



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

GEOINŽENÝRSTVÍ JAKO MOŽNOST ŘEŠENÍ KLIMATICKÉ ZMĚNY

GEOENGINEERING AS A SOLUTION TO CLIMATE CHANGE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Daniel Pól

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. František Lízal, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Energetický ústav
Student:	Daniel Pól
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	doc. Ing. František Lízal, Ph.D.
Akademický rok:	2022/23

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Geoinženýrství jako možnost řešení klimatické změny

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Student provede rešerši geoinženýrských metod pro snížení dopadů klimatických změn. Důraz bude kladen zejména na metody injektáže aerosolových částic do atmosféry. V rámci práce student vyhledá a zpracuje informace o člověkem vytvářených i přírodních částicích v ovzduší, jejich zdrojích a mechanismech, kterými ovlivňují životní prostředí. Dále se pokusí kvantifikovat potřebná množství a nejvhodnější charakteristiky částic pro tuto aplikaci.

Cíle bakalářské práce:

Provést rešerši geoinženýrských metod jako způsobu mitigace klimatické změny. Zaměřit se zejména na možnosti injektáže či jiného způsobu rozptylování aerosolových částic. Kvantifikovat potřebná množství, technické nároky a ekonomické náklady jednotlivých geoinženýrských metod. Zhodnotit použitelnost a vhodnost geoinženýrství jako nástroje mitigace klimatické změny.

Seznam doporučené literatury:

FAWZY, S., A. I. OSMAN, J. DORAN AND D. W. ROONEY Strategies for mitigation of climate change: a review. Environmental Chemistry Letters, Nov 2020, 18(6), 2069-2094.

LAWRENCE, M. G., S. SCHAFER, H. MURI, V. SCOTT, et al. Evaluating climate geoengineering proposals in the context of the Paris Agreement temperature goals. Nature Communications, Sep 2018, 9.

VARDY, M., M. OPPENHEIMER, N. K. DUBASH, J. O'REILLY, et al. The Intergovernmental Panel on Climate Change: Challenges and Opportunities. In A. GADGIL AND T.P. TOMICH eds. Annual Review of Environment and Resources, Vol 42. 2017, vol. 42, p. 55-75.

GAGNON, B., R. LEDUC AND L. SAVARD From a conventional to a sustainable engineering design process: different shades of sustainability. Journal of Engineering Design, Jan-Mar 2012, 23(1-3), 49-74.

OWUSU, P. A. AND S. ASUMADU-SARKODIE A review of renewable energy sources, sustainability issues and climate change mitigation. Cogent Engineering, 2016, 3(1).

Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně / Technická 2896/2 / 616 69 / Brno

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalářská práce obsahuje stručné shrnutí dosavadní poznatků ke geoinženýrským metodám. Rešerše zahrnuje jejich historii a dosavadní pokusy a popisuje chování a potenciální využití aerosolů v atmosféře. Následuje charakteristika čtyř hlavních metod aktivního geoinženýrství společně se zhodnocením jejich výhod a nevýhod. Poslední část je věnována geopolitickým dopadům geoinženýrských aktivit na společnost.

Klíčová slova

aerosoly, zmírnění klimatické krize, globální oteplování

ABSTRACT

The bachelor thesis contains short summary of current knowledge about the geoengineering methods. The research includes their history and all experiments made so far and describes the behaviour and potential utilization of aerosols in the atmosphere. Following chapters characterize four main methods of active geoengineering together with evaluation of their advantages and disadvantages. The last part of the thesis is devoted to the geopolitical impacts of geoengineering activities on society.

Key words

aerosol, climate crisis mitigation, global warming

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PÓL, Daniel. *Geoinženýrství jako možnost řešení klimatické změny*. Brno, 2023. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/145806>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce František Lízal.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem *bakalářskou* práci na téma **Geoinženýrství jako možnost řešení klimatické změny** vypracoval(a) samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Jméno a příjmení

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu práce doc. Ing. Františkovi Lízalovi, Ph.D. za obětavý přístup a rady při konzultacích bakalářské práce. Děkuji projektu GA22-17806S. Taktéž děkuji své rodině za podporu během celého studia.

Obsah

1	Úvod	9
1.1	Definice geoinženýrství	9
1.2	Stručná historie geoinženýrských metod	9
1.3	Atmosférické aerosoly	10
2	Pasivní geoinženýrství	11
2.1	Sběr a uskladňování oxidu uhličitého	11
2.2	Zalesňování	11
3	Aktivní geoinženýrství	13
3.1	Aerosolová injektáž	13
3.2	Zjasnění nadmořských mraků	17
3.3	Ztenčování oblaků Cirrus	18
3.4	Vesmírné disky	20
4	Diskuse	23
5	Závěr	25
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	26
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ	29
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	30
	SEZNAM OBRÁZKŮ	31
	SEZNAM TABULEK	32
	SEZNAM PŘÍLOH	33

1 Úvod

Globální klimatická situace se v rámci posledních desítek let viditelně zhoršuje. Padají historické teplotní rekordy, zvyšuje se výskyt extrémního počasí, je pozorováno tání polárních ledovců nebo částečný rozpad oceánských proudů. Hlavním důvodem těchto změn jsou emise skleníkových plynů, a to zejména CO_2 , které zapříčiňují globální oteplování planety. Ačkoli se aktuální ekonomické a politické trendy snaží o zavedení regulací omezujících emise CO_2 a jiných skleníkových plynů, kýžený efekt se nemusí dostavit v dohledné době. Z tohoto důvodu se začaly rozvíjet výzkumy, které by potenciálně mohly zastavit nebo zpomalit zhoršující se klimatickou situaci. Novodobé geoinženýrství zahrnuje možnosti, jak dočasně ochladit planetu na požadovaný teplotní cíl a získat tím více času na řešení emisí spojených zejména s fosilními palivy.

1.1 Definice geoinženýrství

Geoinženýrství jsou ve své podstatě děje a procesy, které ve velkém měřítku ovlivňují globální nebo i lokální přírodní podmínky a mění tak do jisté míry ekosystém planety (Oomen and Meiske, 2021). Avšak v posledních letech je geoinženýrství vnímáno spíše jako způsob, jak zabránit nebo alespoň zmírnit následky zvýšené koncentrace skleníkových plynů (SP) v atmosféře produkované zejména lidskou činností (Fawzy, et al., 2020). Tyto plyny jsou schopné akumulovat určitou část sluneční energie a vytvářejí tak pozitivní energetickou bilanci atmosféry. Měření ukázala, že od dob před industrializací způsobily tyto SP oteplení planety zhruba o $1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pokud by koncentrace SP rostla stejnou měrou jako nyní, očekává se, že by mezi lety 2030 a 2052 mohla být hodnota oteplení asi o $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Fawzy, et al., 2020). Právě lidská činnost, spojená z velké části s výrobou energie a průmyslovými procesy, vytváří tento ekologický problém, protože jak se zdá, skleníkové plyny vznikající přirozenými procesy, jsou součástí rovnovážného ekosystému planety (Keith, 2000). Z tohoto důvodu je jedním z cílů konvenčního geoinženýrství omezit produkci SP, zejména CO_2 (Oomen and Meiske, 2021). Dalším způsobem, jak se vypořádat s negativními vlivy SP, je zachytávání CO_2 přímo z atmosféry pomocí přírodních procesů nebo filtračními technologiemi (Fawzy, et al., 2020). Nejnovějším přístupem k řešení globálního oteplování jsou geoinženýrské metody, které by se aktivně snažily docílit ochlazení planety pomocí negativní energetické bilance. To znamená, že by nedocházelo ke kumulaci energie v atmosféře zapříčiněné zvýšenou koncentrací SP, ale naopak by tyto technologie byly schopny sluneční záření odrazit, odklonit, popřípadě z velké části pohltit a zajistit tak negativní energetickou bilanci (Oomen and Meiske, 2021).

1.2 Stručná historie geoinženýrských metod

Ačkoli se může zdát, že toto odvětví je pouze výstřelkem poslední doby, shledáváme v historii několik událostí, které by se za jistou formu geoinženýrství mohly považovat (Oomen and Meiske, 2021). Zmínky o tom, jak by zvýšená koncentrace CO_2 mohla potenciálně ohrozit stabilitu ekosystému a zapříčinit celkové oteplení, se datují na začátek 20. století (Keith, 2000). Jsou zde zmiňovány problémy spojené s rozsáhlým využíváním fosilních paliv a emisemi CO_2 (Ekholm, 1901). V roce 1977 italský fyzik Cesare Marchetti ve své práci poprvé zmiňuje termín „geoinženýrství“ v souvislosti s možnostmi uchovávání CO_2 (Marchetti, 1977). V té době byly všechny jeho návrhy odmítnuty (Oomen and Meiske, 2021). O 15 let později vydávají dva vědci David Keith a Hadi Dowlatabadi článek o důležitosti geoinženýrství jako potenciální pomoci v boji s globálním oteplováním (Keith and Dowlatabadi, 1992). O rozvinutí výzkumu v oblasti

aerosolů a jejich vstřikování do atmosféry se zasloužil v roce 2006 Paul Crutzen, který publikoval článek o vstřikování aerosolů do atmosféry a podobných technologiích, spojených s minimalizováním škod, způsobených emisemi CO₂ (Crutzen, 2006).

1.3 Atmosférické aerosoly

Atmosférické aerosoly (AA) jsou částice běžně se vyskytující v naší atmosféře. Skládají se ze směsi pevných a kapalných částic a mohou být přírodního i antropogenního původu. (Hinds, 1983) AA jsou v atmosféře ovlivňovány celou řadou fyzikálních jevů jako je vypařování, kondenzace a také chemickými reakcemi. (Hinds, 1983) Přírodní AA zahrnují zejména prach odnesený větrem, mořskou sůl či prach vytvořený vulkanickou činností. Za rok se přírodních AA dostane do ovzduší okolo 3000 megatun, zatímco lidskou činností vzniklé aerosoly mají zhruba šestinovou hmotnost a jsou tvořeny primárně emisemi. (Hinds, 1983) Životnost AA v atmosféře je velmi spjata s nadmořskou výškou, ve které se částice nacházejí. V troposféře, do výšky 15 km nad mořem, mohou aerosoly vydržet až několik dní, avšak ve stratosféře, do 50 km nad mořem, mohou setrvat i 2 roky. (Hinds, 1983) Existují dva hlavní procesy, kterými se AA dostávají zpět na povrch. Jedná se o tzv. rainout, což je jev, při kterém se z částic stávají zárodky pro tvorbu dešťových kapek, a následně jsou ve formě deště sneseny zpět na povrch. Druhý proces se nazývá washout, kdy jsou částice smeteny již vzniklými srážkami. (Hinds, 1983) Z hlediska geoinženýrství jsou velice důležité děje probíhající v atmosféře, jenž mají zásadní vliv na chování AA. Hlavním dějem je nukleace aerosolů, což je vznik částic z přesyceného plynného roztoku. Rozlišujeme dva druhy – homogenní a heterogenní nukleaci. Homogenní nukleace se vyznačuje absencí kondenzačních jader, tudíž částice mohou vznikat samovolně. U heterogenní nukleace je bezpodmínečně nutná přítomnost kondenzačních jader pro tvorbu aerosolů. Důležitou součástí atmosféry je ozónová vrstva nacházející se v nižších vrstvách stratosféry, která absorbuje velké množství slunečního záření. Dopadajícím zářením se ohřívá a vytváří teplotní inverzi, která stabilizuje tuto oblast atmosféry.

2 Pasivní geoinženýrství

Pasivní geoinženýrství zahrnuje postupy a metody, které mají za cíl zachytávat CO₂ přímo z atmosféry, uskladnit jej a popřípadě přeměnit do jiných využitelných forem. Jednou z nich může být navázání CO₂ pomocí živých organismů nebo uskladnění pro další průmyslové využití. Tato redukce skleníkových plynů může vést ke snižování globální průměrné teploty a zlepšení klimatické situace.

2.1 Sběr a uskladňování oxidu uhličitého

Tento způsob vypořádání se s problematickým CO₂ je jednou ze slibných technologií, která by měla být uplatněna zejména v průmyslových odvětvích (Fawzy, et al., 2020). Technologie je založená na zachytávání CO₂ při procesech spojených s fosilními palivy jako je uhlí, ropa nebo zemní plyn. Následně je tento plyn zkapalněn kvůli snadnější přepravě a lepším podmínkám skladování (Fawzy, et al., 2020). Takto zkapalněné CO₂ by se následně uchovávalo v již vyčerpaných ložiscích ropy nebo zemního plynu (Vinca, et al., 2018). Největším problémem tohoto způsobu skladování je potenciální únik, který by mohl mít velmi špatný dopad na životní prostředí (Ma, et al., 2020).

Tento přebytečný zkapalněný plyn by mohl být použit jako výchozí surovina pro některé chemické a biochemické děje v průmyslu (Qin, et al., 2020). Ačkoli v současnosti některé projekty, zabývající se touto technologií, již existují, zdá se, že jejich dopad na problematiku globálního oteplování není příliš relevantní.

Dosavadní projekty jsou schopny zachytit ročně okolo 2,4 megatun CO₂, avšak jak vyplývá z výpočtů, množství potřebné pro signifikantnější efekt se pohybuje okolo 1500 megatun CO₂ zachyceného ročně (Fawzy, et al., 2020).

2.2 Zalesňování

Zalesňování je jednou z nejlepších metod uchovávání CO₂ přírodní cestou, která s sebou nese velkou škálu pozitivních dopadů na životní prostředí (Fawzy, et al., 2020). Existují dva dominantní způsoby zalesňování.

Prvním je založení nového lesa na zcela nové ploše. Tento způsob ovšem naráží na svoje limity spojené s obrovskou poptávkou po zemědělské půdě a nových obytných zónách, které výrazně snižují možnosti implementace této metody.

Druhým typem je opětovné zalesnění vykácených nebo jinak poničených ploch již existujících lesů. Tímto způsobem by bylo vyřešeno dilema vytvořené nedostatkem nových vhodných ploch pro výsadbu dřevin. Ovšem základem účinnosti této technologie je správná výsadba (Fawzy, et al., 2020).

Výhodou této metody je řada pozitivních vedlejších efektů. Takovýto biotop zajišťuje biodiverzitu, která je v posledních desetiletích potlačována v důsledku zvýšení zemědělské produktivity (Harper, et al., 2018). Poskytuje určitou ochranu proti povodním a stabilizuje půdu. Taktéž zlepšuje kvalitu půdy, vody a vzduchu (Harper, et al., 2018).

Přírodní katastrofy, jako rozsáhlé požáry, dlouhá období sucha, nemoci dřevin nebo chemické havárie, jsou největšími nevýhodami lesů, které mohou způsobit jejich nefunkčnost (Fawzy, et al., 2020). Dalším problémem je relativně krátká životnost, která se pohybuje v rozmezí 20 až 100 let (Fawzy, et al., 2020).

Vzhledem ke vzrůstajícím požadavkům na zemědělskou půdu je vhodná plocha pro zalesňování odhadovaná na 500 Mha, která by měla potenciál zachytit přibližně 0,5–3,6 giga tun CO₂ ročně. Cena za jednu tunu CO₂ zachyceného z ovzduší se odhaduje na 5–50 amerických dolarů (Fuss, et al., 2018).

3 Aktivní geoinženýrství

V rámci aktivního geoinženýrství jsou představeny technologie, které mají snahu aktivně ochlazovat planetu a napomoci zmírnění nežádoucích efektů globálního oteplování. Ve velké míře jsou zde zastoupeny metody zahrnující využití aerosolů, které ukázaly velký potenciál ohledně řešení klimatické krize. Největším vědeckým uskupením, zabývajícím se touto problematikou, je Projekt GLENS (Geoengineering Large Ensemble), který se skládá z celé řady simulací zobrazujících chování aerosolů v atmosféře.

3.1 Aerosolová injekce

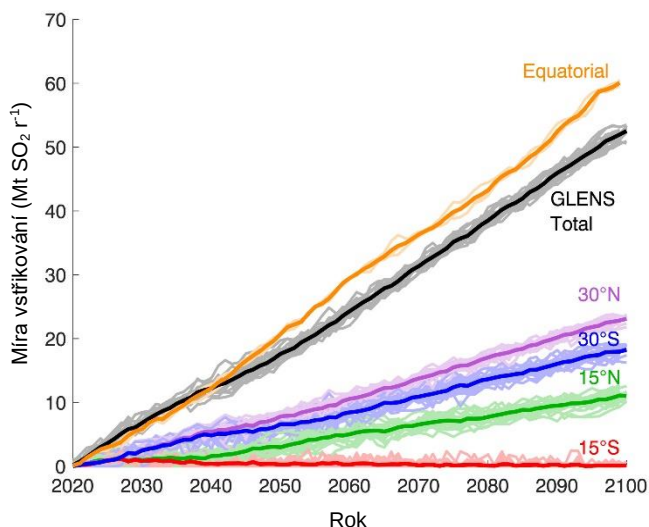
SAI (Stratospheric aerosol injection) je geoinženýrská metoda zvyšující odrazivost planety pomocí vypouštění určitých částic do atmosféry. Jako jeden z prvních toto řešení navrhl v roce 1982 ruský klimatolog Budyko, který předpokládal, že vypuštěním 10^7 tun částic oxidu siřičitého (SO_2) ročně bychom mohli negovat nepříznivý vliv CO_2 v atmosféře (Keith, 2000). V roce 1991 došlo k obrovské erupci sopky na Filipínách, při které se do vzduchu vzneslo 15 až 30 megatun SO_2 . Tento oblak plynu dokázal efektivně odrážet sluneční paprsky a zapříčinil tak globální ochlazení přibližně o $0,5^\circ\text{C}$ (Zhang, et al., 2015).

SAI má za cíl simulovat tento přírodní jev díky umělému vypouštění částic SO_2 do stratosféry (Lawrence, et al., 2018). Modelové simulace a předchozí data z erupcí sopek naznačují maximální chladicí efekt kolem 2 až 5 W/m^2 (Lawrence, et al., 2018). Zkoumáním možností dopravy částic do stratosféry bylo zjištěno, že je velice efektivní použití letecké, zejména armádní techniky, avšak s nutností provést potřebné úpravy na současných modelech.

Takovýto způsob přepravy se odhaduje na 3,5 miliardy dolarů jako počáteční investice, s ročními provozními náklady v hodnotě 2,25 miliardy dolarů, tedy přibližná cena se pohybuje v řádu 1500 dolarů na tunu SO_2 (Smith and Wagner, 2018). Ovšem zásah do přirozeného cyklu takovýchto rozměrů s sebou nese řadu rizik.

Pro upřesnění chování aerosolů ve stratosféře vznikla řada studií pracujících s různými počítačovými modely zemské atmosféry a odlišným pojetím dané problematiky. Zásadní otázkou je, jak velký efekt od SAI požadujeme s ohledem na cílovou teplotu vzduchu těsně nad povrchem planety. Na základě požadavků „Pařížské dohody o klimatických změnách“ z roku 2015 je u většiny studií stanovená cílová teplota, která nesmí překročit globální hodnoty teplot z dob před průmyslovou revolucí o 2 nebo $1,5^\circ\text{C}$ (Lawrence, et al., 2018). Dalšími faktory pro rozhodování jsou množství potřebných částic k dosažení určeného teplotního cíle a způsob rozmístění částic podél stratosféry.

Nejprve se uvažovalo o tom, že nejefektivnější SAI bude při vypouštění částic v tropických oblastech z toho důvodu, že masivní tropické proudění roznese částice téměř rovnoměrně po celé zeměkouli (Keith, 2000). Jak ale naznačují další výzkumy, objevují se zde účinnější způsoby rozmístění. Například v projektu GLENS simulovali vstřikování ve čtyřech konkrétních místech a to 15°s./j.š., 30°s./j.š. a 180°v.d. viz obr. 1. Ukázalo se, že u tohoto typu rozmístění lze použít menší množství částic při zachování stejné průměrné teploty (Kravitz, et al., 2019).



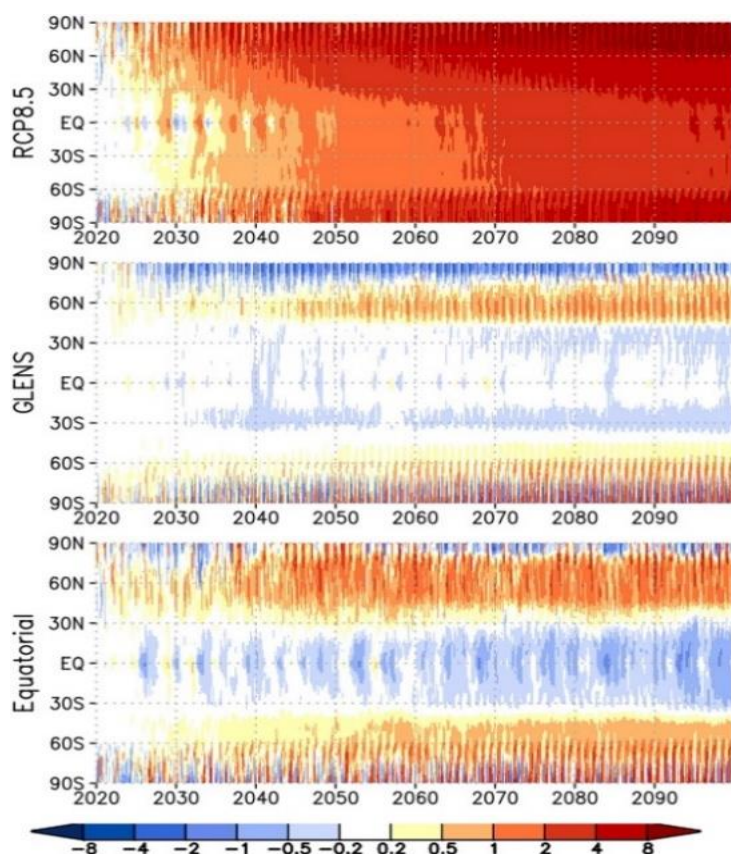
Obrázek 1 Porovnání množství použitých částic (Kravitz, et al., 2019)

Zajímavých výsledků bylo dosaženo při simulacích, jak různá roční období při vypouštění částic ovlivňují optimální optickou hloubku aerosolů neboli AOD, a čeho lze pomocí těchto znalostí docílit. Ve studii z roku 2021 zkoumali, v jaké části roku je nejefektivnější začít s vypouštěním SO₂ částic, aby jejich AOD dosáhla svého maxima na konci první poloviny roku. Studie pracuje s teorií, ve které předpokládá, že účinnost aerosolů v prosinci, lednu a únoru klesá, a naopak roste v červnu, červenci a srpnu, kdy jsou schopny odrazet největší množství sluneční energie, a tím umožnit snížení průměrné teploty (Lee, et al., 2021). Závěry výzkumu naznačují, že vypouštěním aerosolů na jaře (březen, duben, květen), oproti stálému vypouštění po celý rok, dosahují hodnoty AOD nejvyšších čísel v letních měsících, a tudíž se jeví jako účinnější strategie. Zároveň v tomto případě dochází k významnému zmírnění tání ledovců na obou pólech a minimalizují se lokální teplotní anomálie oceánů (MacMartin and Kravitz, 2019).

Co do počtu částic, simulace se různí v závislosti na efektivitě dané strategie. Ne vždycky je dosažen stejný teplotní cíl za stejně dlouhou dobu, ale vesměs se výsledky pohybují mezi 4 až 25 megatunami SO₂ v průměru za rok (Tilmes, et al., 2020). V České republice emise SO₂ za rok 1990 činily zhruba 2 megatuny. Odhadované průměrné roční náklady takovýchto technologií by v nejlepším případě činily 6 miliard dolarů, respektive 38 miliard dolarů.

Největším otazníkem SAI jsou vedlejší efekty přítomnosti takového množství SO₂ částic v atmosféře. Jak ukazují studie, aerosoly kromě průměrné globální teploty, ovlivňují i řadu dalších faktorů, na které je potřeba poukázat.

Jedním z nich jsou teplotní extrémy, které vznikají ve všech zatím provedených simulacích. Proto je zde snaha vytvořit takovou strategii, která by tyto vlastnosti SAI mírnila. Například studie z roku 2019 simulovala rozdíly mezi EQ (Equatorial injection) a GLENS (The Geoengineering Large Ensemble) právě s ohledem na teplotní extrémy. Zkoumala teplotní gradienty mezi polokoulemi a teplotní gradienty od pólů k rovníku při zachování stejné průměrné teploty obou strategií. Všechny případy prokázaly menší teplotní gradienty u GLENS, tudíž menší výskyt lokálních extrémů při povrchu planety i na hladinách moří (Kravitz, et al., 2019).



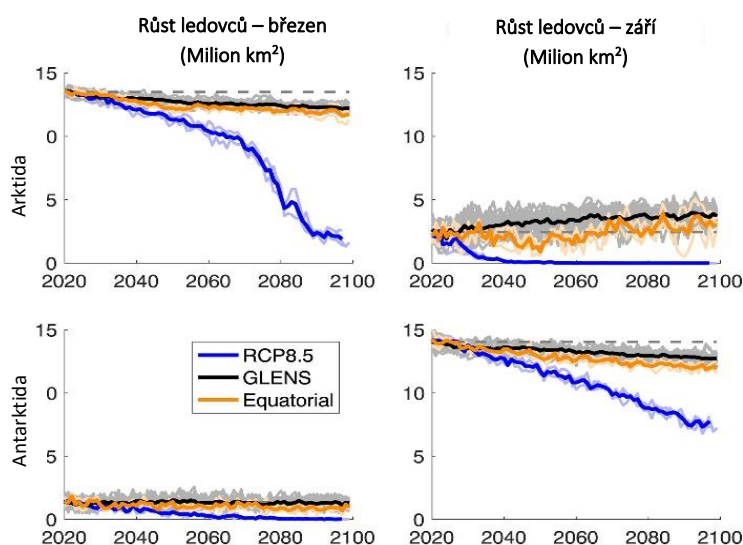
Obrázek 2 Porovnání teplotních změn
(Kravitz, et al., 2019)

Na obrázku 2 je vyobrazeno porovnání, jak obě strategie ovlivňují teplotu v různých částech planety oproti stávajícímu trendu. V horní části je zřejmý stoupající trend teploty bez zásahu geoinženýrských technologií, jejichž účelem je tomuto stavu zabránit. Dalším důležitým hlediskem jsou malé teplotní rozdíly v prostředním grafu a velký ochlazovací efekt na severním pólu u strategie GLENS. Vysoká účinnost na severním pólu zpřičňuje zpomalení nebo úplné zastavení tání ledovců v této oblasti. Zajímavá oblast u EQ je kolem 60° s.š., kde dochází naopak k navýšení průměrných teplot. Tento jev je velmi nežádoucí z důvodu snížení efektivity, a proto je zde snaha vymyslet efektivnější způsob vstřikování aerosolů. Negativně zasažené oblasti by byly severní Amerika a Evropa.

Teplotní extrémy oceánu úzce souvisí s indexem Atlantické meridionální cirkulace (AMOC), což popisuje míru proudění v Atlantickém oceánu. Ta se za poslední desetiletí v důsledku globálního oteplování zmenšuje. Zdá se, že i SAI má na AMOC jistý vliv. V některých případech umožňují SAI metody zmírnit pokles indexu AMOC a zabránit rozpadu důležitého Golfského proudu (Tilmes, et al., 2020).

Hlavním sledovaným elementem jsou srážky a na to navázaná úrodnost půdy. Například EQ dosahuje větších průměrných srážek oproti současnosti, ovšem vytváří nezanedbatelné lokální extrémy, které nejsou v tomto ohledu žádoucí (Kravitz, et al., 2019). Naopak GLENS nemá tak velký nárůst průměrných srážek, ale zároveň zachovává určitou stálost. Tudíž z velké části eliminuje tyto lokální extrémy, což přispívá i k lepší zemědělské produkci (Tilmes, et al., 2020). Tento pozitivní efekt dále podporuje ochlazování planety, jelikož větší masa rostlinných organismů je schopna spotřebovat větší množství nepříznivého CO₂ z atmosféry.

Ledovce, zejména jejich plocha, je v poslední době velmi častým tématem, a i v této oblasti vykazují SAI metody výsledky. Vesměs všechny strategie mají příznivý vliv na tání ledovců do určité míry (Jiang, et al., 2019). Teprve nedávná studie dokázala tento vliv podrobněji zkoumat (viz obr. 3), a to za pomoci strategie GLENS s využitím maximální AOD v letních měsících. Simulace naznačují, že by takovýto způsob vstřikování mohl výrazně zpomalit tání ledovců na obou pólech. V jednom případě dokonce došlo k mírnému nárůstu plochy ledovců (MacMartin and Kravitz, 2019).



Obrázek 3 Velikost plochy ledovců
(Kravitz, et al., 2019)

Některé simulace ukazují, že pomocí SAI by bylo možné zacelovat ozónové díry nad Antarktidou (Tilmes, et al., 2020).

Vědci zároveň upozorňují, že výsledky vzešlé ze simulací SAI nemusí vždy plně korespondovat s reálnými dopady těchto metod na životní prostředí, protože není možné zcela přesně simulovat komplexní systém, jako je globální proudění vzduchu a moří (Keith, 2000). Jelikož jsou zde tyto technické limitace, každý experiment v reálných podmínkách umožňuje této problematice více porozumět. Pokusy v malém měřítku bohužel nemají vypovídající hodnotu oproti globálním situacím a rozsáhlé experimenty nejsou možné z politických důvodů. Protože SAI ovlivňuje každý region odlišně (viz obr. 2), není aplikace větších rozměrů možná bez mezinárodních smluv. Jelikož by plná implementace ovlivňovala všechny státy na planetě, bude zapotřebí jejich souhlas. Vzniklé teplotní výkyvy ovšem nemusí být stejné pro všechny zúčastněné, a tudíž je zde riziko, že hůře zasažené oblasti nebudou akceptovat použití SAI. Z tohoto důvodu je před nasazením geoinženýrských metod nutné zajistit, aby zástupci všech států plně chápali složitost celé situace i s potenciálními riziky.

3.2 Zjasnění nadmořských mraků

Obdobně jako u SAI, má tato metoda za cíl kompenzovat nepříznivé účinky globálního oteplování pomocí vypouštění aerosolových částic do atmosféry. Avšak zde se aerosoly používají s rozdílným záměrem. Hlavní myšlenkou této strategie je rozptýlení mořské vody v podobě velmi jemné mlhy do nižších vrstev atmosféry (Reynolds, 2019). Zde by docházelo k odpařování vodní složky této mlhy a vznikaly by tak částice mořských solí, které by sloužily k tvorbě nových mraků stratokumulus neboli slohových kup (Ahlm, et al., 2017). Předpokládá se, že by tyto nově vzniklé mraky byly schopny odrážet dostatečné množství sluneční energie a napomoci tím ochlazení planety (Lee, et al., 2021). Z důvodu potřeby velkého množství aerosolových částic počítají vědci s uplatněním tohoto děje zejména nad hladinami oceánu, a proto tato metoda dostala anglické označení „marine sky brightening“ (ve zkratce MSB).



Obrázek 4 Ilustrační foto implementace MSB (Reynolds, 2019)

Z nejnovějších studií vyplývá, že mimo tento zamýšlený efekt by MSB mohlo sdílet podobné účinky se SAI (Ahlm, et al., 2017). Problémem jsou regiony, kde nedochází k častému vzniku potřebných mraků, jako jsou například pouště a jiné tropické oblasti, a tudíž se zde tato metoda jeví jako méně účinná (Muri, et al., 2015). Jak prokázaly další simulace, aerosoly v těchto lokalitách pracují na stejném principu jako u SAI (Ahlm, et al., 2017). Avšak nejsou stejně efektivní jako SAI, protože tyto částice nejsou primárně určeny k odrazení slunečního záření, ale mají napomáhat vzniku mraků. Nicméně jsou částečným řešením nižší účinnosti MSB, jelikož odražené záření může způsobit drobné ochlazení.

Podle některých výzkumů by metoda MSB mohla přinést chladicí efekt kolem 4 W/m^2 s odhadovaným množstvím potřebných částic v řádu stovek megatun mořské soli (Lee, et al., 2021). Zdroje uvádějí 200 až 590 megatun mořské soli ročně v závislosti na požadovaném teplotním cíli (Ahlm, et al., 2017).

Samozřejmě i metoda MSB není bez vedlejších účinků. Největším problémem se zdá být výrazný úbytek srážek zejména nad tropickými oblastmi, které jsou místům působení MSB blízké (Muri, et al., 2015). Mohlo by to mít negativní dopad na růst deštných pralesů a napomáhat desertifikaci (Park, et al., 2019). Další neznámou je vliv na proudění v nižších vrstvách atmosféry na rozdíl od SAI (Ahlm, et al., 2017).

Taktéž se tato metoda potýká s velkou heterogeností účinků. Jelikož se mraky nevytvářejí ve všech místech rovnoměrně, dochází pak k výskytu velkých rozdílů teplot a jiných extrémů. Špatně se ovlivňuje i poloměr aerosolových částic, který se pohybuje v desetinách mikrometru (Ahlm, et al., 2017). Nejefektivnější poloměr takovýchto částic vychází na $0,22 \mu\text{m}$. Je to optimální hodnota k dosažení největší možné radiační plochy s nejmenším počtem částic (Lee, et al., 2021).

Implementace takovéto metody s sebou nese spoustu rizik a neznámých, které jsou bohužel těžko ovlivnitelné, a proto se zvažuje, zdali je MSB jako geoinženýrská metoda vůbec vhodná pro použití v globálním měřítku. Prozatím vznikají další studie a simulace, které nám

snad pomohou pochopit některé z proměnných, aby byla zajištěna větší předvídatelnost účinku MSB.

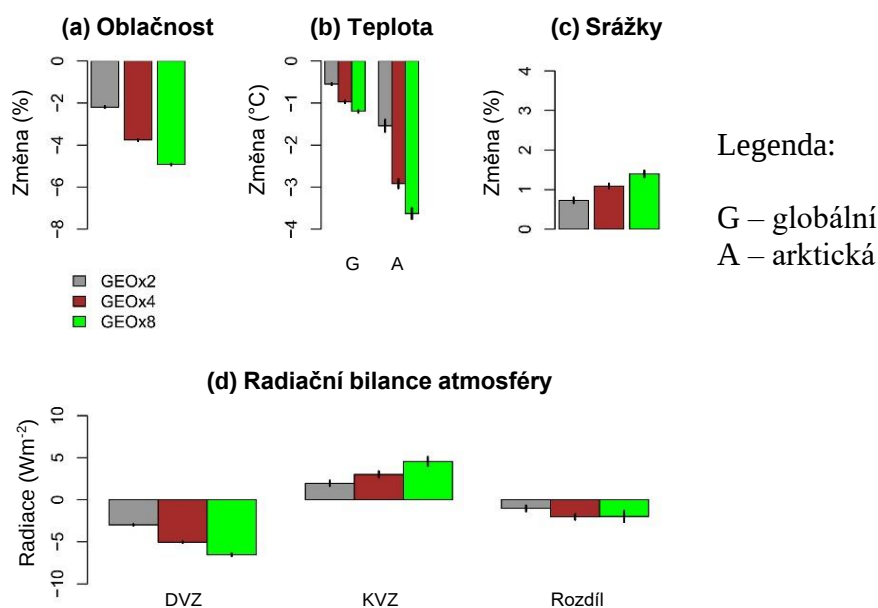
3.3 Ztenčování oblaků Cirrus

Ztenčování oblaků Cirrus, podle anglického Cirrus cloud thinning (CCT), má od předešlých metod jiný princip ochlazování. Místo toho, aby vypouštěné částice samy o sobě odrážely sluneční záření, podporují fyzikální děje vedoucí ke snižování globální teploty planety. Podle teorie se na rozhraní troposféry a stratosféry vytvářejí oblaky Cirrus, které způsobují oteplování tím, že zachycují dlouhovlnné sluneční záření uvnitř atmosféry obdobně jako skleníkové plyny (Muri, et al., 2018). Tyto mraky vznikají ve vrchní vrstvě troposféry mrznutím vodní páry při teplotách kolem $-38\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Lee, et al., 2021).

CCT má za cíl, pomocí vypouštění krystalků ledu do troposféry, usnadnit mrznutí vodní páry, a tím rychleji vytvářet větší a těžší ledové krystaly, které by následně měly padat do nižších vrstev atmosféry (Penner, et al., 2015). Takto vytvořené krystaly by neměly mít schopnost zachytávat dlouhovlnné záření, a tudíž způsobovat zápornou energetickou bilanci (Jackson, et al., 2016).

Průměrná energetická bilance přírodních oblaků Cirrus se odhaduje na -51 Wm^{-2} pro krátkovlnné záření (KVZ) a $+55\text{ Wm}^{-2}$ pro dlouhovlnné záření (DVZ). Z toho vyplývá, že tyto oblaky způsobují oteplování (Jackson, et al., 2016). Avšak umělé přidávání ledových krystalků podporuje heterogenní nukleaci oproti homogenní, ke které dochází při nižším přesycení. Heterogenní nukleace umožňuje tvorbu větších krystalů, které snáze klesají do nižších vrstev atmosféry, a přispívá tak k rozpadu těchto nežádoucích mraků (Muri, et al., 2018).

Právě rozpad mraků je jedním z hlavních faktorů účinku CCT, který určuje účinnost této metody. Čím lepší schopnost vytvořit potřebné podmínky pro heterogenní nukleaci má daná strategie, tím většího chladicího faktoru může dosáhnout. Touto otázkou se zabývali vědci ve studii, zkoumající vliv rychlosti klesajících krystalů na efektivitu CCT (viz obr. 5). Dle této studie rychlost krystalů výrazně ovlivňuje téměř všechny aspekty CCT (Jackson, et al., 2016).

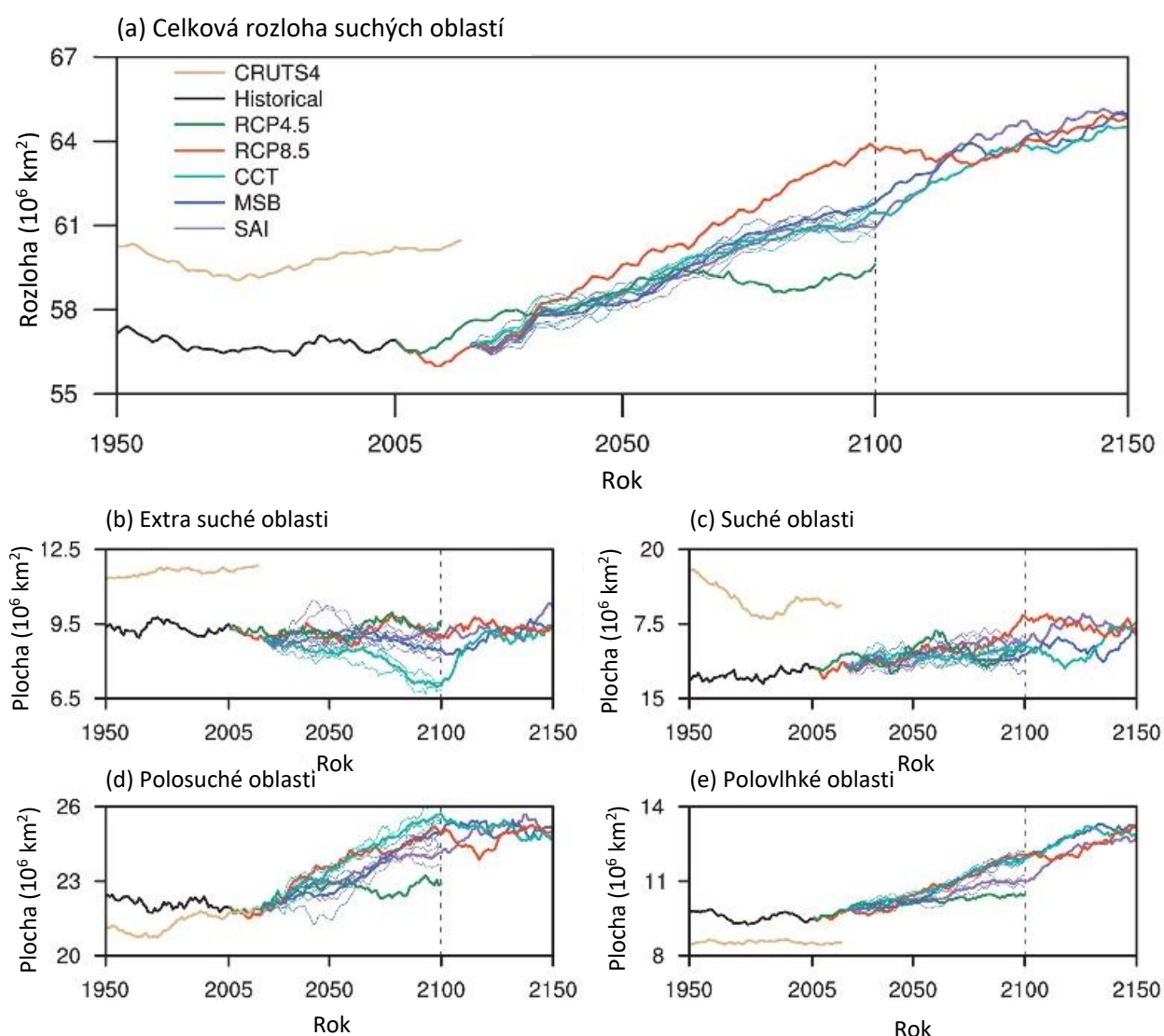


Obrázek 5 Účinky CCT podle rozdílných rychlostí
(Jackson, et al., 2016)

Zdá se, že například oproti SAI nemá CCT takovou ochlazovací schopnost, ale naopak může zvyšovat průměrný roční úhrn srážek (Park, et al., 2019). Kombinace se zvýšenou rychlostí krystalů tento efekt ještě umocňuje (Jackson, et al., 2016). Domníváme se, že by tyto zvýšené srážky mohly ovlivnit zejména nejsušší oblasti (viz obr. 6) a napomoci redukovat jejich plochu (Park, et al., 2019).

Je ovšem potřeba zohlednit míru ochlazování, která se v nejlepších případech uvádí kolem 4 Wm^{-2} (Muri, et al., 2018). Některé výzkumy však uvádějí, že v kombinaci se SAI by se tento aspekt mohl relativně slibně přiblížit užitečným hodnotám (Cao, et al., 2017).

Jednou z nevýhod je těžko předvídatelný nelineární průběh rychlosti krystalů, který by mohl způsobit nízkou účinnost této metody (Cao, et al., 2017).



Obrázek 6 Vliv geoinženýrských metod na rozlohu suchých oblastí (Park, et al., 2019)

Rovněž důležitým faktorem je zajistit co největší homogenní efektivitu CCT napříč všemi pásmy, s výjimkou obou polárních regionů, kde se vyšší účinnost jeví jako velmi přínosná (Penner, et al., 2015). Právě velký ochlazovací efekt na severním a jižním pólu se považuje za jednu z výhod CCT oproti ostatním metodám (Muri, et al., 2018).

Největší obavou je možnost, že vstřikování ledových krystalků bude mít opačný efekt především ten, že tyto krystaly budou naopak podporovat tvorbu mraků Cirrus, a ne jejich rozpad (Penner, et al., 2015).

Proto je stále potřeba zkoumat tento negativní efekt a snažit se o jeho minimalizování nebo úplné odstranění takovéto možnosti.

3.4 Vesmírné disky

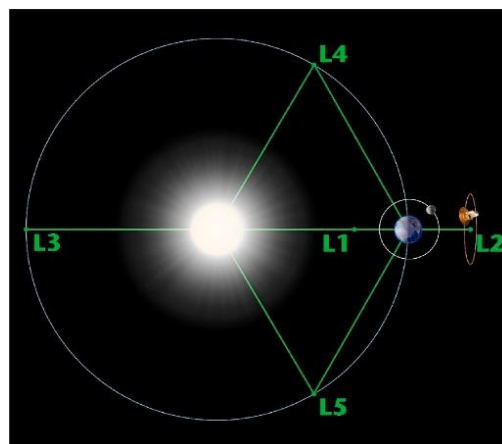
Vesmírné disky neboli „space-based mirrors“ (SBM) je metoda, která se od ostatních významně odlišuje. Totiž jako jediná je zasazena do vesmíru. Jejím primárním cílem je odklonit, odrazit nebo vstřebat příchozí energii v podobě sluneční radiace a změnit tím energetickou bilanci planety (Keith, 2000). V principu jde o umístění objektu mezi Zemí a Sluncem, který bude mít takové vlastnosti, aby umožňoval dostatečné ochlazení planety.

Prvním návrhem bylo vytvoření velkého oblaku prachu, který by byl schopen částečně odrážet, případně vstřebávat určité množství sluneční energie o celkové hmotnosti 2.1×10^{11} tun (McInnes, 2010). Ukázalo se ovšem, že takto velkou masu částic nelze udržet na potřebném místě delší dobu. Bylo by tak nutné opakované doplňování materiálu (Struck, 2007).

Další alternativou je umístění zrcadel, která by sloužila ke stejnému účelu. Avšak je otázkou, jak velká, těžká, a v jaké vzdálenosti by tato zrcadla měla být, aby byla nejúčinnější, a zároveň nejlevnější na výrobu a dopravu (McInnes, 2010). Všechny tyto aspekty jsou úzce propojené a každý nějakým způsobem ovlivňuje ostatní.

Pohledů na to, kde by takováto zařízení měla být umístěna, je několik. Zpočátku se uvažovalo o nízké orbity. Do této pozice by byla doprava nejlevnější, ale byla by zapotřebí velká plocha, která by umožňovala dostatečnou reflektivní schopnost. Další nevýhoda nízké orbity je zvýšené riziko kolizí s ostatními objekty, jako jsou například satelity nebo vesmírný odpad (Baum, et al., 2022).

Druhá strategie uvažuje s konkrétní pozicí mezi Sluncem a Zemí. Musí ovšem splňovat požadavek relativně stabilní orbity. Takovéto místo se nazývá librační centrum nebo Lagrangeův bod. Je to bod soustavy tří těles, v němž se vyrovnávají gravitační síly, a proto si udržuje relativně stabilní polohu (Baum, et al., 2022). Těchto center existuje v naší soustavě několik. Pouze bod L1 vyhovuje potřebám této metody (viz obr. 7). Nachází se přibližně 1.5 milionů kilometrů od Země (McInnes, 2010).



Obrázek 7 Zobrazení Lagrangových bodů (Baum, et al., 2022)

Ve snaze zefektivnit tuto geoinženýrskou metodu, zkoumali vědci optimální velikosti těchto reflektivních prvků. Došli k závěru, že namísto jednoho velkého objektu je výhodnější soustava menších, a to hned z několika důvodů (McInnes, 2010). K zajištění odklonu dostatečně velkého množství sluneční energie je zapotřebí adekvátně rozlehlá plocha. Na první pohled se může zdát, čím větší plocha, tím větší energii bude zamezen průchod (viz rovnice 1). Pravdou je, že takovéto objekty, sloužící k zachycení slunečního záření, fungují jako solární plachetnice, tudíž by zářením ze Slunce byly odsunuty mimo stabilní pozici a vedlo by to

k nefunkčnosti (viz rovnice 2). Tomuto jevu lze zabránit přidáním hmotnosti dané konstrukce (McInnes, 2010).

$$\frac{\delta Q}{Q} = \left(\frac{R_s}{R_o}\right)^2 \left(\frac{r_o}{r_s}\right)^2 \quad (1)$$

$\frac{\delta Q}{Q}$ – relativní změna průchozího záření, R_s – poloměr disku, R_o – poloměr Slunce,
 r_s – vzdálenost disku od Země, r_o – vzdálenost Slunce od Země

$$a_s = \frac{2\kappa P_E A_s}{M_s} \left(\frac{r_o}{r_o - r_s}\right)^2 \quad (2)$$

a_s – zrychlení disku způsobené tlakem slunečního záření, κ – míra odrazivosti disku,
 P_E – tlak slunečního záření, A_s – plocha disku, M_s – celková hmotnost disku,
 r_o – vzdálenost Slunce od Země, r_s – vzdálenost disku od Země

To ovšem vede k výrazně větším nákladům na materiál i dopravu na místo (Fawzy, et al., 2020). Z tohoto důvodu se vědci pokoušeli nalézt optimální rovnováhu mezi těmito dvěma faktory (Baum, et al., 2022). Z výsledků studie vyplývá, že odhadovaná celková hmotnost takovéto technologie se pohybuje v rozmezí mezi 20–260 megatunami a potřebná plocha okolo 5 milionů km² v závislosti na reflektivních vlastnostech materiálů (viz rovnice 4) (McInnes, 2010). S přihlédnutím k těmto aspektům, (viz rovnice 3), se jim povedlo i určit skutečnou optimální vzdálenost, a to 2.36 milionů kilometrů od Země (McInnes, 2010). Zajímavostí je, že celková váha objektů vynesných do vesmíru do této doby činí zhruba 20 megatun.

$$f(r_s) = \left(\frac{r_s}{r_s - r_o}\right)^2 \frac{1}{a_s(r_s)} \quad (3)$$

$f(r_s)$ – funkce vzdálenosti disku od Země podle zrychlení disku,
 r_s – vzdálenost disku od Země, r_o – vzdálenost Slunce od Země,
 $a_s(r_s)$ – zrychlení disku způsobené tlakem slunečního záření

Další podstatnou otázkou je, jestli zcela odrážet sluneční paprsky nebo pouze lámat. Jak ukázal výzkum, pomocí refrakčních disků lze dosáhnout stejného efektu jako u zrcadlových disků i při použití menší plochy (McInnes, 2010). Navíc lom záření umožňuje až dvojnásobnou úsporu hmotnosti materiálu. Problémem těchto optických disků je složitá a dosti nákladná přeprava (McInnes, 2010).

$$\kappa = \frac{1}{2} \left[(1 + \eta) + \frac{2}{3} (1 - \eta) \frac{\varepsilon_F - \varepsilon_B}{\varepsilon_F + \varepsilon_B} \right] \quad (4)$$

κ – míra odrazivosti disku, η – koeficient odrazivosti,
 ε_F – emisivita disku ze strany Slunce, ε_B – emisivita disku za strany Země

Použitím této geoinženýrské metody bychom byli schopni zamezit jakýmkoli vedlejším účinkům v zemské atmosféře, které s sebou nesou ostatní typy aktivního geoinženýrství. Ač se jeví tyto vesmírné disky jako nejlepší možnost z hlediska řešení klimatických změn, ve vědeckých kruzích se o této metodě mluví spíše jako o řešení vzdálené budoucnosti (Baum, et al., 2022). S tímto záměrem je spojena spousta problémů, počínaje komplexní konstrukcí

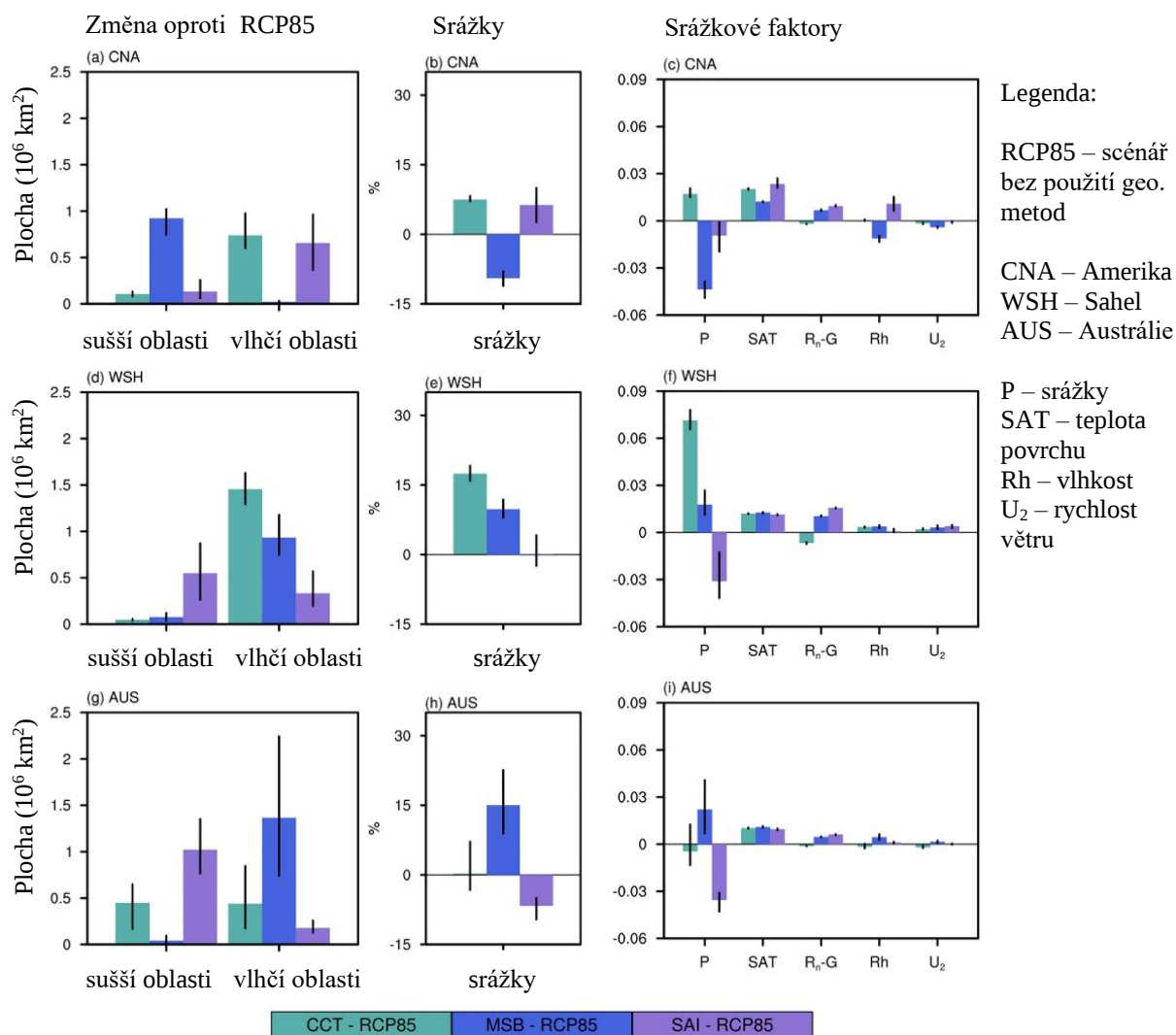
disků, jejich samotnou přepravou na dané místo, nebo aktivním pohonem sloužícím ke korigování polohy disků v případě nepředvídatelných vesmírných jevů (McInnes, 2010).

Po finanční stránce není tato technologie jedna z nejúspornějších, při odhadovaných nákladech mezi 1 až 20 biliony dolary (Baum, et al., 2022). Jedná se zejména o investování do potřebné logistiky a způsobu dopravy. Proto vědci zmiňují, že by se v rámci úspor mohly v budoucnu využít suroviny, nacházející se na blízkých asteroidech, spolu s vývojem pokročilejších těžařských technologií (Baum, et al., 2022). Tudiž prozatím není tato geoinženýrská metoda nejžhavějším kandidátem na reálnou implementaci.

4 Diskuse

Máme-li určit, která geoinženýrská metoda má potenciál na reálnou implementaci, musíme zohlednit celou řadu aspektů. Jednou z primárních vlastností aktivního geoinženýrství je množství energie vyzářené zpět do vesmíru, tzv. intenzita záření. Dosavadní výzkumy ukazují, že horní hranice intenzity záření všech aktivních metod nepřesahuje 5 W/m^2 . V tomto ohledu je můžeme považovat za rovnocenné. Avšak množství částic, potřebných k dosažení stejného radiačního efektu, je různé s ohledem na danou strategii.

Například u SAI strategií EQ a GLENS, které uvažují s potřebným množstvím SO_2 kolem 317, respektive 281 megatun, činí rozdíl 36 megatun (viz obr. 1). Tento pokles znamená úsporu více jak 11 % odhadovaného množství při udržení stejného teplotního cíle. U metody MSB a CCT se množství uvádí kolem 490 megatun mořské soli, respektive 180 megatun ledových krystalů pro dosažení podobného ochlazovacího efektu. Množství částic je u vesmírných disků nahrazeno hmotností potřebnou k výstavbě. Ta se v závislosti na technologii pohybuje průměrně okolo 140 megatun materiálu. Co se týká průměrných ročních srážek, vykazují SAI strategie pokles zhruba o jedno procento, kromě simulace GLENS. Zde se objevuje možnost i mírného zvýšení. MSB a CCT metody stimulují tvorbu srážek o 15, respektive 25 % (viz obr. 8).



Obrázek 8 Vliv geoinženýrství na tvorbu srážek (Park, et al., 2019)

Dalším důležitým ovlivněným faktorem je plocha ledovců na obou pólech. Ledovce jsou obrovským zdrojem vody, tudíž jejich tání je hlavní příčinou vzrůstající mořské hladiny. Některé simulace naznačují, že by se pomocí SAI dalo zpomalit tání a u CCT dokonce zvrátit a umožnit obnovu ledovců.

Musíme brát v úvahu i veškerá rizika spojená s použitím takto rozsáhlých environmentálních zásahů. Nejtěžší výzvou je zajistit co největší homogenní účinek dané metody, tzn. zajistit takový účinek, který nebude mít v průběhu času příliš velké nežádoucí výkyvy. Takovéto výkyvy mohou způsobovat lokální extrémy počasí, které by mohly nepříznivě ovlivnit samotnou účinnost metod. S těmito problémy se potýká zejména metoda MSB, kde ne vždy dochází k rovnoměrnému rozptýlu částic mořské soli. Vznikají tak teplotní i povětrnostní extrémy, které by mohly způsobit přírodní katastrofy. V mnohem menší míře je takto ovlivněno i SAI, ale simulace neprokázaly žádný významný negativní efekt. Daleko větším problémem by u SAI mohl být rychlý úbytek částic v průběhu vstřikování, který by způsobil snížení efektivity a potenciálně vznik kyselých dešťů. Strategií GLENS je ovšem možné tuto skutečnost minimalizovat a zabránit tak nežádoucím účinkům. Potíže se sníženou účinností má taktéž metoda CCT, kde v některých případech mohou krystalky ledu naopak urychlit tvorbu oblaků Cirrus a zapříčít lokální oteplení atmosféry. Podle studií se tomuto dá zřejmě předejít zvýšením rychlosti krystalů při klesání do nižších vrstev atmosféry (viz obr. 5). Ačkoli jsou vesmírné disky od těchto rizik zcela oproštěny, nesou s sebou zcela jiná rizika a nedostatky. Hlavním nedostatkem jsou chybějící technologie, nutné ke zvýšení ekonomičnosti celé metody a její aplikaci.

Z pohledu samotné realizace jsou nejdůležitějším aspektem náklady jednotlivých metod. Nynější poznatky obsahují pouze přibližné nebo spíše odhadované částky. U některých strategií nebyly tyto odhady ani stanoveny. Ale můžeme u některých uvažovat jistou podobnost. Aplikace metody SAI se cenově pohybuje v rámci 1500 dolarů na tunu částic. Což by v případě GLENS činilo 421,5 miliard dolarů celkem v průběhu 80 let. To je asi 5,3 miliard dolarů v průměru za rok. MSB i CCT by se po finanční stránce nemělo příliš lišit z důvodu velmi podobného principu fungování. Avšak CCT bude s větší pravděpodobností dražší, protože je nutné vynést částice do vyšší vrstvy atmosféry. Metoda vesmírných disků je nejdražší možností aktivního geoinženýrství s částkou 50 000 dolarů na tunu materiálu. Celková průměrná cena této metody činí 7 bilionů dolarů. Je to tedy více než 15x dražší přístup než metoda SAI.

Tabulka 1 Srovnání vybraných geoinženýrských metod

Metoda	Množství částic M [Mt]	Intenzita odraženého záření I [W/m^2]	Srážky S [%]	Náklady N [\$ / t]	Celková cena C [10^9 \$]	Efektivita [I/C] · 100
SAI	281	4,8	-1	1500	421,5	1,1388
MSB	490	4,2	+15	≈1500	≈ 735	0,5714
CCT	180	3,5	+25	≈1700	≈ 306	1,1438
SBM	140	3,7	0	50 000	7000	0,0529

5 Závěr

Dosavadní výzkumy naznačují, že nejvhodnější metodou pro brzkou aplikaci by mohla být kombinace SAI společně s CCT. Simulace ukazují pozitivní vlivy na efektivitu ochlazování spojené s kombinovaným efektem těchto metod. SAI zajišťuje dostatečnou zápornou radiační bilanci a CCT kompenzuje některé z negativních účinků SAI. Jsou to zejména srážky a obnova plochy ledovců. Na oba tyto aspekty má CCT žádoucí pozitivní vliv. Toto spojení zahrnuje nejvíce vlastností, potřebných k akutnímu funkčnímu řešení klimatické krize. Ze všech metod jsou nejvíce prozkoumané, dostatečně zmírňují globální oteplování způsobené skleníkovými plyny, vykazují příznivý vliv na ostatní environmentální aspekty, mají rychlý a trvalý účinek a jsou finančně nejvýhodnější.

Přestože se může zdát, že vesmírné disky jsou zcela vyloučeny z možného použití v praxi převážně z technologických důvodů a vysoké finanční náročnosti, můžeme očekávat, že jejich další výzkum přinese nejen konečné řešení globálního oteplování, ale i spoustu jinak prospěšných technologií. Jejich hlavní předností je, vedle své primární funkce ochlazovat planetu, především to, že nejeví žádné jiné vedlejší vlivy na klimatickou situaci. Tudíž se dá říct, že je nejbezpečnější doposud známou metodou, a proto by v budoucnu byla skvělým kandidátem pro implementaci.

Ke zvýšení efektivity aktivního geoinženýrství mohou samozřejmě přispět i jiné vlivy. Například nalezení jiného obnovitelného zdroje energie, který bude schopen plně nahradit dosavadní fosilní paliva nebo výroba syntetických paliv. Jakékoli snížení produkce skleníkových plynů, a to zejména CO₂, bude mít negativní korelaci s mírou ochlazování. Další možností je zoptimalizovat zachytávání CO₂ přímo z atmosféry a jiným způsobem jej zpracovávat.

Při aplikaci SAI metod je důležité znát možné vedlejší efekty. Například při vypouštění SO₂ částic by mohly vznikat mohutné kyselé deště. Zkušenosti s kyselými dešti máme i v České republice, kde zdevastovaly rozsáhlé lesní porosty. Negativní vliv mohou mít tyto srážky i na celkovou úrodnost, která by mohla být velice ovlivněna i sníženou intenzitou slunečního záření v důsledku aerosolů odrážejících právě toto záření. Taktéž vzniklé rozdíly teplot (viz obr. 2) mohou způsobit lokální sucha a poškodit ekonomiku některých států. Současně by teplotní rozdíly mohly změnit důležité proudění větru mezi Afrikou a Jižní Amerikou, které s sebou nese saharský prach. Tyto písečné částice napomáhají k tvorbě srážek nad Amazonským pralesem a zúrodňují ho. Tropické deštné pralesy produkují podstatnou část O₂ na planetě, a proto je nutné zohlednit negativní dopady SAI na tyto oblasti.

Nedílnou součástí problematiky geoinženýrství jsou geopolitické vlivy. Kromě SBM nemohou ostatní metody zaručit stejný výsledek ve všech částech světa. Jsou lokality, na které bude mít aplikace geoinženýrských technologií horší dopad než na jiné. Většina studií a simulací vzniká ve vyspělých zemích, a proto je velmi důležité komunikovat možné scénáře i s ostatními státy. Jelikož jde o globální situaci měla by být snaha zapojit do výzkumu co nejvíce států.

S každým takto masivním zásahem do komplexního systému, jako je klima, musíme čelit jistým rizikům, která by mohla zapříčinit nefunkčnost nebo dokonce opačný efekt těchto metod. A proto je velmi důležité nadále financovat výzkum všech možností, které by dokázaly řešit klimatickou krizi, abychom se dostali do hloubky problematiky a mohli předejít většině nežádoucích efektů.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- Ahlm, L., A. Jones, C. W. Stjern, H. Muri, B. Kravitz and J. E. Kristjansson (2017). "Marine cloud brightening - as effective without clouds." Atmospheric Chemistry and Physics **17**(21): 13071-13087.
- Baum, C. M., S. Low and B. K. Sovacool (2022). "Between the sun and us: Expert perceptions on the innovation, policy, and deep uncertainties of space-based solar geoengineering." Renewable & Sustainable Energy Reviews **158**.
- Cao, L., L. Duan, G. Bala and K. Caldeira (2017). "Simultaneous stabilization of global temperature and precipitation through cocktail geoengineering." Geophysical Research Letters **44**(14): 7429-7437.
- Crutzen, P. J. (2006). "Albedo enhancement by stratospheric sulfur injections: A contribution to resolve a policy dilemma?" Climatic Change **77**(3-4): 211-219.
- Ekholm, N. (1901). "On the variations of the climate of the geological and historical past and their causes." Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society **27**(117): 1-62.
- Fawzy, S., A. I. Osman, J. Doran and D. W. Rooney (2020). "Strategies for mitigation of climate change: a review." Environmental Chemistry Letters **18**(6): 2069-2094.
- Fuss, S., W. F. Lamb, M. W. Callaghan, J. Hilaire, F. Creutzig, T. Amann, T. Beringer, W. D. Garcia, J. Hartmann, T. Khanna, G. Luderer, G. F. Nemet, J. Rogelj, P. Smith, J. L. V. Vicente, J. Wilcox, M. D. Z. Dominguez and J. C. Minx (2018). "Negative emissions-Part 2: Costs, potentials and side effects." Environmental Research Letters **13**(6).
- Harper, A. B., T. Powell, P. M. Cox, J. House, C. Huntingford, T. M. Lenton, S. Sitch, E. Burke, S. E. Chadburn, W. J. Collins, E. Comyn-Platt, V. Daioglou, J. C. Doelman, G. Hayman, E. Robertson, D. van Vuuren, A. Wiltshire, C. P. Webber, A. Bastos, L. Boysen, P. Ciais, N. Devaraju, A. K. Jain, A. Krause, B. Poulter and S. J. Shu (2018). "Land-use emissions play a critical role in landbased mitigation for Paris climate targets." Nature Communications **9**.
- Hinds (1983). "Aerosol Technology Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles - Hinds,Wc." Textile Research Journal **53**(8): 514-514.
- Jackson, L. S., J. A. Crook and P. M. Forster (2016). "An intensified hydrological cycle in the simulation of geoengineering by cirrus cloud thinning using ice crystal fall speed changes." Journal of Geophysical Research-Atmospheres **121**(12): 6822-6840.
- Jiang, J., L. Cao, D. G. MacMartin, I. R. Simpson, B. Kravitz, W. C. Eng, D. Vioni, S. Tilmes, J. H. Richter and M. J. Mills (2019). "Stratospheric Sulfate Aerosol Geoengineering Could Alter the High-Latitude Seasonal Cycle." Geophysical Research Letters **46**(23): 14153-14163.
- Keith, D. W. (2000). "Geoengineering the climate: History and prospect." Annual Review of Energy and the Environment **25**: 245-284.

Keith, D. W. and H. Dowlatabadi (1992). "A serious look at geoengineering." Eos, Transactions American Geophysical Union **73**(27): 289-293.

Kravitz, B., D. G. MacMartin, S. Tilmes, J. H. Richter, M. J. Mills, W. Cheng, K. Dagon, A. S. Glanville, J. F. Lamarque, I. R. Simpson, J. Tribbia and F. Vitt (2019). "Comparing Surface and Stratospheric Impacts of Geoengineering With Different SO₂ Injection Strategies." Journal of Geophysical Research-Atmospheres **124**(14): 7900-7918.

Lawrence, M. G., S. Schafer, H. Muri, V. Scott, A. Oeschles, N. E. Vaughan, O. Boucher, H. Schmidt, J. Haywood and J. Scheffran (2018). "Evaluating climate geoengineering proposals in the context of the Paris Agreement temperature goals." Nature Communications **9**.

Lee, H., H. Muri, A. Ekici, J. Tjiputra and J. Schwinger (2021). "The response of terrestrial ecosystem carbon cycling under different aerosol-based radiation management geoengineering." Earth System Dynamics **12**(1): 313-326.

Lee, W. R., D. G. MacMartin, D. Vioni and B. Kravitz (2021). "High-Latitude Stratospheric Aerosol Geoengineering Can Be More Effective if Injection Is Limited to Spring." Geophysical Research Letters **48**(9).

Ma, X., X. Y. Zhang and D. Tian (2020). "Farmland degradation caused by radial diffusion of CO₂ leakage from carbon capture and storage." Journal of Cleaner Production **255**.

MacMartin, D. G. and B. Kravitz (2019). "Mission-driven research for stratospheric aerosol geoengineering." Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America **116**(4): 1089-1094.

Marchetti, C. (1977). "Geo-Engineering and Co₂ Problem." Climatic Change **1**(1): 59-68.

McInnes, C. R. (2010). "Space-based geoengineering: challenges and requirements." Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C-Journal of Mechanical Engineering Science **224**(C3): 571-580.

Muri, H., U. Niemeier and J. E. Kristjansson (2015). "Tropical rainforest response to marine sky brightening climate engineering." Geophysical Research Letters **42**(8): 2951-2960.

Muri, H., J. Tjiputra, O. H. Ottera, M. Adakudlu, S. K. Lauvset, A. Grini, M. Schulz, U. Niemeier and J. E. Kristjansson (2018). "Climate Response to Aerosol Geoengineering: A Multimethod Comparison." Journal of Climate **31**(16): 6319-6340.

Oomen, J. and M. Meiske (2021). "Proactive and reactive geoengineering: Engineering the climate and the lithosphere." Wiley Interdisciplinary Reviews-Climate Change **12**(6).

Park, C. E., S. J. Jeong, Y. C. Fan, J. Tjiputra, H. Muri and C. M. Zheng (2019). "Inequal Responses of Drylands to Radiative Forcing Geoengineering Methods." Geophysical Research Letters **46**(23): 14011-14020.

Penner, J. E., C. Zhou and X. H. Liu (2015). "Can cirrus cloud seeding be used for geoengineering?" Geophysical Research Letters **42**(20): 8775-8782.

Qin, Z. Z., J. Chen, X. L. Xie, X. Luo, T. M. Su and H. B. Ji (2020). "CO₂ reforming of CH₄ to syngas over nickel-based catalysts." Environmental Chemistry Letters **18**(4): 997-1017.

Reynolds, J. L. (2019). "Solar geoengineering to reduce climate change: a review of governance proposals." Proceedings of the Royal Society a-Mathematical Physical and Engineering Sciences **475**(2229).

Smith, W. and G. Wagner (2018). "Stratospheric aerosol injection tactics and costs in the first 15 years of deployment." Environmental Research Letters **13**(12).

Struck, C. (2007). "The feasibility of shading the greenhouse with dust clouds at the stable lunar Lagrange points." Jbis-Journal of the British Interplanetary Society **60**(3): 82-89.

Tilmes, S., D. G. MacMartin, J. T. M. Lenaerts, L. van Kampenhout, L. Muntjewerf, L. L. Xia, C. S. Harrison, K. M. Krumhardt, M. J. Mills, B. Kravitz and A. Robock (2020). "Reaching 1.5 and 2.0 degrees C global surface temperature targets using stratospheric aerosol geoengineering." Earth System Dynamics **11**(3): 579-601.

Vinca, A., M. Rottoli, G. Marangoni and M. Tavoni (2018). "The role of carbon capture and storage electricity in attaining 1.5 and 2 degrees C." International Journal of Greenhouse Gas Control **78**: 148-159.

Zhang, Z. H., J. C. Moore, D. Huisingh and Y. X. Zhao (2015). "Review of geoengineering approaches to mitigating climate change." Journal of Cleaner Production **103**: 898-907.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

Symbol	Rozměr	Veličina
Q	[J]	teplo
R_s	[m]	poloměr disku
R_o	[m]	poloměr Slunce
r_s	[m]	vzdálenost disku od Země
r_o	[m]	vzdálenost Slunce od Země
κ	[-]	míra odrazivosti
η	[-]	koeficient odrazivosti
a_s	[m·s ⁻²]	zrychlení disku
A_s	[m ²]	plocha disku
M_s	[kg]	hmotnost disku
P_E	[N·m ⁻²]	tlak slunečního záření
ε_F	[-]	emisivita disku ze strany Slunce
ε_B	[-]	emisivita disku ze strany Země

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Zkratka	Význam
SP	skleníkové plyny
AA	atmosférické aerosoly
GLENS	Geoengineering Large Ensemble
SAI	stratosférická injekce
MSB	zjasnění mořských mraků
CCT	Cirrus cloud thinning – ztenčování oblaků Cirrus
SBM	vesmírné disky
AOD	optická hloubka aerosolů
EQ	rovníková injekce
AMOC	index Atlantické meridionální cirkulace
KVZ	krátkovlnné záření
DVZ	dlouhovlnné záření

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Porovnání množství použitých částic pro dvě metody. Převzato a upraveno ze zdroje (Kravitz, et al., 2019).....	14
Obrázek 2: Porovnání teplotních změn různých metod v rámci zeměpisné šířky. Převzato a upraveno ze zdroje (Kravitz, et al., 2019).....	15
Obrázek 3: Změna velikosti plochy ledovců na obou pólech. Převzato a upraveno ze zdroje (Kravitz, et al., 2019).....	16
Obrázek 4: Ilustrační fotografie možného způsobu aplikace MSB. Převzato a upraveno ze zdroje (Reynolds, 2019).....	17
Obrázek 5: Zobrazení účinku různých rychlostí krystalů na efektivitu CCT. Převzato a upraveno ze zdroje (Jackson, et al., 2016).....	18
Obrázek 6: Vliv geoinženýrských metod na změnu v rozloze suchých oblastí. Převzato a upraveno ze zdroje (Park, et al., 2019).....	19
Obrázek 7: Zobrazení všech existujících Lagrangových bodů. Převzato a upraveno ze zdroje (Baum, et al., 2022).....	20
Obrázek 8: Vliv geoinženýrských metod na tvorbu srážek. Měřeno na třech místech. Převzato a upraveno ze zdroje (Park, et al., 2019).....	23

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Zhodnocení efektivity jednotlivých metod.....	24
--	----

SEZNAM PŘÍLOH

- 1 Prázdná šablona závěrečné práce Energetického ústavu