarctic glaciation, the circum-Antarctic Ocean, and their impact on global paleoceanography'. *Journal of Geophysical Research*, 82(27). (online) Dostupné na: DOI: 10.1029/JC082i027p03843 (cit. dne 16. října 2023).
- Kosek, K. a Ruman, M. (2021). "Arctic Freshwater Environment Altered by the Accumulation of Commonly Determined and Potentially New POPs." *Water*, 13(13), 1739. Dostupné na: <https://doi.org/10.3390/w13131739>. (cit. dne 26. února 2023).
- Kovacs, K.M., Belikov, S., Boveng, P., Desportes, G., Ferguson, S., Hansen, R., Laidre, K., Stenson, G., Thomas, P., Ugarte, F. a Vongraven, D. (2021): "2021 State of the Arctic Marine Biodiversity Report (SAMBR) Update: Marine Mammals." Akureyri: Conservation of Arctic Flora and Fauna International Secretariat. Dostupné na: <https://oaarchive.arctic-council.org/server/api/core/bitstreams/6c34066a-63f7-4f90-9ab7-ef5466f9ebc6/content> (cit dne: 11. února 2024).
- Layton-Matthews, K., Hansen, B.B., Grøtan, V., Fuglei, E. a Loonen, M.J.J.E. (2019): "Contrasting consequences of climate change for migratory geese: Predation, density dependence and carryover effects offset benefits of high-arctic warming." *Global Change Biology*. Dostupné na: <https://doi.org/10.1111/gcb.14773> (cit dne: 09. března 2024).
- Lento, J. et al. (2019). "State of the Arctic Freshwater Biodiversity." Akureyri, Iceland: Conservation of Arctic Flora and Fauna International Secretariat.
- Levine, R.M., Robertis, A.D., Grünbaum, D., Wildes, S., Farley, E.V., Stabeno, P.J. a Wilson, C.D. (2022): "Climate-driven shifts in pelagic fish distributions in a rapidly changing Pacific Arctic." *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. Dostupné na: <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2022.105244> (cit dne: 11. února 2024).
- Lin, B., Zheng, M., Chu, X., et al. (2023). "An overview of scholarly literature on navigation hazards in Arctic shipping routes." *Environmental Science and Pollution Research*. (online) Dostupné na: <https://doi.org/10.1007/s11356-023-29050-2> (cit dne: 19. března 2024).
- Lindsey R. a Dahlman, L. 2023: 'Climate Change: Global Temperature' (online) Climate.gov. Dostupné na: <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-temperature> (cit. dne: 13. listopadu 2023).
- MarineBio Conservation Society. (n.d.). "Why are fossil fuels bad?" (online) Dostupné na: <https://www.marinebio.org/conservation/why-are-fossil-fuels-bad/> (cit dne: 25. března 2024).
- Mekonnen, N.A.A., Riley, W.J., Berner, L.T., Bouskill, N.J., Torn, M.S., Iwahana, G., Breen, A.L., Myers-Smith, I.H., Criado, M.G., Liu, Y., Euskirchen, E.S., Goetna, S.J., Mack, M.C. a Grant, R.F. (2021): "Arctic tundra shrubification: a review of mechanisms and impacts on ecosystem carbon balance." *Environmental Research Letters*, 16(5), 053001. Dostupné na: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abf28b>
- Mekonnen, Z.A., Riley, W.J., Berner, L.T., Bouskill, N.J., Torn, M.S., Iwahana, G., Breen, A.L., Myers-Smith, I.H., Criado, M.G., Liu, Y., Euskirchen, E.S., Goetz, S.J., Mack, M.C. a Grant, R.F. (2021): "Arctic tundra shrubification: a review of

mechanisms and impacts on ecosystem carbon balance." *Environmental Research Letters*, 16(5), 053001. Dostupné na: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abf28b> (cit. dne 28. února 2023).

Miller G. H., Brigham-Grette J., Alley R. B., Anderson L., Bauch H. A., Douglas M. S. V., Edwards M. E., Elias S. A., Finney B. P., Fitzpatrick J. J., Funder S. V., Herbert T. D., Hinnaman L. D., Kaufman D. S., MacDonald G. M., Polyak L., Robock A., Serrenae M. C., Smol J. P., Spielhagen R., White J. W. C., Wolfe A. P. a Wolff E. W., 2010: 'Temperature and precipitation history of the Arctic.' *Quaternary Science Reviews*, 29(15–16), pp. 1679-1715. Dostupné na: <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2010.03.001> (cit. dne 12. listopadu 2023).

Miller G.H., Alley R. B., Brigham-Grette J., Fitzpatrick J. J., Polyak L., Serrenae M. C. a White J. W. C., 2010: 'Arctic amplification: can the past constrain the future?', *Quaternary Science Reviews*, 29(15-16), pp. 1779-1790. ISSN 0277-3791. Dostupné na: <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2010.02.008> (cit. dne: 22. listopadu 2023).

Miller, G.H. et al., 2010: 'Arctic amplification: can the past constrain the future?', *Quaternary Science Reviews*, Volume 29, Issues 15–16, Pages 1779-1790. ISSN 0277-3791. Dostupné na: <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2010.02.008>. (cit. dne 22. listopadu 2023).

Muilwijk, M. et al. (2023): "Divergence in Climate Model Projections of Future Arctic Atlantification", *Journal of Climate*, 36, str. 1727–1748. DOI: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-22-0349.1>. (cit. dne 16. října 2023).

National Oceanic and Atmospheric Administration. (2022). "Physical Characteristics of the Arctic." (online) Dostupné na: <https://oceanexplorer.noaa.gov/explorations/02arctic/background/physical/physical.html> (cit dne: 30. ledna 2023).

National Snow and Ice Data Center. (2022). "Greener Arctic Better Arctic." Dostupné na: <https://nsidc.org/learn/ask-scientist/greener-arctic-better-arctic> (cit dne: 11. března 2024).

National Snow and Ice Data Center. n.d. Arctic Weather and Climate. (online) Dostupné na: <https://nsidc.org/learn/parts-cryosphere/arctic-weather-and-climate> (cit. dne: 19. listopadu 2023). WEB

O'Regan M., Williams CH. J., Frey K. E., a Jakobsson M., 2011: 'A Synthesis of the Long-Term Paleoclimatic Evolution of the Arctic.' *Oceanography*, vol. 24, no. 3, pp. 66–80. JSTOR, (online) Dostupné na: <http://www.jstor.org/stable/24861300> (cit. dne 5. listopadu 2023)

Ocean Climate. (n.d.). "Ocean Circulation". Dostupné na: <https://ocean-climate.org/en/awareness/ocean-circulation/> (cit. dne: 29. listopadu 2023).

O'Regan, M., Williams, C.J., Frey, K.E. a Jakobsson, M.J., 2011: 'Oceanography', *The Changing Arctic Ocean: Special Issue on the International Polar Year (2007–2009)*, 24(3), pp. 66-80. Oceanography Society. (online) Dostupné na: <https://www.jstor.org/stable/10.2307/24861300> (cit. dne 23. října 2023).

- Post E., Alley R. B., Christensen T. R., Macias-Fauria M., Forbes B. C., Gooseff M. N., Iler A., Kerby J. T., Laidre K. L., Mann M. E., Olofson J., Stroeve J. C., Ulmer F., Virginia R. A. a Wang M., 2019: 'The polar regions in a 2°C warmer world.' *Science Advances*, 5, eaaw9883. DOI: 10.1126/sciadv.aaw9883 (cit. dne: 13. listopadu 2023).
- Prowse, T.D. et al. (2006). "Climate Change Effects on Hydroecology of Arctic Freshwater Ecosystems." *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 35(7), pp.347-358. Dostupné na: [https://doi.org/10.1579/0044-7447\(2006\)35\(347:CCEOHO\)2.0.CO;2](https://doi.org/10.1579/0044-7447(2006)35(347:CCEOHO)2.0.CO;2).
- Qi, X., Li, NA., NAhao, C., NAhang, Q. & NAhou, Y. (2023). "Environmental impacts of Arctic shipping activities: A review." *Ocean & Coastal Management*. Dostupné na: <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2023.106936> (cit dne: 19. března 2024).
- Rabe, B. et al. (2022): "Overview of the MOSAiC expedition: Physical oceanography", *Ocean Science*. (Online) Dostupné na: <https://online.ucpress.edu/elementa/article/10/1/00062/119792/Overview-of-the-MOSAiC-expedition-Physical> (cit dne 28. ledna 2024).
- Repeta, D.J. et al. (2017). "Organic Nutrient Chemistry and the Marine Microbiome". In: National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine; Division on Earth and Life Studies; Board on Chemical Sciences and Technology; Chemical Sciences Roundtable, ed. *The Chemistry of Microbiomes: Proceedings of a Seminar Series*. Washington, DC: National Academies Press (US).
- Ripple, W. J., Wolf Ch., Gregg H. W., Rockström J., Newsome T. M., Law B. E., Marquena L., Lenton T. M., Xu Ch., Huq S., Simons L. a King Sir D. A., 2023: 'The 2023 state of the climate report: Entering uncharted territory', *BioScience*, biad080. Dostupné na: <https://doi.org/10.1093/biosci/biad080> (cit. dne: 18. listopadu 2023)
- Robillard, A., Therrien, J.F., Gauthier, G., Clark, C.M. a Bêty, J. (2016): "Pulsed resources at tundra breeding sites affect winter irruptions at temperate latitudes of a top predator, the snowy owl." *Oecologia*, 181(1), pp. 423–433. Dostupné na: <https://doi.org/10.1007/s00442-016-3588-3> (cit dne: 8. března 2024).
- Rudels, B. a Carmack, E. (2022): "Arctic Ocean Water Mass Structure and Circulation", *Oceanography*. (Online) Dostupné na: <https://doi.org/10.5670/oceanog.2022.116> (cit. dne: 3. prosince 2023).
- Saebi, M., Xu, J., Curasi, S.R., et al. (2020). "Network analysis of ballast-mediated species transfer reveals important introduction and dispersal patterns in the Arctic." *Scientific Reports*, 10(19558). Dostupné na: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-76602-4> (cit. dne: 22. března 2023).
- Schaefer K., Lantuit H., Romanovsky V. E., Schuur E. A. G. a Witt R., 2014: 'The impact of the permafrost carbon feedback on global climate', *Environmental Research Letters*, 9(8), 085003. (Online) Dostupné na: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/8/085003> (cit. dne: 22. listopadu 2023).
- Serrenae M.C., Barry R.G., 2011: 'Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis', *Global and Planetary Change*, Volume 77, Issues 1–2, Pages 85-

96. ISSN 0921-8181. Dostupné na: <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2011.03.004>. (cit. dne 22. listopadu 2023).

Sluijs A., Schouten S., Pagani M., Woltering M., Brinkhuis H., Damsté J. S. S., Dickens G. R., Huber M., Reichart G.-J., Stein R., Matthiessen J., Lourens L. J., Pedentchouk N., Backman J., Moran K. a the Expedition 302 Scientists, 2006: 'Subtropical Arctic Ocean temperatures during the Palaeocene/Eocene thermal maximum', *Nature*, 441, pp. 610-613, (online) Dostupné na: <https://doi.org/10.1038/nature04668> (cit. dne 28. října 2023).

Smith, P., McKinnon, L., Meltofte, H., Lanctot, R.B., Fox, A.D., Leafloor, J.O., Soloviev, M., Franke, A., Falk, K., Golovatin, M., Sokolov, V., Sokolov, A. a Smith, A.C. (2020): "Terrestrial biodiversity in a rapidly changing Arctic: Status and trends of tundra birds across the circumpolar Arctic." *Ambio*. Dostupné na: <https://doi.org/10.1007/s13280-019-01308-5> (cit. dne 28. října 2023).

Svenning, J.-C., Eiserhardt, W.L., Normand, S., Ordonez, A., & Sandel, B. (2015). "The Influence of Paleoclimate on Present-Day Patterns in Biodiversity and Ecosystems." *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 46, 551–572. Dostupné na: <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-112414-054314> (cit. dne 08. března 2023).

Tape, K.D., Jones, B.M., Arp, C.D., Nitnae, I. a Grosse, G. (2018): "Tundra be dammed: Beaver coloninaation of the Arctic." *Global Change Biology*. Dostupné na: <https://doi.org/10.1111/gcb.14332> (cit. dne 28. října 2023).

Tarling, G.A., Freer, J.J., Banas, N.S., Belcher, A., Blackwell, M., Castellani, C., Cook, K.B., Cottier, F.R., Daase, M., Johnson, M.L., Last, K.S., Lindeque, P.K., Mayor, D.J., Mitchell, E., Parry, H.E., Speirs, D.C., Stowasser, G. a Wooton, M. (2022): "Can a key boreal *Calanus* copepod species now complete its life-cycle in the Arctic? Evidence and implications for Arctic food-webs." *Ambio*, 51, pp.333–344. Dostupné na: <https://doi.org/10.1007/s13280-021-01667-y> (cit. dne 28. října 2023).

Terhaar, J., Leaerwald, R., Regnier, R., Gruber, N. a Bopp, L. (2021): "Around one third of current Arctic Ocean primary production sustained by rivers and coastal erosion", *Nature Communications*, 12, 169. Dostupné na: <https://doi.org/10.1038/s41467-020-20470-na> (cit. dne: 30. ledna 2023).

Toumoulin A., Donnadiou Y., Ladant J.-b., Batenburg S. J., Poblete F., Dupont-nivet G., 2020: 'Quantifying the Effect of the Drake Passage Opening on the Eocene Ocean'. (online) Dostupné na: DOI: 10.1029/2020PA003889 (cit. dne 28. října 2023).

Turner J., Barrand N., Bracegirdle T. J., Convey P., Hodgson D. A., Jarvis M, Jenkins M., Marshall G., Meredith M. P., Roscoe H., Shanklin J., French J., Gooose H., Guglielmin M., Gutt J., Jacobs S., Kennicutt II. M. C., Masson-Delmotte V., Mayewski P., Navarro F., Robinson S., Scambos T., Sparrow M., Summerhayes C., Speer K., a Klepikov A., 2014: 'Antarctic Climate Change and the Environment: an Update.' *Polar Record*, vol. 50, no. 3, pp. 237–259., doi:10.1017/S0032247413000296.

Taylor, J.J., Lawler, J.P., Aronsson, M. et al. (2020). "Arctic terrestrial biodiversity status and trends: A synopsis of science supporting the CBMP State of Arctic

Terrestrial Biodiversity Report." *Ambio*, 49, 833–847. Dostupné na: <https://doi.org/10.1007/s13280-019-01303-w> (cit dne 10. února 2024).

University of Illinois., 2014: 'Alfred Wegener: Building a Case for Continental Drift', (online) Dostupné na: <https://publish.illinois.edu/alfredwegener/evidence/> (cit. 28 October 2023).

Uryupova, E. (2023). "Climate Change as a Factor Impacting Current and Future Commercial Fisheries in the Arctic Region." Article, *Climate and Environment, Natural Resources and Energy, SVALFISH*. Dostupné na: <https://www.thearcticinstitute.org/climate-change-factor-impacting-current-future-commercial-fisheries-arctic-region/> (cit dne: 18. března 2024).

Webb, P. (n.d.). "6.2 Temperature", *Introduction to Oceanography*. Dostupné na: <https://rwu.pressbooks.pub/webboceanography/chapter/6-2-temperature/> (cit. dne: 3. prosince 2023).

Wegener A., 2014: 'Building a Case for Continental Drift' (online). Dostupné na: <https://publish.illinois.edu/alfredwegener/evidence/> (cit. 2023-10-28).

Weider, L. a Hobæk, A. (2000). "Phylogeography and Arctic biodiversity: a review." *Annales Zoologici Fennici*, 37.

Wojcnaulanis-Jakubas, K., Jakubas, D. a Stemniewiczna, L. (2022): "The Little Auk *Alle alle*: an ecological indicator of a changing Arctic and a model organism." *Polar Biology*, 45, pp.163–176. Dostupné na: <https://doi.org/10.1007/s00300-021-02981-7> (cit dne: 18. února 2024).

World Meteorological Organization. (2023). "Greenhouse Gas concentrations hit record high. Again." (online) Dostupné na: <https://wmo.int/news/media-centre/greenhouse-gas-concentrations-hit-record-high-again> (cit dne: 25. března 2024).

