

Методы управления солнечной радиацией: основные характеристики, потенциал и возможные последствия

А.П. Ревокатова^{1,2)}, В.А. Гинзбург^{1,3)}*

¹⁾ Институт глобального климата и экологии Ю.А. Израэля,
Россия, 107258, Москва, ул. Глебовская, 20Б

²⁾ ФГБУ «Гидрометцентр России»,
Россия, 123242, Москва, Большой Предтеченский пер., 11-13

³⁾ ФГБУН Институт географии РАН,
Россия, 109017, г. Москва, Старомонетный пер., 29

* адрес для переписки: *revokatova@gmail.com*

Реферат. Управление солнечной радиацией (УСР) – один из подходов к инженерной стабилизации климата. Методы УСР относятся к технологиям, призванным изменить альбедо Земли для увеличения отражения приходящей солнечной радиации. Несмотря на то, что сейчас количество научных работ в мире по методам УСР растет в геометрической прогрессии, в России эти технологии остаются малоизвестными и непопулярными. Статья призвана собрать воедино основные свойства предлагаемых методов УСР, рассмотреть возможные схемы их применения и оценить степень серьезности возможных побочных эффектов, базируясь на последней научной литературе. В статье рассмотрены методы стратосферных аэрозолей (СА), осветления морских облаков, уменьшения толщины перистых облаков. Проведено сравнение методов УСР по температурному отклику и эффективности, техническим аспектам применения методов и возможности их реализации. Рассмотрено воздействие методов УСР на климатическую систему с точки зрения региональных изменений климатических параметров, изменения в ресурсах для солнечной энергии, последствий резкого прекращения применения методов УСР. Проведен обзор возможных сценариев применения методов УСР. Среди методов УСР наиболее значимое влияние на глобальную среднюю температуру могут оказать метод СА и метод осветления морских облаков. Проведен обзор исследований возможных негативных последствий, связанных с изменением тропосферной и стратосферной циркуляции, уменьшением стратосферного озона, резкого отклика всех климатических параметров на внезапное прерывание метода, возможностей их корректировки, а также современных подходов к применению УСР предлагающих «частичное» или «умеренное» применение технологий, для уменьшения возможных последствий. Показано, что в последнее время появляются новые подходы к оценке возможных климатических последствий применения СА и их соотношение с возможными климатическими выгодами, например, сравнение климатических изменений в результате применения УСР и без него в разных районах Земли, с учетом количества проживающего там населения. В целом в статье сделан акцент на необходимость оценки потенци-

альных угроз от УСР совместно с выявляемыми положительными эффектами для каждого региона в отдельности, в зависимости от количества населения и потенциальных угроз для него.

Ключевые слова. Геоинженеринг, управление солнечной радиацией, метод стратосферных аэрозолей, метод осветления облаков, потепление климата.

Solar radiation modification methods: main characteristics, potential and possible consequences

A.P. Revokatova^{1,2)}, V.A. Ginzburg^{1,3)}*

¹⁾ Yu.A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology,
20B, Glebovskaya str., 107258, Moscow, Russian Federation

²⁾ Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation,
11-13, Bolshoi Predtechensky lane, Moscow, 123242, Russian Federation

³⁾ Institute of Geography RAS,
29, Staromonetny lane, 109017, Moscow, Russian Federation

Correspondence address: *revokatova@gmail.com*

Abstract. Solar radiation management (SRM) is one of the geoengineering approaches to climate stabilization. SRM methods refer to the technologies designed to alter the Earth's albedo to increase the reflection of incoming solar radiation. Despite the fact that the number of scientific works on SRM is growing exponentially, in Russia these technologies remain little known and unpopular. This article is intended to bring together the main properties of the proposed SRM methods, consider possible schemes for their application and assess the severity of possible side effects, based on the latest scientific literature. The article discusses the stratospheric aerosols method (SA), marine cloud brightening, and cirrus cloud thinning. Comparison of SRM methods in terms of temperature response and efficiency, technical aspects of the application and the possibility of their implementation is carried out. The impact of SRM methods on the climate system is considered from the point of view of regional changes in climatic parameters, changes in resources for solar energy, the consequences of an abrupt cessation of the application of SRM methods. A review of possible scenarios for the application of SRM methods has been made. Among the SRM methods, the most significant influence on the global average temperature can be provided by the SA method and the method of marine cloud brightening. A review of studies of possible negative consequences associated with a change in tropospheric and stratospheric circulation, a decrease in stratospheric ozone, a sharp response of all climatic parameters to a sudden interruption and the possibilities of their correction provided in this research. Moreover, modern approaches to the application of the SRM offering "partial" or "moderate" application technologies to reduce the possible consequences discussed. It is shown that recently arise new approaches to assessing the possible climatic consequences of the SA method and their

relationship with possible climatic benefits. For example, comparing climatic changes as a result of the SRM application and without it in different regions of the Earth, taking into account the number of the population living there. In general, the article focuses on the need to assess the potential threats from SRM together with the identified positive effects for each region separately, depending on the number of the population and potential threats to it.

Keywords. Geoengineering, solar radiation management, stratospheric aerosol method, marine cloud whitening, climate warming.

Введение

Методы геоинженеринга, как одного из возможных способов сократить темпы глобального потепления, уже около пятидесяти лет рассматриваются мировым научным сообществом. Их исследование началось с первого упоминания в работе Михаила Будыко в 1974 году (Будыко, 1974), они получили второе дыхание после работы нобелевского лауреата Крутсена в 2006 (Crutzen, 2006), прошли целую эволюцию в отчетах Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), и разделились на две ветви – удаление углерода из атмосферы (углеродный инжинеринг) и методы управления солнечной радиацией (солнечный инжинеринг). И, если методы удаления углекислого газа из атмосферы (Carbon Dioxide Removal – CDR) нашли свое место в отчетах МГЭИК среди технологий смягчения изменений климата, то методы управления солнечной радиацией до сих пор остаются не причисленными ни к одной из классических групп методов, а отношение к ним среди разных ученых и разных стран остается очень противоречивое. В то время как отдельные группы исследователей уже начинали создавать дизайн полевого эксперимента для определения эффективности метода стратосферных аэрозолей – наиболее изученного к настоящему времени, другие скептически относились к возможности и целесообразности не только самого применения УСР, но и даже его исследований. УСР для глобальной стабилизации температуры на уровне 1.5°C выше доиндустриального уровня был предложен в качестве возможного экстренного варианта удержания глобальной температуры в рамках допустимых значений, если остальные меры по стабилизации климата не справятся с этой задачей (Rogelj et al., 2018; Keith, MacMartin, 2015; MacMartin et. al., 2017; Chen, Xin, 2017).

Среди предложенных в мировой научной литературе основными являются следующие:

1. *Метод стратосферных аэрозолей* (метод СА) (Будыко, 1974; Израэль, 2005; Crutzen, 2006; Irvine et al., 2016), который подразумевает непрерывное введение сульфатов или других отражающих частиц в стратосферу с использованием самолетов, привязных воздушных шаров или других технологий доставки. Этот метод на сегодняшний день является наиболее изученным и, по мнению многих авторов, самым эффективным (Rogelj et al., 2018).

2. *Осветление морских облаков* (Latham 1990; Latham, 2002; Latham et al., 2012; Latham et al., 2014; Wang et al., 2011), которое подразумевает распыле-

ние морской соли или других частиц в морских районах, что повышает отражательную способность облаков.

3. *Уменьшение толщины перистых облаков* принято отделять от методов УСР, поскольку оно не влияет напрямую на отражательную способность Земли, а увеличивает поток уходящей длинноволновой радиации (Mitchell, Finnegan, 2009; Muri et al., 2014). Перистые облака способны поглощать длинноволновое излучение Земли, что приводит к ее нагреву. Уменьшение толщины облаков способствует снижению этого эффекта, а значит, достижению цели – охлаждения Земли.

4. *Модификация альbedo земной поверхности*, которая может включать в себя осветление крыш зданий (Akbari et al., 2012; Jacobson, Ten Hoeve, 2012), посадку сельскохозяйственных культур с большей отражательной способностью (Irvine et al., 2011), изменения в управлении землепользованием (например, беспашотное земледелие), которые увеличивают отражательную способность посевных площадей (Davin et al., 2014). Изменение альbedo поверхности в более широком масштабе (Irvine et al., 2011; Seidel et al., 2014) может включать в себя покрытие ледников или пустынь отражающим покрытием, что оказывает существенное влияние на характер циркуляции и глобальную температуру. Как правило, методы изменяющие альbedo поверхности имеют меньший пространственный масштаб и, таким образом, не сильно влияют на глобальную температуру (Irvine et al., 2011; Seneviratne et al., 2018).

5. *«Космические зеркала»*, которые можно установить на орбите, чтобы отражать солнечный свет обратно в космос (Angel, 2006; Gaidos, 2016) являются одним из гипотетических методов, которые вряд ли будут применены в ближайшем будущем, поскольку могут повлечь за собой непредсказуемые и трудно изучаемые побочные последствия, и являются несоразмерно дорогими.

Наиболее изученным является метод СА, он же способен понизить среднюю глобальную температуру практически на любую необходимую величину, метод осветления морских облаков, вероятнее всего, наиболее дешевый. Модификация альbedo земной поверхности вряд ли приведет к существенным глобальным эффектам, но способна влиять на региональный климат.

Температурный отклик и эффективность методов УСР

Среди методов УСР, перечисленных выше, наиболее значимое влияние на глобальную среднюю температуру могут оказать метод СА и метод осветления морских облаков. Несмотря на то, что оба метода способны снизить глобальную температуру (притом, в случае с методом СА температуру можно понизить практически на любую необходимую величину), понижение температуры будет неравномерно в разных регионах, наибольший компенсационный температурный эффект при применении метода СА достигается в низких широтах, но даже он, по некоторым исследованиям, не равномерен (MacMartin et al., 2018). Осветление морских облаков будет иметь еще более неравномерный эффект, так как эта технология предполагает осветление

облаков, существующих в нижней тропосфере над морем, что повлечет за собой локальное снижение потока коротковолновой радиации и может привести к региональным неоднородностям (Latham et al., 2012).

Основной инструмент оценки эффективности и других характеристик предложенных методов УСР – это компьютерное моделирование. Сравнение эффективности метода СА и осветления облаков, основанное на эксперименте G3 GeoMIP (Kravitz et al., 2011; Niemeier et al., 2013), и выполненное в Aswathy et al. (2015), показывает, что обе схемы в глобальном масштабе снижают повышение температуры примерно на 60% по сравнению с базовым RCP4.5. Однако они обе наиболее эффективны в низких широтах и не способны полностью компенсировать потепление в Арктике.

В эксперименте G4 в рамках проекта сравнения геоинженерных моделей GeoMIP (Geoengineering Model Intercomparison Project) (Kravitz et al., 2011) использовался сценарий RCP4.5. Каждый год в период с 2020 по 2069 год в стратосферу вводилось 5 мегатонн SO_2 . Средние значения радиационного форсинга, полученного в ходе эксперимента, широко варьируются: от -3.6 до -1.6 Вт/м². В эксперименте G4 показано, что существуют важные механизмы обратной связи между местом и интенсивностью введения SO_2 , микрофизикой аэрозоля, фоновой динамикой стратосферы, поверхностным охлаждением, вызванным аэрозолями и скоростями стратосферного нагрева, а также изменениями в стратосферной циркуляции и обмене стратосферы с тропосферой (Visioni et al., 2017a; Kashimura et al., 2017). Сумма всех прямых и непрямых радиационных воздействий при введении 5 мегатонн SO_2 в год составляет -1.4 ± 0.5 Вт / м², что означает компенсацию прогнозируемого положительного радиационного форсинга в 2100 году по сравнению с 2011 годом на 64, 38 и 23% для сценариев МГЭИК RCP4.5, RCP6.0 и RCP8.5, соответственно (Visioni et al., 2017a).

Согласно данным работы (Izrael et al., 2013), стабилизация глобальной температуры на уровне $+2^\circ\text{C}$ над доиндустриальным значением к концу XXI века при использовании сценария RCP8.5 в качестве базового потребует ежегодного введения газа-прекурсора в объеме 4.5 мегатонн S в год, начиная с 2050 года и до 2100. По данным (Гинзбург и др., 2020), для стабилизации глобальной температуры на уровнях $+1.5^\circ\text{C}$ и $+2^\circ\text{C}$ потребуются ежегодная инъекция от 2 до 5 МтS/г (максимальная величина, достигнутая в 2100 году при условии реализации наихудших сценариев роста концентрации парниковых газов), что согласуется с данными, полученными в более ранней работе (Izrael et al., 2013) и расчетами, проведенными в рамках реализации проекта GeoMIP (Visioni et al., 2017b). Эффективность метода, выраженная в необходимой массе инъекции для понижения температуры на 1 градус, варьирует от 1.5 МтS/°C до 3.5 МтS/°C (Гинзбург и др., 2020), согласно расчетам в рамках проекта GeoMIP она лежит в диапазоне 2-8 МтS/год/°C.

При модельном эксперименте с осветлением облаков изменение потока коротковолновой радиации в верхней части атмосферы меньше, чем для метода СА (как над океаном, так и над сушей). При этом, наибольший эффект от снижения коротковолновой радиации наблюдается над океанами. Таким

образом, метод осветления облаков носит более локальный характер, поскольку он применяется только в тропических океанах. В случае осветления морских облаков радиационное воздействие метода сильно зависит от технологии введения. Радиационный эффект от различных модельных экспериментов, обобщенных в (Kravitz et al., 2013), варьируется в зависимости от технологии и области введения аэрозолей. Влияние увеличения альбедо в океане на стабилизацию глобальной температуры воздуха изменяется по пространству, при этом наиболее эффективное снижение наблюдается для температур океана в тропиках и средних широтах, а на суше и в Арктике охлаждающий эффект минимален. Согласно некоторым исследованиям, распыление морской соли может также увеличить эффективное радиационное воздействие в условиях ясного неба (Ahlm et al., 2017).

В более ранних модельных исследованиях геоинженерии посредством распыления аэрозолей над морем (sea spray climate engineering) изучались, в основном, радиационные эффекты осветления морских облаков за счет увеличения количества ядер конденсации в облаке (Latham et al., 2008; Jones et al., 2009; Rasch et al., 2009). Более поздние исследования включали в себя процесс инъекции морской соли и активацию закачанных частиц в облачные капли, тем самым принимая во внимание радиационные эффекты как активных облачных капель, так и неактивных частиц (Jones, Haywood, 2012; Partanen et al., 2012; Alterskjær et al., 2013). В результате климатическая инженерия посредством распыления аэрозолей над морем иногда называется осветлением морского неба (Muri et al., 2015), поскольку она может включать радиационные воздействия распыленных частиц как в результате осветления облаков (косвенный эффект аэрозоля), так и из-за повышенного рассеяния солнечной радиации за пределами облаков (прямое воздействие аэрозоля).

В работе (Ahlm et al., 2017) модельные эксперименты по оценке эффективности ставились таким образом, чтобы создать средний глобальный радиационный эффект равный 2.0 Вт/м^2 в верхней части атмосферы. Аэрозольные частицы вводились над океаном между 30° с.ш. и 30° ю.ш. Авторы работы показали, что инъекция увеличивает число ядер конденсации в нижних слоях, уменьшает эффективный радиус капель в верхней части облаков и увеличивает оптическую толщину облаков над областью инъекции. В работе также делается вывод о том, что прямое воздействия аэрозоля в регионах с низкой облачностью также имеет большой потенциал радиационного воздействия, который ранее был недооценен.

Уменьшение толщины перистых облаков («утонышение») изучено недостаточно хорошо, в частности, в некоторых источниках говорится о том, что эффект может быть обратный. Как правило, эффекты истончения перистых облаков зависят от степени изменения оптической глубины облаков. Предполагаемый эффект глобального охлаждения варьируется от 1° C до 1.4° C (Crook et al., 2015; Muri et al., 2014). В табл. 1 сведены эффективности всех вышеперечисленных методов.

Таблица 1. Эффективность и радиационный форсинг УСР
(часть Таблицы из Специального доклада МГЭИК о потеплении на 1.5° C (Rogelj et al., 2018))

Table 1. SRM efficiency and radiation forcing
(fragment of the Table from IPCC 1.5 Special Report on 1.5° C (Rogelj et al., 2018))

	Метод стратосферных аэрозолей	Осветление морских облаков	Уменьшение толщины перистых облаков	Модификация альбедо земной поверхности
Радиационный форсинг	1-4 МтS Вт-1 м ² в год	100-295 Мт сухой морской соли Вт-1 м ² в год	Не известно	Незначительный на глобальном масштабе, и до 1-3° C на региональном масштабе
Количество, необходимое для компенсации потепления на 1° C	2-8 МтS в год	70 Мт сухой морской соли в год	Не известно	Изменения альбедо на 0.04-0.1 в сельскохозяйственных и урбанизированных регионах

Технические аспекты применения методов и возможность их реализации

Большинство исследований технической реализации сфокусировано на УСР посредством введения аэрозолей в стратосферу. В качестве предшественника сульфатного аэрозоля чаще всего используется диоксид серы (SO₂) (Crutzen, 2006; Kravitz et al., 2011; Izrael et al., 2014; Vioni et al., 2017a), однако, другие предшественники сульфатного аэрозоля (такие, как сероводород (H₂S)) также могут быть эффективными и могут быть предпочтительными в технологическом и экономическом отношении (Ревокатова, Рябошапка, 2015). Кроме того, могут быть использованы различные рассеивающие аэрозоли (карбид кремния (SiC)), синтетический алмаз, оксид алюминия (Al₂O₃), диоксид титана (TiO₂), диоксид циркония (ZrO₂), карбонат кальция), которые, с одной стороны, имеют меньший потенциал стратосферного нагрева по сравнению с сульфатом (Dykema et al., 2016), а с другой – могут уменьшить некоторые побочные эффекты метода (Keith, Irvine, 2016).

Наибольшая эффективность метода стратосферных аэрозолей достигается между 30° ю.ш. и 30° с.ш. (English et al., 2012). Хотя в последнее время всё чаще рассматриваются другие широтные зоны для получения более равномерного охлаждающего эффекта или для понижения температуры в отдельных регионах, например, в Арктике. В работе (Tilmes et al., 2017) было рассмотрено 42 различных точки выбросов SO₂, наилучшие результаты оказались при выбросах на широтах: 30° ю.ш., 15° ю.ш., 15° с.ш., и 30° с.ш., на долготе 180°, и на высотах 20-25 км (что примерно на 5 км выше тропопаузы). Распределение выброшенных аэрозолей зависит не только от места и высоты выброса, но и от сезона. В некоторых случаях эффективнее вводить аэрозоль в определенный сезон, а не равномерно в течение года, из-за особенностей стратосферной циркуляции (Kravitz, 2013; Tilmes et al., 2017). Высота введения также играет важ-

ную роль в определении времени жизни аэрозоля. Время жизни стратосферного SO_4 было оценено в (Aquila et al. 2014) и составило около 1.2 и 1.8 лет при введении серы в слои 16-25 и 22-25 км соответственно. Время жизни аэрозолей, выброшенных Пинатубо, составило 4 года. В работе (Lustko et al., 2020) с помощью простой энерго-балансовой модели показано, как будет меняться эффективность метода СА в зависимости от широты и высоты введения аэрозолей при разных степенях компенсации глобального потепления.

Так как использование метода УСР с применением стратосферных аэрозолей потребует ежегодного введения миллионов тонн материала в стратосферу (Robock, 2014; Davidson et al., 2011; McClellan et al., 2012), в последние десятилетия появилось множество работ, рассматривающих возможные способы доставки вещества на нужные высоты. В работе (Irvine et al., 2016) делается вывод о том, что наиболее выполнимыми являются высотные самолеты или привязные аэростаты (Davidson et al., 2011; McClellan et al., 2012). Все оценки сходятся в том, что воздушные суда могут доставлять миллионы тонн материала в нижнюю стратосферу (~ 20 км или 60 гПа) по цене от 1 до 10 миллиардов долларов США за мегатонну материала в год (Davidson et al., 2011; McClellan et al., 2012; Robock, 2014; Ревокатова, Рябошапка, 2015). Привязные воздушные шары предлагают потенциально более дешевую альтернативу, особенно для больших объемов вещества, с предполагаемыми затратами, которые на порядок меньше, чем на доставку самолетом (Davidson et al., 2011). Однако введение вещества при помощи привязных аэростатов гораздо менее изученный метод, поэтому оценки его потенциального использования часто не сходятся друг с другом (Davidson et al., 2011; McClellan et al., 2012).

Одна из первых работ, наиболее подробно описывающая технические аспекты реализации рассматриваемого метода, – это работа (Salter et al., 2008). В ней представлено описание дистанционно управляемых ветроэнергетических судов, использующих специальные механизмы для введения морских капель в атмосферу. Модули ультрафильтрации с длительным сроком службы могут доставлять морскую воду с абсолютной фильтрацией менее 0.1 мкм, но с сохранением соли. Прогнозы глобальной охлаждающей способности как функции скорости распыления сильно зависят от предположений о начальной концентрации ядер конденсации и продолжительности распыления, но слабо от влагосодержания облака. (Salter et al., 2008) предположили, что 50 распылительных емкостей стоимостью примерно 1-2 миллиона фунтов стерлингов каждая могут компенсировать потепление эквивалентное годовому увеличению мировых выбросов CO_2 (оценивались скорости роста концентрации 2008 года).

Воздействие методов УСР на климатическую систему

Региональные изменения климатических параметров

Методы УСР разрабатываются для того, чтобы стабилизировать глобальную приземную температуры воздуха, и возможность это сделать подтверждается множеством работ (Izrael et al., 2013; Revokatova et al., 2018; Гинзбург и др.,

2020; Rogelj et al., 2018; Kravitz et al., 2017), однако на региональном уровне температура не будет понижаться равномерно, в отдельных районах даже возможно ее увеличение, помимо этого некоторые модели показывают, что может измениться режим осадков, что в совокупности с неравномерным изменением температуры приведет к формированию нового климата. Моделирование регионального отклика климатической системы происходит, в основном, посредством двух типов численных экспериментов: в первом, который получил название «теневого геоинженеринг» (sunshade geoengineering), солнечная энергия уменьшается на необходимую для компенсации парникового эффекта величину, во втором в модельную стратосферу вводятся серосодержащие вещества, которые отражают часть солнечной радиации. Первый вариант моделирования, в основном, гипотетический, но он существенно легче реализуется в климатических моделях и его можно рассматривать как очень идеализированный модельный эксперимент, который дает представление об основных климатических последствиях метода SA (Robock, 2014, Irvine et al., 2016). Обычно модельные эксперименты строятся таким образом, чтобы компенсировать определенные радиационный форсинг, вызванный наличием в атмосфере парниковых газов (например, для компенсации (например, для компенсации $4\times\text{CO}_2$). Расчеты показали, что метод SA может вызывать неоднородное воздействие в зависимости от того, где и в какой форме аэрозоли вводятся в стратосферу (Muri et al., 2014; Laakso et al., 2012).

При одном и том же уровне снижения средней глобальной температуры метод SA приводит к большему изменению в гидрологическом режиме, чем теневого геоинженеринг, и приведет к большим региональным изменениям климата, особенно в тропиках (Irvine et al., 2016). В целом, модельные эксперименты показывают, что применение метода SA приведет к снижению температуры поверхности в большинстве регионов, а экстремальные температуры и осадки уменьшатся (Curry et al., 2014). Однако это будет сопровождаться переохлаждением тропического океана (Curry et al., 2014), сдвигом суточного цикла температуры (Lunt et al., 2008) и остаточным повышением температуры в полярных регионах (Curry et al., 2014). Методы УСР могут дополнительно вызывать сдвиги в циркуляции Внутритропической зоны конвергенции, ячеек Уокера и Хэдли, что влияет на изменения осадков в сторону условий, подобных условиям Ла-Нинья (Niemeier et al., 2013). При этом, ослабление тропической циркуляции, прогнозируемое при повышении уровня парниковых газов, не будет снижено при применении метода SA (Ferraro et al., 2014). В одной из последних работ (Malik et al., 2020), посвященных изменениям в положении Внутретропической зоне конвергенции (ВЗК) и интенсивности Эль-ниньо и Ла-Нинья при применении метода ГИ, было показано, что ВЗК, которая смещается на 7.5° к югу в модельных экспериментах при росте концентрации CO_2 в 4 раза, восстанавливается до своего доиндустриального положения при использовании метода SA, компенсирующего увеличение концентрации углекислого газа. Однако другие климатические аспекты не «удерживаются» на доиндустриальном уровне с помощью SA. Так, экстремальные явления Эль-Ниньо становятся менее интенсивными,

чем в доиндустриальных условиях, но и более частыми, а экстремальные явления Ла-Нинья усиливаются, что согласуется с общим переохлаждением тропической части Тихого океана по сравнению с доиндустриальными условиями (Malik et al., 2020).

В работе (Ricke et al., 2010) было показано, что методами УСР фактически невозможно одновременно стабилизировать и глобальные осадки, и температуру, если концентрация парниковых газов продолжит расти. Несмотря на то, что применение УСР, совместно с сокращением выбросов, может позволить достичь глобального потепления не более чем на 2.0°C или даже 1.5°C , соответствующий климат будет сильно отличаться от климата с потеплением на 2.0°C или 1.5°C , вызванного только снижением выбросов парниковых газов. Авторы работы (Tilmes et al., 2016) подчеркивают, что воздействие на климат резких сокращений выбросов будет отличаться от воздействия умеренных сокращений выбросов, дополненных методами УСР. Поэтому средняя глобальная температура недостаточно хороший показатель совокупных климатических рисков (Irvine et al., 2017). Изменения пространственного и временного распределения температуры, осадков и ветровых условий, вызванные УСР, по-разному повлияют на различные регионы. В результате чего применение УСР неизбежно приведет к появлению победителей и проигравших (Kravitz et al., 2014, Hegerl, Solomon, 2009).

В одной из последних работ (Irvine et al., 2019) для того, чтобы показать, как на различные регионы повлияет применение УСР, было проведено исследование с помощью модели HiFLOR, имеющей высокое разрешение и способной воспроизводить эпизоды с экстремальными осадками и тропические циклоны. Результаты этого исследования не подтверждают общепринятые утверждения о том, что метод СА неизбежно приведет к значительному ущербу для некоторых регионов, и утверждения о том, что польза и вред УСР будут иметь сильно неравномерное распределение. Тем не менее, авторы замечают, что на основании этого исследования было бы преждевременно делать вывод, что ни один регион не будет испытывать более высокие совокупные климатические риски при применении метода СА, поскольку их эксперимент был идеализированным.

Один из подходов к оценке этой проблемы был показан в работе (Irvine, Keith, 2020), в которой анализируются климатические изменения в результате применения УСР и без него в разных районах Земли, с учетом количества проживающего там населения. Результаты работы показали, что уменьшение потепления в 2 раза с помощью стратосферных аэрозолей снижает серьезные климатические опасности почти во всех районах земного шара. Только на 1.3% площади суши наблюдается обострение климатических изменений, и в этих регионах наблюдается переувлажнение, а не засуха, что противоречит распространенному предположению, что УСР приводит к более засушливому климату в целом (Irvine, Keith, 2020).

В работе (Karami et al., 2020) проводился анализ влияния УСР на осадки в районах Ближнего Востока, Северной Африки и Средиземноморья. Как известно (Butler et al., 2010; Yin, 2005), из-за роста концентрации парнико-

вых газов и глобального потепления, траектории циклонов сдвигаются к полюсам, как следствие этого в низких широтах может наблюдаться дефицит осадков. Результаты (Karami et al., 2020) показали, что метод СА может частично компенсировать сдвиг траекторий циклонов к полюсам, таким образом потенциально смягчая последствия глобального потепления. К похожим выводам пришли ученые в работе (Singh et al., 2020), посвященной выращиванию листовых фруктов деревьев в Индии в условиях глобального потепления и применения метода УСР. Они заключили, что, благодаря применению метода СА, районы, благоприятные для произрастания исследуемых культур не будут сдвигаться на северо-восток страны (в горную местность), как это случилось бы только в случае потепления по сценарию RCP4.5. Авторы работы подчеркивают, что применение СА может принести выгоду производству фруктов за счет снижения интенсивности глобального потепления; однако, если применение геоинженерии будет прекращено внезапно, скорость изменения температуры будет довольно высокой, что негативно скажется на урожае.

Еще один из аспектов влияния применения метода СА на климатическую систему – стратосферная циркуляция. Как известно, из-за дополнительного количества аэрозоля стратосфера начинает нагреваться. Этот эффект подтвержден как модельными экспериментами (Niemeier, Schmidt, 2017; Richter et al., 2017; Visionsi et al., 2017a), так и натурными исследованиями, которые проводились на основании данных, полученных после крупных вулканических извержений (Robock, 2000; Pitari et al., 2016). Нагрев происходит локально, в зоне скопления аэрозолей. Как показано в работе (Visionsi et al., 2020), этот нагрев усилит интенсивность полярного вихря, контролирующего перенос воздуха от средних широт к полюсам (Waugh et al., 2017). Если этот перенос сдерживать, меньшее количество аэрозолей может достигнуть высоких широт, поэтому получение правильного распределения аэрозолей, необходимого для достижения требуемых климатических целей, становится труднее.

Возможные эффекты, вызванные *осветлением морских облаков*, связаны с непосредственным эффектом локального охлаждения морской поверхности. В ключевой работе (Salter et al., 2008) говорилось, что этот эффект может быть нацелен на уязвимые регионы, такие, как коралловые рифы и области, покрытые морским льдом. Кроме того, локальное охлаждение морской поверхности может снизить частоту и силу ураганов и увеличить акваторию моря, пригодную для роста фитопланктона. Эти утверждения были подтверждены в более поздних работах (Latham et al., 2012; Latham et al., 2014).

В работе (Alterskjær et al., 2013) проводились численные эксперименты с тремя климатическими моделями, с помощью которых изучались свойства метода осветления облаков. Эксперименты ставились таким образом, чтобы поддерживать радиационный форсинг на верхней границе атмосферы на уровне 2020 года в течение 50 лет, затем применение метода прекращалось и модели запускались еще на 20 лет. Такая структура модельного эксперимента позволила проанализировать эффекты от внезапного прерывания осветления облаков. Результаты показывают, что осветление облаков в глобальном мас-

штабе приводит к остановке глобального потепления, наблюдаемого при сценарии RCP4.5 во всех моделях. Несмотря на значительные различия между моделями в реакции климата, например, очень разные обратные связи в облаках и разная восприимчивость к введению морской соли, все три модели обнаруживают подавление потока скрытого тепла и осадков над низкими широтами в океане, в которых путем геоинженерии с использованием морской соли создается отрицательной радиационный форсинг. Над континентами низких широт все три модели обнаруживают усиленный поток скрытого тепла, увеличение облачного покрова и рост количества осадков, а также уменьшение засушливости. Вместе эти изменения суша-океан представляют собой важный сдвиг в гидрологическом цикле, который можно рассматривать как «усиление циркуляции Уокера». Это подтверждает выводы, полученные ранее в (Bala et al., 2011). Для сравнения, исследование GeoMIP G1, проведенное в (Schmidt et al., 2012), в котором для остановки потепления уменьшалось количество солнечного излучения, обнаружило уменьшение осадков как над сушей, так и над океаном в низких широтах.

Помимо методов СА, была предложена модификация отражательной способности земной поверхности, например путем изменения альбедо сельскохозяйственных земель или городских территорий (Irvine et al., 2011; Davin et al., 2014; Seneviratne et al., 2018). Эти методы управления радиацией на поверхности земли имеют меньшую эффективность, чем СА, поскольку воздействие более ограничено в пространстве. Но подходы к управлению радиацией на поверхности суши потенциально лучше, чем СА, подходят для воздействия на температуру отдельных регионов и, вероятнее всего, не окажут существенное влияние на глобальную температуру. Поэтому их следует рассматривать как стратегию, отличную от традиционных подходов УСР или как часть мер по адаптации к измененному климату (Boucher et al., 2013).

Среди негативных эффектов всех методов УСР часто перечисляют их неспособность влиять на концентрацию парниковых газов и, в частности, закисления океана. Однако, эти качества заложены в самой сути методов управления солнечной радиации и не могут упоминаться среди их побочных эффектов, поскольку предполагается, что одновременно с потенциальным применением методов УСР будет осуществляться политика по сокращению выбросов парниковых газов и реализация некоторых методов CDR.

Другие риски УСР, чаще всего упоминаемые в научных исследованиях, включают: отсутствие тестирования предложенных схем (Schäfer et al., 2013), возможное связанное с этим истощение стратосферного озона (Tilmes et al., 2008), которое остается очень неопределенным (Irvine et al., 2016), изменения в солнечной энергетике и риск резкого прерывания метода.

При выявлении негативных эффектов, связанных с осветлением облаков над морями, этот метод можно остановить в течение нескольких дней, его воздействие угаснет практически моментально (Salter et al., 2008). В случае с использованием стратосферных аэрозолей на очищение стратосферы от заброшенных туда частиц могут уйти месяцы и даже годы.

Подробно все негативные эффекты возможного применения метода стратосферных аэрозолей были рассмотрены в (Ревокатова, Рябошапко, 2013), где было проведено ранжирование возможных побочных эффектов использования геоинженерии климата по пространственному масштабу и народонаселению затронутых территорий, по степени опасности для человека и природных экосистем, по степени уверенности в возможности возникновения тех или иных эффектов. Было показано, что наиболее значимые для человека побочные эффекты, вероятнее всего, будут связаны с изменением в региональном климате. Возможные эффекты, связанные с уменьшением озонового слоя в стратосфере, скорее всего, являются завышенными. Одна из последних работ (Robrecht et al., 2021), оценивающая возможные изменения в концентрации озона в нижних слоях стратосферы пришла к выводу, что максимальное разрушение озона 0.3% из-за применения ГИ может произойти в 2040-2050 годах, однако, авторы работы (Robrecht et al., 2021) показали, что процесс потери озона оказывает незначительное влияние на озоновый столб в средних широтах. Некоторые из возможных негативных эффектов применения методов УСР рассмотрены подробнее ниже.

Изменения в ресурсах для солнечной энергии

В работе (Robock et al., 2008) было выдвинуто предположение, о том, что метод СА может повлиять на солнечную энергетику за счет снижения поступающего к Земле солнечного излучения. Единственное подробное исследование этого вопроса было проведено в (Smith et al., 2017). Согласно ему, СА при уровне инъекции SO_2 10 МгТ/год, вероятно, приведет к отрицательным изменениям. Среднее глобальное снижение годовой выработки энергии на суше составит 4.5% и 5.9% по сравнению с RCP4.5 и с доиндустриальным уровнем. Повышение яркости морских облаков снизит передачу солнечной энергии через облака, но также снизит передачу солнечной энергии в областях с ясным небом, где образуется морской аэрозоль. Уменьшение толщины перистых облаков немного увеличит приходящую солнечную радиацию. Увеличение альбедо поверхности вряд ли окажет прямое негативное влияние на солнечную энергетику и может быть слегка положительным из-за того, что дополнительная солнечная радиация отражается вверх от земной поверхности (Smith et al., 2017).

Последствия прекращения применения методов УСР

«Эффект резкого прекращения» (Termination effect) обсуждался в ряде работ (Izrael et al., 2014; Jones et al., 2013; McCusker et al., 2014). Результаты всех модельных исследований сходятся в том, что внезапная остановка развертывания метода УСР, связанного с введением СА, приведет к быстрому повышению температуры, сопровождаемому увеличением средней глобальной скорости осадков до уровней, которых они достигли бы без SRM. Это происходит потому, что УСР не снижает концентрации парниковых газов в атмосфере, а только маскирует их эффект. Безусловно, такие резкие изменения средней гло-

бальной температуры могут оказать разрушительное воздействие на климатическую систему Земли, привести к негативным последствиям для биоразнообразия, отразиться на производстве продуктов питания. Другие исследования показывают, что негативные последствия УСР, в частности «эффект прекращения», зависят от вида реализации УСР (Keith, MacMartin 2015; Reynolds et al., 2016). В этих работах было показано, что этого эффекта можно избежать (или уменьшить его) при хорошо спланированном развертывании и завершении УСР (например, сценарий, при котором интенсивность применения УСР увеличивается, а затем снова медленно снижается). Авторы работы (Kosugi, 2013) приходят к выводу, что, если охлаждающий эффект УСР оставить ниже определенного порога, то будет трудно обнаружить «эффект прекращения» на фоне естественных колебаний температуры. В случае, когда УСР обеспечивает высокую степень охлаждения, его нельзя остановить внезапно, но его можно постепенно прекратить (Reynolds et al., 2016).

В работе (Alterskjær et al., 2013), где оценивались эффекты резкой остановки осветления морских облаков, после пятидесятилетнего поддержания радиационного форсинга на уровнях 2020 года, было показано, что воздействие резкой остановки метода проявляется в глобальном быстром повышении приповерхностной температуры с особенно большим увеличением в Арктике (превышающим 2°C в течение 20 лет после прекращения применения метода). Эти результаты согласованы с (Jones et al., 2013). Этот рост температур в Арктике вызван значительным уменьшением доли морского льда в сентябре (более чем на 25% в некоторых регионах). Все модели показывают, что большинство атмосферных параметров достигают значений RCP4.5 в течение 10-15 лет после прерывания метода осветления облаков (Alterskjær et al., 2013).

В целом, риски от УСР напрямую зависят от уровня его применения и, таким образом, могут быть скорректированы до допустимых или вовсе сведены к минимуму. Для снижения риска применения УСР в последнее время все шире обсуждается его частичное применение, нацеленное, на компенсацию только некоторой части потепления, вызванного ростом концентрации парниковых газов (Keith, MacMartin, 2015). Далее будут рассмотрены некоторые из вполне возможных сценариев применения УСР.

Возможные сценарии применения методов УСР

В последние годы модельные эксперименты не ограничиваются только лишь поддержанием средней глобальной температуры на допустимом уровне ($+1.5^{\circ}\text{C}$ или $+2^{\circ}\text{C}$) при росте концентрации парниковых газов по одному из предложенных IPCC сценариев (RCP6.0, RCP8.5, и т.д.). Они имеют более насыщенную вариантами структуру. Например, в работе (Tilmes et al., 2020) проводилась серия модельных экспериментов, в которых поддерживалась не только температура на уровнях $+1.5^{\circ}\text{C}$ и $+2^{\circ}\text{C}$, но и температурный градиент «экватор-полюс», чтобы снизить региональные климатические эффекты стратосферных аэрозолей.

Модельные эксперименты, поставленные в работе (Kravitz et al., 2017), были одними из первых, где использовалось несколько районов введения SO_2 для достижения ряда целей: управление средней глобальной температурой, межполушарным градиентом температуры (для стабилизации положения Внутритропической зоны конвергенции) и градиентом температуры от экватора к полюсу (чтобы избежать переохлаждения тропиков и недоохлаждения полюсов, как это было видно в предыдущих работах (Govindasamy, Caldeira, 2000)). Коллектив авторов опубликовал 5 взаимодополняющих работ (Mills et al., 2017; Richter et al., 2017; MacMartin et al., 2017; Tilmes et al., 2017; Kravitz et al., 2017), в которых показал как выбросы серосодержащих аэрозолей в разных районах Земли могут влиять на стратосферную циркуляцию, радиационный баланс и несколько ключевых температурных параметров. Они разработали модельный алгоритм обратных связей между изменением температурных градиентов (межполушарных и экватор-полюс) от количества, места и сезона введения аэрозоля. Для этого были рассчитаны референтные значения: средние значения глобальной температуры (T_0), градиента межполушарного (T_1) и градиента экватор-полюс (T_2). По сценарию RCP8.5 за период 2015-2024 гг. они равны: $T_0=288.13$; $T_1=0.76$; $T_2=-5.98$. В числе основных особенностей изменения температуры в рамках глобального потепления можно перечислить следующие: рост глобальной температуры (T_0), более сильное потепление в Северном полушарии (рост T_1), более сильное потепление над полюсами (рост T_2). Классическое глобальное УСР методом СА может поддерживать среднюю глобальную температуру на заданном уровне, но при это не компенсирует остаточное потепление на полюсах и охлаждает северное полушарие интенсивнее, что приводит к изменению глобальной циркуляции и режима осадков, поэтому так важно удержать на современном уровне не только среднюю глобальную температуру, но и градиенты. Как показала работа (Kravitz et al., 2017), это может быть выполнено методом СА с использованием механизма обратных связей и регулируемыми выбросами аэрозоля в нескольких точках земного шара.

До 2020 года не было исследований, в которых глобальные или региональные осадки контролировались бы с помощью регулируемой обратной связи с инъекцией сульфатного аэрозоля. Первой такой работой стало исследование (Lee et al., 2020), авторы которого предприняли попытку управлять осадками и площадью морского льда в модельных геоинженерных экспериментах наряду с другими климатическими показателями в рамках многоширотной многоцелевой геоинженерной стратегии.

Сценарии концентрации парниковых газов в работе (Tilmes et al., 2020) также использовались отличные от стандартных. Например, к самому сильному парниковому форсингу, продолжающемуся до 2040 года, было добавлено применение радикальных мер по декарбонизации (методы CDR, сокращение эмиссий) сразу после 2040 года, которые позволяют снизить концентрацию CO_2 практически в 2 раза за 30 лет (к 2070 году). В целом, такие темпы сокращения концентрации CO_2 кажутся маловероятными (Ревокатова, Рябошапка, 2015), тем не менее, современное моделирование применения

методов УСР должно рассматривать максимально широкий диапазон вариантов и схем для полноценного понимания возможных процессов при реальном применении геоинженерии.

Оценивая климатические риски применения УСР, ученые обычно используют малореальные сценарии, которые вряд ли будут реализованы, как с физической точки зрения, так и с политической (Lockley, 2020). В то же время климатические и экологические последствия политически значимых и потенциально правдоподобных сценариев редко моделировались и оценивались. Авторы работы (Lockley, 2020) предложили несколько сценариев применения УСР. Первая группа сценариев сочетает в себе одновременное применение всех трёх способов борьбы с глобальным потеплением (сокращение эмиссий, CDR, УСР) с различными интенсивностями:

- ограниченное применение УСР, до тех пор пока усилия по сокращению эмиссий и методы удаления углекислого газа (CDR) не будут в достаточной степени применены. В этом случае потенциальное использование СА будет ограничено максимальной скоростью CDR. Этот так называемый сценарий “overshoot” предлагался в работе (Tilmes et al., 2020); он основан на сценарии выбросов CMIP6, который предполагает довольно нереалистичные значения CDR (O’Neill et al., 2016);

- применение УСР в умеренном режиме для снижения скорости потепления (Keith, MacMartin, 2015; Irvine, Keith, 2020). Модельные эксперименты, воспроизводящие это «временное умеренное» применение УСР, могут помочь определить его эффективность и влияние экосистем по сравнению с другими предложениями;

- достижение конкретных температурных целей. (Kravitz et al., 2017; Tilmes et al., 2018) показали, что целевые значения температуры, включая температурные градиенты, могут быть достигнуты. Однако эти первоначальные исследования показывают, что годовые инъекции СА с заранее заданным местоположением могут быть неоптимальными и могут привести к сезонным колебаниям климата. Было показано, что из-за сезонности солнечной радиации в высоких широтах метод СА уменьшает сезонный цикл. Это приводит к формированию относительно более теплой зимы и более прохладному лету по сравнению с настоящим временем, особенно над Северной Атлантикой и Северной Европой (Jiang et al., 2019). Чтобы преодолеть некоторые из этих воздействий (Vioni et al., 2020), выполнили модельные эксперименты с варьирующейся сезонной инъекцией. Этот сценарий сокращает необходимое количество закачиваемого материала (таким образом, снизив затраты и уменьшив некоторые побочные эффекты).

Вторая группа теоретических сценариев применения УСР в работе (Lockley, 2020) названа «ответом на неожиданные природные и социальные события» в XXI веке. В нее включены схемы, связанные с:

- реакцией углеродного цикла на прохождение критических точек, с учетом возможных утечек CO₂ из резервуаров (в случае если методами CDR было удалено и сохранено в резервуарах достаточное количество CO₂);

- влиянием крупных вулканических извержений XXI века на УСР. Подобные исследования уже проводились (Laakso et al., 2016), но эксперименты с разнообразием модельных вулканов и их местоположением были бы полезны для понимания рисков применения УСР, связанных с этими природными событиями;

- противодействием геоинженерии (Heuven et al., 2019) – это ответные меры на геоинженерию, которые включают в себя преднамеренный выброс в атмосферу короткоживущих климатообразующих веществ, чтобы подавить эффект предполагаемого враждебного геоинженерного вмешательства – в качестве альтернативы дипломатическим или военным действиям. Примерный сценарий может включать в себя SRM, который отключит потепление с 2030 года, но вскоре после этого будет проведено противодействие геоинженерии;

- временной остановкой УСР, связанной с неожиданными социальными событиями, эпидемиями, экономическими кризисами, сменой власти;

- переключением между технологиями – например, заменой метода СА на осветление морских облаков.

Третья группа сценариев для изучения потенциала УСР включает в себя региональное применение с потенциальными последствиями для всего земного шара. Неоспоримым плюсом регионального геоинженеринга является возможность уменьшать локальные и временные эффекты изменения климата. В этой группе могут быть предложены следующие варианты:

- осветление морских облаков над определенными зонами в океанах;
- распыление аэрозолей в тропосфере для компенсации региональных волн тепла (Bernstein et al., 2013);

- метод СА, примененный одной из стран без согласования с другими, теоретически может стать полезным сценарием для исследования с помощью численных моделей;

- полярный УСР, нацеленный, в первую очередь, на замедление темпов таяния морского льда;

- осветление земной поверхности в полярных регионах (Field et al., 2018).

К четвертой категории методов относятся разнообразные вмешательства в климатическую систему Земли, которые могут продолжаться дольше 2100 года. Среди них:

- переохлаждение до значений ниже преиндустриальных (Harding et al., 2020);

- понижение уровня океана ниже преиндустриального;

- поддержание баланса массы льда на протяжении десятков веков.

Все вышеперечисленные сценарии могут использоваться учеными, оценивающими риски и потенциал геоинженерии при помощи численного моделирования.

Результаты и дискуссия

В работе был проведен анализ наиболее известных в настоящее время методов управления солнечной радиацией с точки зрения их эффективности, возможных негативных эффектов, возможности регионального применения. Наиболее изученным методом, имеющим и высокую эффективность, является метод стратосферных аэрозолей. Метод осветления морских облаков, который в англоязычной литературе всё чаще называется Sea Spray Climate Engineering («климатическая инженерия морскими аэрозолями») в ряде модельных исследований также показывает высокую эффективность в достижении конкретных климатических целей. Метод утоньшения перистых облаков и технологии изменения альбедо поверхности менее изучены и, судя по исследованиям, при помощи их применения сложно достигнуть необходимого снижения температуры на глобальном масштабе.

В работе показано, что с момента упоминания основных возможных негативных последствий, связанных с изменением тропосферной и стратосферной циркуляции, уменьшением стратосферного озона, резкого отклика всех климатических параметров на внезапное прерывание метода, появилось множество уточняющих исследований, корректирующих их. Кроме того, появились работы, предлагающие «частичное» или «умеренное» применение технологий, для уменьшения возможных последствий. В целом, направленность исследования в области УСР, в особенности, в работах, касающихся метода СА, вышла на новый уровень. Все чаще оценивается потенциал метода не просто в удерживании средней глобальной температуры на каком-то уровне, а поддержание отдельно температуры Северного и Южного полушарий, в сохранении градиента «экватор-полюс», что позволяет стабилизировать положение внутритропической зоны конвергентности и сохранить современные особенности структуры осадков.

В последнее время появляются и новые подходы к оценке серьезности возможных климатических последствий применения СА и их соотношение с возможными климатическими выгодами. Например, один из подходов к этой оценке предлагает анализировать климатические изменения в результате применения УСР и без него в разных районах Земли, с учетом количества проживающего там населения. Согласно таким исследованиям (Irvine, Keith, 2020), уменьшение потепления в 2 раза с помощью стратосферных аэрозолей снизит серьезные климатические риски почти во всех районах земного шара и только на 1.3% площади суши будет наблюдаться обострение климатических изменений. Осветление морских облаков может привести к изменению гидрологического режима в низких широтах (уменьшение потока скрытого тепла и осадков над морями и увеличение осадков над континентами). При этом локальное охлаждение морской поверхности может снизить частоту и силу ураганов, уменьшить обесцвечивание кораллов, связанное с повышением температуры воды и увеличить акваторию моря, пригодную для роста фитопланктона.

Таким образом, оценка потенциальных угроз от УСР должна проходить совместно с выявляемыми положительными эффектами для каждого региона

в отдельности, в зависимости от количества населения и потенциальных угроз для него.

Для получения более полного обзора характеристик и свойств методов УСР потребуется еще множество исследований, которые, в частности, помогут понять, какую роль может взять на себя УСР во время неожиданных социальных или природных событий (эпидемии, извержение вулкана, вскрытие резервуаров CO₂), насколько региональный геоинженеринг (сохранение морского льда, распыление аэрозолей в тропосфере для компенсации региональных волн тепла, распыление морских аэрозолей над конкретными областями в океане) может быть полезен и безопасен для климатической системы и многое другое.

Благодарность и посвящение

Эта статья посвящена памяти Алексея Григорьевича Рябошапко. Такая обобщенная работа была бы невозможна без длительного сотрудничества и тесной совместной работы с Алексеем Григорьевичем, показавшим подходы к критическому анализу возможных негативных последствий геоинженеринга, вдохновлявшим на анализ и синтез научной информации в этой малознакомой российскому ученому области, боровшимся за научную справедливость и место климатической инженерии среди наук о Земле.

Литература

Будыко, М.И. (1974) Метод воздействия на климат, *Метеорология и гидрология*, № 2, с. 91-97.

Гинзбург, В.А., Кострыкин, С.В., Рябошапко, А.Г., Ревокатова, А.П., Бушмелев, И.О. (2020) Условия стабилизации средней глобальной приповерхностной температуры на уровнях +2 и +1.5°C при использовании геоинженерного метода на основе стратосферных аэрозолей, *Метеорология и гидрология*, № 5, с. 66-76.

Ревокатова, А.П., Рябошапко, А.Г. (2015) Технические возможности создания аэрозольного слоя в стратосфере с целью стабилизации климата, *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*, т. XXVI, № 2, с. 115-127.

Ревокатова, А.П., Рябошапко, А.Г. (2013) Ранжирование степени угроз негативных побочных эффектов применения геоинженерии климата, *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*, т. XXV, с. 9-28.

Ahlm, L., Jones, A., Stjern, C.W., Muri, H., Kravitz, B., Kristjánsson, J.E. (2017) Marine cloud brightening – as effective without clouds, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, doi:10.5194/acp-2017-484.

Akbari, H., Matthews, H.D., Seto, D. (2012) The long-term effect of increasing the albedo of urban areas, *Environ. Res. Lett.*, vol. 7, 24004, doi:10.1088/1748-9326/7/2/024004.

Alterskjær, K., Kristjánsson, J.E., Boucher, O., Muri, H., Niemeier, U., Schmidt, H., Schulz, M., Timmreck, C. (2013) Sea-salt injections into the low-latitude marine boundary layer: The transient response in three Earth system models, *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 118, pp. 12,195-12,206, doi:10.1002/2013JD020432.

Angel, R. (2006) Feasibility of cooling the Earth with a cloud of small spacecraft near the inner Lagrange point (L1), *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, vol. 103, pp. 17184-17189, doi:10.1073/pnas.0608163103.

Aquila, V., Garfinkel, C., Newman, P., Oman, L., Waugh, D. (2014) Modifications of the quasi-biennial oscillation by a geoengineering perturbation of the stratospheric aerosol layer, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 41, pp. 1738-1744.

Aswathy, V.N., Boucher, O., Quaas, M., Niemeier, U., Muri, H., Mülmenstädt, J., Quaas, J. (2015) Climate extremes in multi-model simulations of stratospheric aerosol and marine cloud brightening climate engineering, *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 15, pp. 9593-9610, available at: www.atmos-chem-phys.net/15/9593/2015/ doi:10.5194/acp-15-9593-2015.

Bala, G., Caldeira, K., Nemani, R., Cao, L., Ban-Weiss, G., Shin, H.-J. (2011) Albedo enhancement of marine clouds to counteract global warming: Impacts on the hydrological cycle, *Clim. Dyn.*, vol. 37, pp. 915-931, doi:10.1007/s00382-010-0868-1.

Bernstein, D.N., Neelin, J.D., Li, Q.B., Chen, D. (2013) Could aerosol emissions be used for regional heat wave mitigation? *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 13(13), pp. 6373-6390, available at: <https://doi.org/10.5194/acp-13-6373-2013>.

Boucher, O., Forster, P.M., Gruber, N., Ha-Duong, M., Lawrence, M.G., Lenton, T.M., Maas, A., Vaughan, N.E. (2013) Rethinking climate engineering categorization in the context of climate change mitigation and adaptation, *WIREs, Clim. Change*, doi: 10.1002/wcc.261.

Butler, A.H., Thompson, D.W., Heikes, R. (2010). The steady-state atmospheric circulation response to climate change-like thermal forcings in a simple general circulation model, *Journal of Climate*, vol. 23(13), pp. 3474-3496, available at: <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3228.1>.

Chen, Y., Xin, Y., (2017) Implications of geoengineering under the 1.5°C target: Analysis and policy suggestions, *Advances in Climate Change Research*, available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.accre.2017.05.003>.

Crook, J., Jackson, L.S., Osprey, S.M., Forster, P.M. (2015) A comparison of temperature and precipitation responses to different Earth radiation management geoengineering schemes, *J. Geophys. Res.*, vol. 120, doi:10.1002/2015JD023269.

Crutzen, P.J. (2006) Albedo Enhancement by Stratospheric Sulfur Injections: A Contribution to Resolve a Policy Dilemma? *Clim. Change*, vol. 77, pp. 211-220, doi:10.1007/s10584-006-9101-y, available at: <http://link.springer.com/10.1007/s10584-006-9101-y>.

Curry, C.L., Sillmann, J., Bronaugh, D., Alterskjaer, K., Cole, J.N.S., Ji, D., Kravitz, B., Kristjánsson, J.E., Moore, J.C., Muri, H. et al. (2014) A multi-model examination of climate extremes in an idealized geoengineering experiment. *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 119, pp. 3900-3923, doi:10.1002/2013JD020648.

Davidson, P., Burgoyne, C., Hunt, H., Causier, M. (2011) Lifting options for stratospheric aerosol geoengineering: advantages of tethered balloon systems, *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. A370, pp. 4263-4300, doi:10.1098/rsta.2011.0639.

Davin, E.L., Seneviratne, S.I., Ciais, P., Olliso, A., Wang, T. (2014) Preferential cooling of hot extremes from cropland albedo management, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 111(27), pp. 9757-9761, available at: <https://doi.org/10.1073/pnas.1317323111>.

Dykema, J.A., Keith, D.W., Keutsch, F.N. (2016) Improved aerosol radiative properties as a foundation for solar geoengineering risk assessment, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 43, pp. 7758-7766, doi:10.1002/2016GL069258.

English, J.M., Toon, O.B., Mills, M.J. (2012) Microphysical simulations of sulfur burdens from stratospheric sulfur geoengineering, *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 12, pp. 4775-4793, doi:10.5194/acp-12-4775-2012.

Ferraro, A.J., Highwood, E.J., Charlton-Perez, A.J. (2014) Weakened tropical circulation and reduced precipitation in response to geoengineering, *Environ. Res. Lett.*, vol. 9, 14001, doi:10.1088/1748-9326/9/1/014001, available at: <http://stacks.iop.org/1748-9326/9/i=1/a=014001?key=crossref.878d5812d41285f5514caa-5402e63c3>.

Harding, A.R., Ricke, K., Heyen, D. et al. (2020) Climate econometric models indicate solar geoengineering would reduce inter-country income inequality, *Nat. Commun.*, vol. 11, p. 227, available at: <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13957-x>.

Irvine, P., Emanuel, K., He, J. et al. (2019) Halving warming with idealized solar geoengineering moderates key climate hazards, *Nat. Clim. Chang.*, vol. 9, pp. 295-299, available at: <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0398-8>.

Irvine, P., Keith, D. (2020) Halving warming with stratospheric aerosol geoengineering moderates policy-relevant climate hazards, *Environ. Res. Lett.*, vol. 15, 044011.

Irvine, P.J., Ridgwell A., Lunt, D.J. (2011) Climatic effects of surface albedo geoengineering, *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 116, doi:10.1029/2011JD016281.

Irvine, P.J., Kravitz, B., Lawrence, M.G., Muri, H. (2016) An overview of the Earth system science of solar geoengineering, *Wiley Interdiscip. Rev. Clim. Chang.*, vol. 7, pp. 815-833, doi:10.1002/wcc.423.

Irvine, P. et al. (2017) Towards a comprehensive climate impacts assessment of solar geoengineering, *Earth's Future*, vol. 5, pp. 93-106, doi:10.1002/ef2.174.

Irvine, P.J., Ridgwell, A., Lunt, D.J. (2011) Climatic effects of surface albedo geoengineering, *J. Geophys. Res.*, vol. 116, D24112.

Izrael, Y.A., Volodin, E.M., Kostykin, S.V., Revokatova, A.P., Ryaboshapko, A.G. (2014) The ability of stratospheric climate engineering in stabilizing global mean temperatures and an assessment of possible side effects, *Atmos. Sci. Lett.*, vol. 15, pp. 140-148, doi:10.1002/asl2.481.

Jacobson, M.Z., Ten Hoeve, J.E. (2012) Effects of urban surfaces and white roofs on global and regional climate, *J. Clim.*, vol. 25, pp. 1028-1044, doi:10.1175/JCLI-D-11-00032.1.

Jones, A., Haywood, J. Boucher, O. (2009) Climate impacts of geoengineering marine stratocumulus clouds, *J. Geophys. Res.*, vol. 114, doi:10.1029/2008JD011450.

Jones, A., Haywood, J.M. (2012) Sea-spray engineering in the HadGEM2-ES earth-system model: radiative impact and climate response, *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 12, pp. 10887-10898, doi:10.5194/acp-12-10887-2012.

Jones, A., et al. (2013), The impact of abrupt suspension of solar radiation management (termination effect) in experiment G2 of the Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP), *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 118, pp. 9743-9752, doi:10.1002/jgrd.50762.

Kashimura, H., Abe, M., Watanabe, S., Sekiya, T., Ji, D., Moore, J.C., Cole, J.N.S., Kravitz, B. (2017) Shortwave radiative forcing, rapid adjustment, and feedback to the surface by sulfate geoengineering: analysis of the Geoengineering Model Intercomparison Project G4 scenario, *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 17, pp. 3339-3356, available at: www.atmos-chem-phys.net/17/3339/2017/ doi:10.5194/acp-17-3339-2017.

Keith, D.W., MacMartin, D.G. (2015). A temporary, moderate and responsive scenario for solar geoengineering, *Nature Climate Change*, vol. 5(3), pp. 201-206, available at: <https://doi.org/10.1038/nclimate2493>.

Keith, D.W., Irvine, P.J. (2016) Solar geoengineering could substantially reduce climate risks a research hypothesis for the next decade, *Earth's Futur.*, vol. 4, 2016EF000465, doi:10.1002/2016EF000465.

Kravitz B., MacMartin D.G., Alan Robock *et al.* (2014) A multi-model assessment of regional climate disparities caused by solar geoengineering, *Environ. Res. Lett.*, vol. 9, 074013.

Kravitz, B., MacMartin, D. G., Mills, M. J., Richter, J. H., Tilmes, S., Lamarque, J.-F., Vitt, F. (2017) First simulations of designing stratospheric sulfate aerosol geoengineering to meet multiple simultaneous climate objectives, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 122, pp. 12,616-12,634, available at: <https://doi.org/10.1002/2017JD026874>.

Kravitz, B., Caldeira, K., Boucher, O., Robock, A., Rasch, P.J., Alterskjær, K., Yoon, J.-H. (2013). Climate model response from the Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP), *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 118, pp. 8320-8332, available at: <https://doi.org/10.1002/jgrd.50646>.

Kravitz, B., Robock, A., Boucher, O., Schmidt, H., Taylor, K.E., Stenchikov, G., Schulz, M. (2011) The Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP), *Atmos. Sci. Lett.*, vol. 12, pp. 162-167.

Laakso, A. et al. (2012) Stratospheric passenger flights are likely an inefficient geoengineering strategy, *Environ. Res. Lett.*, vol. 7, 034021.

Laakso, A., Kokkola, H., Partanen, A.-I., Niemeier, U., Timmreck, C., Lehtinen, K.E.J. et al. (2016). Radiative and climate impacts of a large volcanic eruption during stratospheric sulfur geoengineering, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 16(1), pp. 305-323.

Latham, J. et al. (2012) Marine cloud brightening, *Phil. Trans. Royal Soc.*, vol. A 370, pp. 4217-4262.

Latham, J., Parkes, B., Alan, G., Salter, S. (2012) Weakening of hurricanes via marine cloud brightening, *Atmos. Sci. Lett.*, vol. 13, pp. 231-237.

Latham, J. (2002) Amelioration of global warming by controlled enhancement of the albedo and longevity of low-level maritime clouds, *Atmos. Sci. Lett.*, vol. 3, p. 52, doi:10.1006/asle.2002.0048.

Latham, J. (1990) Control of global warming? *Nature*, vol. 347, pp. 339-340, available at: <https://doi.org/10.1038/347339b0>.

Latham, J., Rasch, P., Chen, C.-C.J., Kettles, L., Gadian, A., Gettelman, A., Morrison, H., Bower, K., Choulaton, T. (2008) Global temperature stabilization via controlled albedo enhancement of low-level maritime clouds, *Phil. Trans. R. Soc.*, vol. A366, pp. 3969-3987, doi:10.1098/rsta.2008.0137.

Latham, J., Gadian, A., Fournier, J., Parkes, B., Wadhams, P., Chen, J. (2014) Marine cloud brightening: regional applications, *Philos. Trans. A. Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 372, 20140053, doi:10.1098/rsta.2014.0053.

Lunt, D.J., Ridgwell, A., Valdes, P.J., Seale, A. (2008) “Sunshade World”: a fully coupled GCM evaluation of the climatic impacts of geoengineering, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 35, L12710, doi:10.1029/2008gl033674.

MacMartin, D.G., Kravitz, B., Tilmes, S., Richter, J.H., Mills, M.J., Lamarque, J.-F., Tribbia, J.J., Vitt, F. (2017). The climate response to stratospheric aerosol geoengineering can be tailored using multiple injection locations, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 122, pp. 12,574-12,590, available at: <https://doi.org/10.1002/2017JD026868>.

MacMartin, D.G., Ricke, K.L., Keith, D.W. (2018) Solar Geoengineering as part of an overall strategy for meeting the 1.5°C Paris target, *Phil. Trans. R. Soc.*, A.37620160454, doi: <https://doi.org/10.1098/rsta.2016.0454>.

Malik, A., Nowack, P.J., Haigh, J.D., Cao, L., Atique, L., Plancherel, Y. (2020) Tropical Pacific climate variability under solar geoengineering: impacts on ENSO extremes, *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 20, pp. 15461-15485, available at: <https://doi.org/10.5194/acp-20-15461-2020>.

McClellan, J., Keith, D.W., Apt, J. (2012) Cost analysis of stratospheric albedo modification delivery systems, *Environ. Res. Lett.*, vol. 7, 034019.

Mills, M.J., Richter, J.H., Tilmes, S., Kravitz, B., MacMartin, D.G., Glanville, A.A., Kinnison, D.E. (2017) Radiative and chemical response to interactive stratospheric sulfate aerosols in fully coupled CESM1(WACCM), *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 122, pp. 13,061-13,078, available at: <https://doi.org/10.1002/2017JD027006>.

Mitchell, D.L., Finnegan, W. (2009), Modification of cirrus clouds to reduce global warming, *Environ. Res. Lett.*, vol. 4, 045102, doi:10.1088/1748-9326/4/4/045102.

Muri, H., Kristjánsson, J.E., Storelvmo, T., Pfeffer, M.A. (2014) The climatic effects of modifying cirrus clouds in a climate engineering framework, *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 119, pp. 4174-4191, doi:10.1002/2013JD021063.

Niemeier, U., Schmidt, H. (2017). Changing transport processes in the strato397 sphere by radiative heating of sulfate aerosols, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 17 (24), pp. 14871-14886, available at: <https://www.atmos-chem-phys.net/17/14871/2017/doi:10.5194/acp-17-14871-2017>.

Niemeier, U., Schmidt, H., Alterskjaer, K., Kristjánsson, J.E. (2013) Solar irradiance reduction via climate engineering: Impact of different techniques on the energy balance and the hydrological cycle, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, vol. 118, pp. 11,905-11,917, doi:10.1002/2013JD020445.

O'Neill, B.C., Tebaldi, C., Van Vuuren, D.P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G. et al. (2016) The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, vol. 9(9), pp. 3461-3482, available at: <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>.

Pitari, G., Genova, G.D., Mancini, E., Visionsi, D., Gandol, I., Cionni, I. (2016) Stratospheric aerosols from major volcanic eruptions: A composition-climate model study of the aerosol cloud dispersal and e-folding time, *Atmosphere*, available at: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2s2.04976884421&partnerID=MN8TOARS>, doi: 10.3390/atmos7060075.

Revokatova, A., Coninck, H., Forster, P., Ginzburg, V., Kala, J., Liverman, D., Plazzotta, M., Seferian, R., Seneviratne, S.I., Sillmann, J. (2018) Solar Radiation Modification in the Context of 1.5°C Mitigation Pathways, *Global warming of 1.5°C, An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*, in V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (eds.), Ch. 4, Cross-chapter box 10, pp. 349-351.

- Reynolds, J.L., Parker, A., Irvine, P. (2016) Five solar geoengineering tropes that have outstayed their welcome, *Earth's Futur*, doi:10.1002/2016EF000416.
- Richter, J.H., Tilmes, S., Mills, M.J., Tribbia, J.J., Kravitz, B., Macmartin, D.G., Lamarque, J.F. (2017) Stratospheric dynamical response and ozone feedbacks in the presence of SO₂ injections, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 122 (23), 12,557-12,573, doi: 10.1002/2017JD026912.
- Robock, A. (2014) Stratospheric aerosol geoengineering, *Geoeng Clim Sys*, vol. 38, pp. 162-185.
- Robock, A. (2000) Volcanic eruptions and climate, *Reviews of Geophysics*, vol. 38 (2), pp. 191-219, available at: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/1998RG000054>, doi: 10.1029/1998RG000054.
- Robock, A. (2008), 20 reasons why geoengineering may be a bad idea, *Bull. At. Sci.*, vol. 64, pp. 14-18, doi:10.2968/064002006.
- Robrecht, S., Vogel, B., Tilmes, S., Müller, R. (2021) Potential of future stratospheric ozone loss in the midlatitudes under global warming and sulfate geoengineering, *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 21, pp. 2427-2455, available at: <https://doi.org/10.5194/acp-21-2427-2021>.
- Rogelj, J., Shindell, D., Jiang, K., Fifita, S., Forster, P., Ginzburg, V., Handa, C., Kheshgi, H., Kobayashi, S., Kriegler, E., Mundaca, L., Séférian, R., Vilariño, M.V. (2018) Mitigation pathways compatible with 1.5°C in the context of sustainable development, *Global warming of 1.5°C, An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*, in V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (eds.)
- Salter Stephen, Sortino Graham, Latham John (2008) Sea-going hardware for the cloud albedo method of reversing global warming, *Phil. Trans. R. Soc.*, vol. A366, pp. 3989-4006, doi:10.1098/rsta.2008.0136.
- Schäfer, S. et al. (2013) Field tests of solar climate engineering, *Nature Climate Change*, vol. 3, p. 766.
- Seidel, Dian J., Feingold Graham, Jacobso, Andrew R., Loeb Norman (2014) Detection limits of albedo changes induced by climate engineering, *Nature Climate Change*, vol. 4, issue 3, p. 228.
- Seneviratne, S.I., Phipps, S.J., Pitman, A.J. et al. (2018) Land radiative management as contributor to regional-scale climate adaptation and mitigation, *Nature Geosci.*, vol. 11, pp. 88-96, available at: <https://doi.org/10.1038/s41561-017-0057-5>.
- Schmidt, H. et al. (2012) Solar irradiance reduction to counteract radiative forcing from a quadrupling of CO₂: Climate responses simulated by four Earth system models, *Earth Syst. Dyn.*, vol. 3, pp. 63-78.
-

Tilmes, S., Muller, R., Salawitch, R. (2008) The sensitivity of polar ozone depletion to proposed geoengineering schemes, *Science*, vol. 320, pp. 1201-1204, doi:10.1126/science.1153966.

Tilmes, S., Sanderson, B.M., O'Neill, B.C. (2016), Climate impacts of geoengineering in a delayed mitigation scenario, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 43, doi:10.1002/2016GL070122.

Tilmes, S., MacMartin, D.G., Lenaerts, J.T.M., van Kampenhout, L., Muntjewerf, L., Xia, L., Harrison, C.S., Krumhardt, K.M., Mills, M.J., Kravitz, B., Robock, A. (2020) Reaching 1.5 and 2.0°C global surface temperature targets using stratospheric aerosol geoengineering, *Earth Syst. Dynam.*, vol. 11, pp. 579-601, available at: <https://doi.org/10.5194/esd-11-579-2020>.

Tilmes, S., Richter, J.H., Mills, M.J., Kravitz, B., MacMartin, D.G., Vitt, F., Lamarque, J.-F. (2017). Sensitivity of aerosol distribution and climate response to stratospheric injection locations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122, available at: <https://doi.org/10.1002/2017JD026888>.

Tilmes, S., Richter, J.H., Kravitz, B., MacMartin, D.G., Mills, M.J., Simpson, I.R. et al. (2018) CESM1(WACCM) Stratospheric Aerosol Geoengineering Large Ensemble Project, *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 99(11), pp. 2361-2371.

Visioni, D., Pitari, G., Aquila, V. (2017a) Sulfate geoengineering: review of the factors controlling the needed injection of sulfur dioxide, *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 17, pp. 3879-3889, available at: www.atmos-chem-phys.net/17/3879/2017/ doi:10.5194/acp-17-3879-2017.

Visioni, D., Pitari, G., Aquila, V., Tilmes, S., Cionni, I., Di Genova, G., Mancini, E. (2017b) Sulfate geoengineering impact on methane transport and life-time: results from the geoengineering model intercomparison project (GeoMip), *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 17 (18), pp. 11209-11226, doi: 10.5194/acp-17-11209-2017.

Visioni, D., Simpson, I.R., MacMartin, D.G., Richter, J.H., Kravitz B., Lee W. (2020) Reduced poleward transport due to stratospheric heating under geoengineering, *Geophysical Research Letters*, vol. 47, e2020GL089470, doi:10.1029/2020GL089470.

Wang, H., Rasch, P.J., Feingold, G. (2011) Manipulating marine stratocumulus cloud amount and albedo: A process-modelling study of aerosol-cloud-precipitation interactions in response to injection of cloud condensation nuclei, *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 11, pp. 4237-4249, doi:10.5194/acp-11-4237-2011.

Waugh, D.W., Sobel, A.H., Polvani, L.M. (2017). What is the polar vortex and how does it influence weather? *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 98 (1), pp. 37-44, doi: 10.1175/BAMS-D-15-00212.1.

Yin, J.H. (2005) A consistent poleward shift of the storm tracks in simulations of XXIst century climate, *Geophysical Research Letters*, 32, L18701, available at: <https://doi.org/10.1029/2005GL023684>.

References

Budyko, M.I. (1974) Metod vozdejstviya na klimat [Method of influencing the climate], *Meteorologiya i Gidrologiya*, no. 2, pp. 91-97.

Ginzburg, V.A., Kostykin, S.V., Ryaboshapko, A.G., Revokatova, A.P., Bushmelev, I.O. (2020) Usloviya stabilizacii srednej global'noj pripoverhnostnoj temperatury na urovnayah +2 i +1.5°C pri ispol'zovanii geoinzhenernogo metoda na osnove stratosfernnyh aerorozlej [Conditions for stabilization of the average global near-surface temperature at the levels of +2 and + 1.5°C using the geoengineering method based on stratospheric aerosols], *Meteorologiya i Gidrologiya*, no. 5, pp. 66-76.

Revokatova, A.P., Ryaboshapko, A.G. (2015) Tekhnicheskie vozmozhnosti sozdaniya aeroroznogo sloya v stratosfere s cel'yu stabilizacii klimata [Technical possibilities of creating an aerosol layer in the stratosphere in order to stabilize the climate], *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem*, vol. XXVI, no. 2, pp. 115-127.

Revokatova, A.P., Ryaboshapko, A.G. (2013) Ranzhirovanie stepeni ugroz negativnyh pobochnyh effektov primeneniya geoinzhenerii klimata [Ranking the degree of threats of negative side effects of the application of climate geoengineering], *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem*, vol. XXV, pp. 9-28.

Ahlm, L., Jones, A., Stjern, C.W., Muri, H., Kravitz, B., Kristjánsson, J.E. (2017) Marine cloud brightening – as effective without clouds, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, doi:10.5194/acp-2017-484.

Akbari, H., Matthews, H. D., Seto, D. (2012) The long-term effect of increasing the albedo of urban areas, *Environ. Res. Lett.*, vol. 7, 24004, doi:10.1088/1748-9326/7/2/024004.

Alterskjær, K., Kristjánsson, J.E., Boucher, O., Muri, H., Niemeier, U., Schmidt, H., Schulz, M., Timmreck, C. (2013) Sea-salt injections into the low-latitude marine boundary layer: The transient response in three Earth system models, *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 118, pp. 12,195-12,206, doi:10.1002/2013JD020432.

Angel, R. (2006) Feasibility of cooling the Earth with a cloud of small spacecraft near the inner Lagrange point (L1), *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, vol. 103, pp. 17184-17189, doi:10.1073/pnas.0608163103.

Aquila, V., Garfinkel, C., Newman, P., Oman, L., Waugh, D. (2014) Modifications of the quasi-biennial oscillation by a geoengineering perturbation of the stratospheric aerosol layer, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 41, pp. 1738-1744.

Aswathy, V.N., Boucher, O., Quaas, M., Niemeier, U., Muri, H., Mülmenstädt, J., Quaas, J. (2015) Climate extremes in multi-model simulations of stratospheric aerosol and marine cloud brightening climate engineering, *Atmos. Chem. Phys.*,

vol. 15, pp. 9593-9610, available at: www.atmos-chem-phys.net/15/9593/2015/
doi:10.5194/acp-15-9593-2015.

Bala, G., Caldeira, K., Nemani, R., Cao, L., Ban-Weiss, G., Shin, H.-J. (2011) Albedo enhancement of marine clouds to counteract global warming: Impacts on the hydrological cycle, *Clim. Dyn.*, vol. 37, pp. 915-931, doi:10.1007/s00382-010-0868-1.

Bernstein, D.N., Neelin, J.D., Li, Q.B., Chen, D. (2013) Could aerosol emissions be used for regional heat wave mitigation? *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 13(13), pp. 6373-6390, available at: <https://doi.org/10.5194/acp-13-6373-2013>.

Boucher, O., Forster, P.M., Gruber, N., Ha-Duong, M., Lawrence, M.G., Lenton, T.M., Maas, A., Vaughan, N.E. (2013) Rethinking climate engineering categorization in the context of climate change mitigation and adaptation, *WIREs, Clim. Change*, doi: 10.1002/wcc.261.

Butler, A.H., Thompson, D.W., Heikes, R. (2010). The steady-state atmospheric circulation response to climate change-like thermal forcings in a simple general circulation model, *Journal of Climate*, vol. 23(13), pp. 3474-3496, available at: <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3228.1>.

Chen, Y., Xin, Y., (2017) Implications of geoengineering under the 1.5°C target: Analysis and policy suggestions, *Advances in Climate Change Research*, available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.accre.2017.05.003>.

Crook, J., Jackson, L.S., Osprey, S.M., Forster, P.M. (2015) A comparison of temperature and precipitation responses to different Earth radiation management geoengineering schemes, *J. Geophys. Res.*, vol. 120, doi:10.1002/2015JD023269.

Crutzen, P.J. (2006) Albedo Enhancement by Stratospheric Sulfur Injections: A Contribution to Resolve a Policy Dilemma? *Clim. Change*, vol. 77, pp. 211-220, doi:10.1007/s10584-006-9101-y, available at: <http://link.springer.com/10.1007/s10584-006-9101-y>.

Curry, C.L., Sillmann, J., Bronaugh, D., Alterskjaer, K., Cole, J.N.S., Ji, D., Kravitz, B., Kristjánsson, J.E., Moore, J.C., Muri, H. et al. (2014) A multi-model examination of climate extremes in an idealized geoengineering experiment. *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 119, pp. 3900-3923, doi:10.1002/2013JD020648.

Davidson, P., Burgoyne, C., Hunt, H., Causier, M. (2011) Lifting options for stratospheric aerosol geoengineering: advantages of tethered balloon systems, *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. A370, pp. 4263-4300, doi:10.1098/rsta.2011.0639.

Davin, E.L., Seneviratne, S.I., Ciais, P., Orlowski, A., Wang, T. (2014) Preferential cooling of hot extremes from cropland albedo management, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 111(27), pp. 9757-9761, available at: <https://doi.org/10.1073/pnas.1317323111>.

Dykema, J.A., Keith, D.W., Keutsch, F.N. (2016) Improved aerosol radiative properties as a foundation for solar geoengineering risk assessment, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 43, pp. 7758-7766, doi:10.1002/2016GL069258.

English, J.M., Toon, O.B., Mills, M.J. (2012) Microphysical simulations of sulfur burdens from stratospheric sulfur geoengineering, *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 12, pp. 4775-4793, doi:10.5194/acp-12-4775-2012.

Ferraro, A.J., Highwood, E.J., Charlton-Perez, A.J. (2014) Weakened tropical circulation and reduced precipitation in response to geoengineering, *Environ. Res. Lett.*, vol. 9, 14001, doi:10.1088/1748-9326/9/1/014001, available at: <http://stacks.iop.org/1748-9326/9/i=1/a=014001?key=crossref.878d5812d41285f5514acaa-5402e63c3>.

Harding, A.R., Ricke, K., Heyen, D. et al. (2020) Climate econometric models indicate solar geoengineering would reduce inter-country income inequality, *Nat. Commun.*, vol. 11, p. 227, available at: <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13957-x>.

Irvine, P., Emanuel, K., He, J. et al. (2019) Halving warming with idealized solar geoengineering moderates key climate hazards, *Nat. Clim. Chang.*, vol. 9, pp. 295-299, available at: <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0398-8>.

Irvine, P., Keith, D. (2020) Halving warming with stratospheric aerosol geoengineering moderates policy-relevant climate hazards, *Environ. Res. Lett.*, vol. 15, 044011.

Irvine, P.J., Ridgwell A., Lunt, D.J. (2011) Climatic effects of surface albedo geoengineering, *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 116, doi:10.1029/2011JD016281.

Irvine, P.J., Kravitz, B., Lawrence, M.G., Muri, H. (2016) An overview of the Earth system science of solar geoengineering, *Wiley Interdiscip. Rev. Clim. Chang.*, vol. 7, pp. 815-833, doi:10.1002/wcc.423.

Irvine, P. et al. (2017) Towards a comprehensive climate impacts assessment of solar geoengineering, *Earth's Future*, vol. 5, pp. 93-106, doi:10.1002/ef2.174.

Irvine, P.J., Ridgwell, A., Lunt, D.J. (2011) Climatic effects of surface albedo geoengineering, *J. Geophys. Res.*, vol. 116, D24112.

Izrael, Y.A., Volodin, E.M., Kostykin, S.V., Revokatova, A.P., Ryaboshapko, A.G. (2014) The ability of stratospheric climate engineering in stabilizing global mean temperatures and an assessment of possible side effects, *Atmos. Sci. Lett.*, vol. 15, pp. 140-148, doi:10.1002/asl2.481.

Jacobson, M.Z., Ten Hoeve, J.E. (2012) Effects of urban surfaces and white roofs on global and regional climate, *J. Clim.*, vol. 25, pp. 1028-1044, doi:10.1175/JCLI-D-11-00032.1.

Jones, A., Haywood, J. Boucher, O. (2009) Climate impacts of geoengineering marine stratocumulus clouds, *J. Geophys. Res.*, vol. 114, doi:10.1029/2008JD011450.

Jones, A., Haywood, J.M. (2012) Sea-spray engineering in the HadGEM2-ES earth-system model: radiative impact and climate response, *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 12, pp. 10887-10898, doi:10.5194/acp-12-10887-2012.

Jones, A., et al. (2013), The impact of abrupt suspension of solar radiation management (termination effect) in experiment G2 of the Geoengineering Model

Intercomparison Project (GeoMIP), *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 118, pp. 9743-9752, doi:10.1002/jgrd.50762.

Kashimura, H., Abe, M., Watanabe, S., Sekiya, T., Ji, D., Moore, J.C., Cole, J.N.S., Kravitz, B. (2017) Shortwave radiative forcing, rapid adjustment, and feedback to the surface by sulfate geoengineering: analysis of the Geoengineering Model Intercomparison Project G4 scenario, *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 17, pp. 3339-3356, available at: www.atmos-chem-phys.net/17/3339/2017/ doi:10.5194/acp-17-3339-2017.

Keith, D.W., MacMartin, D.G. (2015). A temporary, moderate and responsive scenario for solar geoengineering, *Nature Climate Change*, vol. 5(3), pp. 201-206, available at: <https://doi.org/10.1038/nclimate2493>.

Keith, D.W., Irvine, P.J. (2016) Solar geoengineering could substantially reduce climate risks a research hypothesis for the next decade, *Earth's Futur.*, vol. 4, 2016EF000465, doi:10.1002/2016EF000465.

Kravitz B., MacMartin D.G., Alan Robock *et al.* (2014) A multi-model assessment of regional climate disparities caused by solar geoengineering, *Environ. Res. Lett.*, vol. 9, 074013.

Kravitz, B., MacMartin, D.G., Mills, M.J., Richter, J.H., Tilmes, S., Lamarque, J.-F., Vitt, F. (2017) First simulations of designing stratospheric sulfate aerosol geoengineering to meet multiple simultaneous climate objectives, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 122, pp. 12,616-12,634, available at: <https://doi.org/10.1002/2017JD026874>.

Kravitz, B., Caldeira, K., Boucher, O., Robock, A., Rasch, P.J., Alterskjær, K., Yoon, J.-H. (2013). Climate model response from the Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP), *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 118, pp. 8320-8332, available at: <https://doi.org/10.1002/jgrd.50646>.

Kravitz, B., Robock, A., Boucher, O., Schmidt, H., Taylor, K.E., Stenchikov, G., Schulz, M. (2011) The Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP), *Atmos. Sci. Lett.*, vol. 12, pp. 162-167.

Laakso, A. et al. (2012) Stratospheric passenger flights are likely an inefficient geoengineering strategy, *Environ. Res. Lett.*, vol. 7, 034021.

Laakso, A., Kokkola, H., Partanen, A.-I., Niemeier, U., Timmreck, C., Lehtinen, K.E.J. et al. (2016). Radiative and climate impacts of a large volcanic eruption during stratospheric sulfur geoengineering, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 16(1), pp. 305-323.

Latham, J. et al. (2012) Marine cloud brightening, *Phil. Trans. Royal Soc.*, vol. A 370, pp. 4217-4262.

Latham, J., Parkes, B., Alan, G., Salter, S. (2012) Weakening of hurricanes via marine cloud brightening, *Atmos. Sci. Lett.*, vol. 13, pp. 231-237.

Latham, J. (2002) Amelioration of global warming by controlled enhancement of the albedo and longevity of low-level maritime clouds, *Atmos. Sci. Lett.*, vol. 3, p. 52, doi:10.1006/asle.2002.0048.

Latham, J. (1990) Control of global warming? *Nature*, vol. 347, pp. 339-340, available at: <https://doi.org/10.1038/347339b0>.

Latham, J., Rasch, P., Chen, C.-C.J., Kettles, L., Gadian, A., Gettelman, A., Morrison, H., Bower, K., Choulaton, T. (2008) Global temperature stabilization via controlled albedo enhancement of low-level maritime clouds, *Phil. Trans. R. Soc.*, vol. A366, pp. 3969-3987, doi:10.1098/rsta.2008.0137.

Latham, J., Gadian, A., Fournier, J., Parkes, B., Wadhams, P., Chen, J. (2014) Marine cloud brightening: regional applications, *Philos. Trans. A. Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 372, 20140053, doi:10.1098/rsta.2014.0053.

Lunt, D.J., Ridgwell, A., Valdes, P.J., Seale, A. (2008) “Sunshade World”: a fully coupled GCM evaluation of the climatic impacts of geoengineering, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 35, L12710, doi:10.1029/2008gl033674.

MacMartin, D.G., Kravitz, B., Tilmes, S., Richter, J.H., Mills, M.J., Lamarque, J.-F., Tribbia, J.J., Vitt, F. (2017). The climate response to stratospheric aerosol geoengineering can be tailored using multiple injection locations, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 122, pp. 12,574-12,590, available at: <https://doi.org/10.1002/2017JD026868>.

MacMartin, D.G., Ricke, K.L., Keith, D.W. (2018) Solar Geoengineering as part of an overall strategy for meeting the 1.5°C Paris target, *Phil. Trans. R. Soc.*, A.37620160454, doi: <https://doi.org/10.1098/rsta.2016.0454>.

Malik, A., Nowack, P.J., Haigh, J.D., Cao, L., Atique, L., Plancherel, Y. (2020) Tropical Pacific climate variability under solar geoengineering: impacts on ENSO extremes, *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 20, pp. 15461-15485, available at: <https://doi.org/10.5194/acp-20-15461-2020>.

McClellan, J., Keith, D.W., Apt, J. (2012) Cost analysis of stratospheric albedo modification delivery systems, *Environ. Res. Lett.*, vol. 7, 034019.

Mills, M.J., Richter, J.H., Tilmes, S., Kravitz, B., MacMartin, D.G., Glanville, A.A., Kinnison, D.E. (2017) Radiative and chemical response to interactive stratospheric sulfate aerosols in fully coupled CESM1(WACCM), *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 122, pp. 13,061-13,078, available at: <https://doi.org/10.1002/2017JD027006>.

Mitchell, D.L., Finnegan, W. (2009), Modification of cirrus clouds to reduce global warming, *Environ. Res. Lett.*, vol. 4, 045102, doi:10.1088/1748-9326/4/4/045102.

Muri, H., Kristjánsson, J.E., Storelvmo, T., Pfeffer, M.A. (2014) The climatic effects of modifying cirrus clouds in a climate engineering framework, *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 119, pp. 4174-4191, doi:10.1002/2013JD021063.

Niemeier, U., Schmidt, H. (2017). Changing transport processes in the strato397 sphere by radiative heating of sulfate aerosols, *Atmospheric Chemistry and*

Physics, vol. 17(24), pp. 14871-14886, available at: <https://www.atmos-chem-phys.net/17/14871/2017/doi:10.5194/acp-17-14871-2017>.

Niemeier, U., Schmidt, H., Alterskjaer, K., Kristjánsson, J.E. (2013) Solar irradiance reduction via climate engineering: Impact of different techniques on the energy balance and the hydrological cycle, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, vol. 118, pp. 11,905-11,917, doi:10.1002/2013JD020445.

O'Neill, B.C., Tebaldi, C., Van Vuuren, D.P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G. et al. (2016) The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, vol. 9(9), pp. 3461-3482, available at: <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>.

Pitari, G., Genova, G.D., Mancini, E., Visioni, D., Gandol, I., Cionni, I. (2016) Stratospheric aerosols from major volcanic eruptions: A composition-climate model study of the aerosol cloud dispersal and e-folding time, *Atmosphere*, available at: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2s2.04976884421&partnerID=MN8TOARS>, doi: 10.3390/atmos7060075.

Revokatova, A., Coninck, H., Forster, P., Ginzburg, V., Kala, J., Liverman, D., Plazzotta, M., Seferian, R., Seneviratne, S.I., Sillmann, J. (2018) Solar Radiation Modification in the Context of 1.5°C Mitigation Pathways, *Global warming of 1.5°C*, An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty, in V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (eds.), Ch. 4, Cross-chapter box 10, pp. 349-351.

Reynolds, J.L., Parker, A., Irvine, P. (2016) Five solar geoengineering tropes that have outstayed their welcome, *Earth's Futur*, doi:10.1002/2016EF000416.

Richter, J.H., Tilmes, S., Mills, M.J., Tribbia, J.J., Kravitz, B., Macmartin, D.G., Lamarque, J.F. (2017) Stratospheric dynamical response and ozone feedbacks in the presence of SO₂ injections, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 122(23), 12,557-12,573, doi: 10.1002/2017JD026912.

Robock, A. (2014) Stratospheric aerosol geoengineering, *Geoeng Clim Sys*, vol. 38, pp. 162-185.

Robock, A. (2000) Volcanic eruptions and climate, *Reviews of Geophysics*, vol. 38 (2), pp. 191-219, available at: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/1998RG000054>, doi: 10.1029/1998RG000054.

Robock, A. (2008), 20 reasons why geoengineering may be a bad idea, *Bull. At. Sci.*, vol. 64, pp. 14-18, doi:10.2968/064002006.

Robrecht, S., Vogel, B., Tilmes, S., Müller, R. (2021) Potential of future stratospheric ozone loss in the midlatitudes under global warming and sulfate

geoengineering, *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 21, pp. 2427-2455, available at: <https://doi.org/10.5194/acp-21-2427-2021>.

Rogelj, J., Shindell, D., Jiang, K., Fifita, S., Forster, P., Ginzburg, V., Handa, C., Kheshgi, H., Kobayashi, S., Kriegler, E., Mundaca, L., Séférian, R., Vilariño, M.V. (2018) Mitigation pathways compatible with 1.5°C in the context of sustainable development, *Global warming of 1.5°C, An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*, in V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (eds.)

Salter Stephen, Sortino Graham, Latham John (2008) Sea-going hardware for the cloud albedo method of reversing global warming, *Phil. Trans. R. Soc.*, vol. A366, pp. 3989-4006, doi:10.1098/rsta.2008.0136.

Schäfer, S. et al. (2013) Field tests of solar climate engineering, *Nature Climate Change*, vol. 3, p. 766.

Seidel, Dian J., Feingold Graham, Jacobso, Andrew R., Loeb Norman (2014) Detection limits of albedo changes induced by climate engineering, *Nature Climate Change*, vol. 4, issue 3, p. 228.

Seneviratne, S.I., Phipps, S.J., Pitman, A.J. et al. (2018) Land radiative management as contributor to regional-scale climate adaptation and mitigation, *Nature Geosci.*, vol. 11, pp. 88-96, available at: <https://doi.org/10.1038/s41561-017-0057-5>.

Schmidt, H. et al. (2012) Solar irradiance reduction to counteract radiative forcing from a quadrupling of CO₂: Climate responses simulated by four Earth system models, *Earth Syst. Dyn.*, vol. 3, pp. 63-78.

Tilmes, S., Muller, R., Salawitch, R. (2008) The sensitivity of polar ozone depletion to proposed geoengineering schemes, *Science*, vol. 320, pp. 1201-1204, doi:10.1126/science.1153966.

Tilmes, S., Sanderson, B.M., O'Neill, B.C. (2016), Climate impacts of geoengineering in a delayed mitigation scenario, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 43, doi:10.1002/2016GL070122.

Tilmes, S., MacMartin, D.G., Lenaerts, J.T.M., van Kampenhout, L., Muntjewerf, L., Xia, L., Harrison, C.S., Krumhardt, K.M., Mills, M.J., Kravitz, B., Robock, A. (2020) Reaching 1.5 and 2.0°C global surface temperature targets using stratospheric aerosol geoengineering, *Earth Syst. Dynam.*, vol. 11, pp. 579-601, available at: <https://doi.org/10.5194/esd-11-579-2020>.

Tilmes, S., Richter, J.H., Mills, M.J., Kravitz, B., MacMartin, D.G., Vitt, F., Lamarque, J.-F. (2017). Sensitivity of aerosol distribution and climate response to stratospheric injection locations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122, available at: <https://doi.org/10.1002/2017JD026888>.

Tilmes, S., Richter, J.H., Kravitz, B., MacMartin, D.G., Mills, M.J., Simpson, I.R. et al. (2018) CESM1(WACCM) Stratospheric Aerosol Geoengineering Large Ensemble Project, *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 99(11), pp. 2361-2371.

Visioni, D., Pitari, G., Aquila, V. (2017a) Sulfate geoengineering: review of the factors controlling the needed injection of sulfur dioxide, *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 17, pp. 3879-3889, available at: www.atmos-chem-phys.net/17/3879/2017/ doi:10.5194/acp-17-3879-2017.

Visioni, D., Pitari, G., Aquila, V., Tilmes, S., Cionni, I., Di Genova, G., Mancini, E. (2017b) Sulfate geoengineering impact on methane transport and life-time: results from the geoengineering model intercomparison project (GeoMip), *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 17(18), pp. 11209-11226, doi: 10.5194/acp-17-11209-2017.

Visioni, D., Simpson, I.R., MacMartin, D.G., Richter, J.H., Kravitz B., Lee W. (2020) Reduced poleward transport due to stratospheric heating under geoengineering, *Geophysical Research Letters*, vol. 47, e2020GL089470, doi:10.1029/2020GL089470.

Wang, H., Rasch, P.J., Feingold, G. (2011) Manipulating marine stratocumulus cloud amount and albedo: A process-modelling study of aerosol-cloud-precipitation interactions in response to injection of cloud condensation nuclei, *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 11, pp. 4237-4249, doi:10.5194/acp-11-4237-2011.

Waugh, D.W., Sobel, A.H., Polvani, L.M. (2017). What is the polar vortex and how does it influence weather? *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 98(1), pp. 37-44, doi: 10.1175/BAMS-D-15-00212.1.

Yin, J.H. (2005) A consistent poleward shift of the storm tracks in simulations of 21st century climate, *Geophysical Research Letters*, 32, L18701, available at: <https://doi.org/10.1029/2005GL023684>.

Статья поступила в редакцию (Received): 11.06.2021.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 25.07.2021.

Принята к публикации (Accepted): 04.08.2021.

Для цитирования / For citation:

Ревокатова, А.П., Гинзбург, В.А. (2021) Методы управления солнечной радиацией: основные характеристики, потенциал и возможные последствия, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 7, № 3, с. 50-83, doi: 10.21513/2410-8758-2021-3-50-83.

Revokatova, A.P., Ginzburg, V.A. (2021) Solar radiation modification methods: main characteristics, potential and possible consequences, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 7, no. 3, pp. 50-83, doi:10.21513/2410-8758-2021-3-50-83.