

О ВОЗМОЖНОСТИ СОВМЕСТНОГО РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ СОХРАНЕНИЯ КЛИМАТА АРКТИКИ И ПОНИЖЕНИЯ УРОВНЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ В НОРИЛЬСКЕ

А.Г. Рябошапка^{1,2)*}, *С.В. Кострыкин*³⁾, *И.О. Бушмелев*¹⁾, *А.П. Ревокатова*^{1,2)}

¹⁾Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН,
Россия, 107258, г. Москва, ул. Глебовская, 20Б; *agryaboshapko@mail.ru

²⁾Институт географии РАН,
Россия, 119017, г. Москва, Старомонетный переулок, 29

³⁾Институт вычислительной математики РАН,
Россия, 119333, г. Москва, ул. Губкина, 8

Резюме. Рассмотрено геоинженерное воздействие на климатическую систему Арктики с использованием инъекции в нижнюю стратосферу диоксида серы как предшественника сульфатных аэрозолей. Предложен вариант использования соединений серы, выбрасываемых в настоящее время в приземный слой атмосферы комбинатом «ОАО Норильский Никель». Для расчетов использовалась модель глобальной земной климатической системы INMCM3. В расчетах принято, что концентрация парниковых газов (CO_2 , CH_4 и N_2O) до середины текущего века будет расти в соответствии со сценарием МГЭИК RCP8.5. Расчеты показали, что инъекция в нижнюю стратосферу 1.9 Мт SO_2 /год смогла бы существенно затормозить потепление Арктики и уменьшить риск полного исчезновения многолетнего ледового покрова в Северном Ледовитом океане. Кроме того, использование SO_2 из выбросов комбината «ОАО Норильский Никель» в качестве предшественника стратосферных сульфатных аэрозолей позволило бы уменьшить экстремально высокое загрязнение атмосферы г. Норильск.

Ключевые слова. Геоинженерия климата, стратосферные аэрозоли, стабилизация температуры, климат Арктики, изменение климата, Норильск, диоксид серы, загрязнение воздуха.

ON THE POSSIBILITY OF SIMULTANEOUS SOLUTION OF PROBLEMS OF THE ARCTIC CLIMATE PROTECTION AND DECREASE OF AIR POLLUTION LEVEL IN NORILSK

A.G. Ryaboshapko^{1,2)*}, *S.V. Kostrykin*³⁾, *I.O. Bushmelev*¹⁾, *A.P. Revokatova*^{1,2)}

¹⁾ Institute of Global Climate and Ecology of Roshydromet and RAS,
20B, Glebovskaya str., 107258, Moscow, Russia; *agryaboshapko@mail.ru

²⁾ Institute of Geography of RAS,
29, Staromonetnyi, 119017, Moscow, Russia

³⁾ Institute of Numerical Mathematics of RAS,
8, Gubkin str., 119333, Moscow, Russia

Summary. The geoengineering effect of sulfur dioxide injection into the lower stratosphere (as a precursor of sulfate aerosols) on the Arctic climate system is considered. It is supposed to use sulfur compounds currently emitting into the surface

atmospheric layer by "JSC NorNickel" enterprise. The global model of the earth climate system INMCM3 is used for the computation. The calculations are based on the assumption that concentrations of greenhouse gases (CO_2 , CH_4 и N_2O) will increase in accordance with IPCC scenario RCP8.5 until the middle of this century. Calculations have shown that injection of 1.9 Mt SO_2 /year into the lower stratosphere could slow down significantly the Arctic warming and reduce risk of total dissolution of the Arctic Ocean multiyear ice cover. In addition, the use of SO_2 emitted by "JSC NorNickel" enterprise as a precursor of stratospheric sulfate aerosols would decrease extremely high atmospheric pollution level in Norilsk.

Keywords. Climate geoengineering, stratospheric aerosols, temperature stabilization, Arctic climate, climate change, Norilsk, sulfur dioxide, air pollution.

Введение

Практически не остается сомнений в том, что средняя глобальная приземная температура становится все выше, как и в том, что основной причиной роста является антропогенная эмиссия в атмосферу парниковых газов, главным образом, CO_2 (IPCC, 2013; ВМО, 2015). Наиболее ярко эффект потепления проявляется в арктическом регионе, где средняя температура возросла на 2-4°C, площадь морских льдов сокращается на 13% за декаду в период с 1979 по 2012 гг (NAS, 2015). Самый важный фактор, определяющий ситуацию в Арктике*, - это положительная обратная связь между изменяющимся альбедо поверхности (лед или морская вода) Северного Ледовитого океана (СЛО) и сокращающейся площадью ледового покрытия (ПЛП) (IPCC, 2013; Cvijanovic et al., 2015). Модельные расчеты показывают, что при сохранении темпов роста выбросов в атмосферу парниковых газов к концу текущего века многолетний лед в СЛО исчезнет полностью (Van-Weiss and Caldeira, 2010), при этом процесс может носить необратимый характер (Keith, 2000; Newton et al., 2016). Важно отметить, что по мнению МакКракена и др. (MacCracken et al., 2013) потепление в высоких широтах уже не может быть остановлено только за счет снижения антропогенных выбросов парниковых газов.

Такие резкие изменения климата могут привести к серьезным изменениям параметров арктической среды. В литературе чаще всего упоминается опасность нарушения биоразнообразия (в частности, исчезновение популяции белых медведей). Нагрев ведет к существенной деградации вечной мерзлоты, что чревато возникновением проблем с нарушением хозяйственной инфраструктуры, расположенной на этой территории. Кроме того, таяние вечной мерзлоты служит причиной высвобождения в атмосферу метана – важного парникового газа. Таким образом, возникает положительная обратная связь между ростом эмиссии метана и ростом температуры, способным принять взрывной характер (IPCC, 2013). Однако, можно отметить изменения, носящие для человека позитивный характер: распространение на север террито-

* Под термином «Арктика» в настоящей работе понимается часть поверхности Земли, лежащей севернее полярного круга (66.56°с.ш.)

рий землепользования, обеспечение свободного морского судоходства (Bickel and Lane, 2010), облегчение добычи углеводородов на морском шельфе.

К настоящему времени предложено несколько способов стабилизации климата Арктики и восстановления площади ледового покрытия (Ming et al., 2014). Принцип их реализации сводится в основном либо к повышению альbedo подстилающей поверхности, либо к созданию отражающего аэрозольного слоя в нижней стратосфере.

Альbedo морской воды лежит в пределах 0.05-0.1, то есть основная часть солнечной энергии морской водой поглощается. Для снежного покрова Арктики значение альbedo может лежать в пределах 0.7-0.86 (Дроздов и др., 1989). Столь большое различие в значениях альbedo наводит на мысль о том, что если покрыть поверхность существенной части полыней тонким слоем стойкого отражающего свет гидрозоля, поглощение солнечной энергии уменьшится, и температура в целом понизится (Seitz, 2011; Cvijanovic et al., 2015). Возможно повышение альbedo ледового покрова Арктики путем намораживания дополнительного льда при разбрызгивании морской воды в воздухе при отрицательных температурах. Этим создаются условия для наращивания толщины льда и заполнения полыней ледяным покровом.

Наиболее часто в литературе предлагается использовать геоинженерный метод стратосферных сульфатных аэрозолей (ССА), способных отражать коротковолновую солнечную радиацию, снижая тем самым поток солнечной энергии к подстилающей поверхности (Будыко, 1974; ASOC, 2010; Van-Weiss and Caldeira, 2010; Modak and Bala, 2013). Сульфатные субмикронные частицы должны образовывать отражающий слой на уровне нижней стратосферы (Keith, 2000).

При глобальном воздействии метода ССА на климат будут затронуты интересы всех без исключения стран, и эти интересы в применении инженерии климата могут не совпадать. В этом случае добиться консенсуса на применение метода ССА будет практически невозможно. В случае его применения в Арктике затрагиваются интересы небольшого числа стран, что облегчает нахождение консенсуса (Caldeira and Wood, 2008). В работах (Bickel and Lane, 2010; ASOC, 2010) отмечается, что применение метода ССА именно в Арктике могло бы рассматриваться как крупномасштабный эксперимент перед его глобальным использованием.

Целью данной работы явилось определение величин климатических параметров, обусловленных применением метода ССА (Будыко, 1974) в том гипотетическом случае, если SO_2 , выбрасываемый в приземную атмосферу расположенными в Арктике антропогенными источниками, тем или иным способом доставлять в стратосферу. Под климатическими параметрами понимается среднегодовая температура приповерхностного слоя воздуха в Арктике и в глобальном масштабе, а также среднегодовая площадь ледового покрытия в Арктике.

Отметим, что ранее возможность применения метода ССА для стабилизации глобальной температуры в XXI веке подробно исследовалась различными методами. Например, с помощью аналитического подхода (Чернокульский

и др. 2010), с помощью энергобалансовых радиационно-конвективных моделей (Фролькис и Кароль, 2010), с помощью климатических моделей промежуточной сложности (Елисеев и др., 2009, Елисеев и Мохов, 2009), а также в рамках совместной климатической модели (Володин и др., 2011).

Математическая модель климатических изменений в Арктике

В настоящее время единственно доступным способом оценки прогнозных характеристик климатических изменений природного или антропогенного генезиса является математическое моделирование процессов, протекающих в атмосфере, океане и в биосфере (IPCC, 2013). Для достижения поставленной цели использовалась модель глобальной земной климатической системы, включающей динамику атмосферы, динамику океана и углеродный цикл (INMCM3).

Модель INMCM3 была разработана в Институте вычислительной математики РАН (Володин, Дианский, 2006), имеет разрешение в атмосфере 5×4 градуса по долготе и широте, по вертикали 21 уровень до высоты 30 км. В океане разрешение составляет 2.5×2 градуса по долготе и широте и 33 уровня по вертикали. Следует отметить, что в модели INMCM3 в блоке расчета морского льда учитывается только тепловой баланс на границе океан-атмосфера и не учитывается динамика льда за счет внешних факторов – течений и ветрового воздействия. Также углеродный цикл в данной версии модели используется в неинтерактивном режиме, то есть не учитывается обратная связь углеродного цикла на концентрацию диоксида углерода в атмосфере.

Результаты моделирования современного климата, а также прогнозы будущего климата с помощью аналогичных моделей представлены в работах (Володин и Дианский, 2006, Володин и др., 2010).

Модель была дополнена блоком, описывающим цикл стратосферного сульфатного аэрозоля (Volodin et al., 2011). Данный блок учитывает процесс химической трансформации предшественников аэрозоля в аэрозольные частицы, а также физические процессы переноса – диффузии, гравитационного оседания и вымывания аэрозольных частиц осадками в тропосфере (Рябошапко, 2011; Володин и др., 2011). Кроме того, в текущем варианте этого блока предшественником сульфатных аэрозолей служил SO_2 , а не H_2S как ранее (Володин и др., 2011). Оценки времени жизни SO_2 в стратосфере (время уменьшения массы в e раз) относительно процессов окисления до сульфата, полученные различными авторами (Bluth et al., 1992; Song Guo et al., 2004; Rudnick, 2005; Wallace and Hobbs, 2006; Rasch et al., 2008), находятся в хорошем согласии друг с другом и приводят к величине 30 ± 5 дней. Заметим, что основным окислителем SO_2 в стратосфере является дневной радикал OH^\bullet . Авторы оценок времени жизни SO_2 основывались на наблюдениях за вулканическим облаком, распространявшимся в, главным образом, в тропической зоне, где продолжительность дневного и ночного времени примерно равна. Это означает, что для дневного времени коэффициент скорости окисления SO_2 дневным радикалом OH^\bullet будет в первом приближении в 2 раза выше.

Изменчивость скорости окисления SO_2 имеет принципиальное значение для Арктики, где инсоляция в течение года меняется от нуля в период полярной ночи до максимума в течение полярного дня (McCusker et al., 2012). Исходя из этого, в данной работе принято, что коэффициент скорости окисления SO_2 равен нулю в течение полярной ночи, с появлением солнца начинает расти, с наступлением полярного дня достигает двукратной величины от наблюдаемой в тропиках и вновь начинает снижаться до нуля с уменьшением инсоляции (McCusker et al., 2012).

Таким образом, при моделировании в расчет принималось то обстоятельство, что климатический эффект ССА в холодный (темный) сезон года либо минимален, либо полностью отсутствует в течение полярной ночи. В период полярного дня применение метода ССА может дать максимальный эффект (Govindasamy and Caldeira, 2000; Robock et al., 2008; Израэль и др., 2009; Kravitz et al., 2010; Kravitz and Robock, 2011; Laakso et al., 2015). Исходя из этого, интенсивность инъекции SO_2 на каждом текущем шаге в точке инъекции принималась переменной и пропорциональной продолжительности светового дня в этой точке. Продолжительность светового дня для точки, расположенной на широте φ рассчитывалась по формуле (Жаров, 2006):

$$T_d(\text{час}) = 2 \arccos(\operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg} \delta_{\text{сол}}) / 15^\circ \quad (1)$$

где T_d – продолжительность светового дня (час), $\delta_{\text{сол}}$ – склонение Солнца (град). В свою очередь склонение Солнца вычисляется по формуле:

$$\delta_{\text{сол}} = -I \cos(360^\circ n / 365) \quad (2)$$

где I – угол наклона земной оси к плоскости эклиптики (23.45°), n – число дней, прошедших от последнего зимнего солнцестояния ($n=10$ +номер текущего дня в году).

Следует иметь в виду еще один сезонно-зависимый механизм выведения из стратосферы как SO_2 , так и образующихся при его окислении сульфатных частиц. Речь идет об усиливающемся в холодный сезон нисходящем переносе в циклоническом циркумполярном вихре. Нисходящий перенос воздушных масс из нижней стратосферы в тропосферу ведет к уменьшению времени жизни сульфатного аэрозоля, т.е. к снижению климатического геоинженерного эффекта (NAS, 2015). По оценкам работы (Robock et al., 2008) в арктической стратосфере время жизни аэрозоля максимально летом (до 4 месяцев) и минимально зимой.

В модели принято, что инъекция SO_2 производится в стратосферный слой на высоте 17-18 км. Этот слой расположен примерно на 5-6 км выше летней арктической тропопаузы. Район инъекции имеет координаты 69° с.ш., 88° в.д. Сделано допущение, что SO_2 как предшественник аэрозоля мгновенно и равномерно распределялся в объеме модельной ячейки, в которую осуществляется инъекция. Диаметр образованных в результате окисления сферических сульфатных частиц был принят равным 0.5 мкм. В модели сульфатный цикл использовался в интерактивном режиме. Влияние аэрозолей на климатиче-

скую систему учитывалось в радиационном блоке. Процессы нуклеации, конденсации и коагуляции не учитывались, т.е. на любом этапе расчетов распределение частиц по размеру оставалось монодисперсным. В расчетах принималось, что сера в составе аэрозольных частиц представлена серной кислотой, связанной с двумя молекулами воды: $\text{H}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (концентрация кислоты 75%, молекулярная масса частицы - 134 г/моль). В соответствии с данными работы (Seinfeld and Pandis, 2016) при заданных условиях коэффициент массовой экстинкции аэрозольных частиц оценен величиной 3.2 м²/г.

Источники SO₂ и возможные способы его доставки в стратосферу

В России за северным полярным кругом действует горно-металлургический комбинат «ОАО Норильский Никель», перерабатывающий высокосернистую руду цветных металлов. В процессе обжига руды сера окисляется до SO₂. До настоящего времени утилизация SO₂ не проводится в силу экономической нерентабельности, и основная доля SO₂ выбрасывается в нижний слой атмосферы. Выброс серы в виде SO₂ в последние годы составлял около 0.95 МтS/год (1.9 МтSO₂/год) (Экологическая стратегия ГМК). Это приводит к исключительно высоким уровням загрязнения атмосферы Норильска и к выраженному воздействию на здоровье его населения (Государственный доклад, 2014). В последнее время специалистами ОАО «Норильский Никель» было рассмотрено три варианта решения экологической проблемы Норильска:

- Замена существующих дымовых труб на более высокие.
- Подземное захоронение SO₂.
- Дооснащение предприятия установками восстановления SO₂ до элементарной серы со складированием последней на открытом воздухе.

Кроме того, планируется создание буферных емкостей для хранения SO₂.

В любом случае технически может быть реализована доставка предшественника сульфатных аэрозолей в стратосферу либо в виде исходных дымовых газов с высокой концентрацией SO₂, либо в виде чистого SO₂, либо в виде элементарной серы со сжиганием последней непосредственно в стратосфере (Будыко, 1974).

Первый детальный обзор вариантов доставки вещества аэрозольных частиц или их предшественников в стратосферу был сделан в 1992 году (NAS, 1992). К настоящему времени количество предлагаемых методов существенно возросло (Robock et al., 2009; Lane et al., 2007; Smitherman, 2000; Appell, 2011; Bolonkin, 2007; Davidson et al., 2012; Ревокатова и Рябошапко, 2015).

Одним из наиболее близких к реализации на данный момент развития технологий может быть вариант использования современных крупнотоннажных самолетов. Этот метод доставки является эффективным и относительно дешевым. Современный парк воздушных судов располагает самолетами, которые потенциально могли бы использоваться в настоящее время или после модернизации для целей доставки аэрозоля или его предшественников в стратос-

феру (Ревокатова и Рябошапко, 2015). Заслуживает внимания также метод с использованием привязного аэростата с подачей исходного SO_2 с земли в стратосферу на высоту порядка 20 км по трубчатому шлангу (Davidson et al., 2012; Kuo and Hunt, 2015). Оба указанных метода относительно недороги и могут быть развернуты в короткие сроки.

Важными (хотя и спорадическими) источниками поступления соединений серы в стратосферу являются извержения вулканов взрывного типа. Наиболее изученными являются извержения вулканов Эль-Чичон (04.04.1982; координаты 17°с.ш. , 94°з.д.) и Пинатубо (15.06.1991; координаты 15°с.ш. , 120°в.д.). При извержении Эль-Чичон практически мгновенный выброс SO_2 на высоту до 30 км составил 10 Мт, а при извержении Пинатубо соответственно 34 км и 20 Мт SO_2 (Arfeuille et al., 2014). В модели в обоих случаях принимается равномерное распределение концентрации SO_2 по высоте от тропопаузы до верхней кромки газопепловой колонны.

Расчетные этапы

Полный цикл расчетов разбит на ряд отдельных этапов. Первый этап посвящен начальной оценке величины рассматриваемых климатических параметров. Количественное определение степени антропогенного потепления климата (глобального или регионального) требует принятия некоторой точки отсчета, удаленной во времени в прошлое. Обычно такую точку отсчета связывают с началом индустриального развития. В настоящей работе в качестве преиндустриальных значений рассчитываемых климатических параметров приняты средние величины за период с 1800 по 1850 годы. Значения средней глобальной температуры, температуры и площади ледового покрытия в Арктике оценены соответственно величинами $(13.4 \pm 0.04)^\circ\text{C}$, $(-10 \pm 0.16)^\circ\text{C}$, (8.5 ± 0.1) млн. кв. км.

Сценарий второго этапа основан на предположении, что средняя глобальная концентрация основных парниковых газов в атмосфере (диоксида серы, метана, закиси азота) будет продолжать расти в соответствии с прогнозным сценарием RCP8.5 (Representative Concentration Pathways), принятым экспертами МГЭИК как наиболее неблагоприятный с точки зрения изменения климата (Moss et al., 2008). В качестве входной информации в модели задаются меняющиеся концентрации парниковых газов.

Второй этап не предполагает применения мер инженерии климата, однако учитывает климатический эффект от извержений вулканов Эль-Чичон и Пинатубо. Расчеты по второму этапу начинались с 1950 года и продолжались до 2052 года включительно.

На третьем этапе (как и на втором) концентрация основных парниковых газов в атмосфере изменяется в соответствии с прогнозным сценарием RCP8.5. Начиная с 2018 года, в расчет включается аэрозольный блок геоинженерного воздействия. Интенсивность инъекции SO_2 принимается меняющейся в течение года пропорционально продолжительности светового дня при сохранении среднегодовой величины равной $1.9 \text{ МтSO}_2/\text{год}$. Расчет на

третьем этапе охватывает период с 2018 по 2052 год. Чтобы снизить влияние межгодовой изменчивости рассчитываемых климатических параметров, данные за первые 5 лет применения метода ССА (2018 – 2022) и за последние 5 лет (2048 – 2052) на третьем этапе усредняются.

Результаты расчетов

Выходными параметрами модельных расчетов являются среднегодовые температуры на уровне 2 м над подстилающей поверхностью всего Земного шара и отдельно для территории Арктики. Для оценки степени влияния применения ССА в Арктике на более низкие широты отдельно выделяются результаты только для Северного полушария. Наряду с температурой выходным параметром на всех трех этапах служит ПЛП в Арктике.

Этап 1. Результаты расчетов на этапе 1 за период с 1800 по 1850 годы показали, что величина среднегодовой приземной температуры на глобальном уровне в преиндустриальный период составляла $(13.4 \pm 0.04)^\circ\text{C}$. Это означает, что допустимый порог повышения глобальной температуры может составлять

$$T^\circ\text{C}_{\text{порог}} = (13.4 \pm 0.04)^\circ\text{C} + 2^\circ\text{C} = (15.4 \pm 0.04)^\circ\text{C}.$$

Здесь 2°C - допустимый прирост средней глобальной температуры (EU Climate Change Expert Group, 2008) от преиндустриального значения. В Арктике согласно расчетам среднегодовая температура в преиндустриальный период составляла $(-10 \pm 0.16)^\circ\text{C}$. Средняя за указанный преиндустриальный период среднегодовая величина ПЛП составляла $(8.5 \pm 0,1)$ млн. кв. км. Оценка качества воспроизведения моделью современного климата была проведена ранее в работах (Володин, Дианский, 2006; Володин и др., 2010).

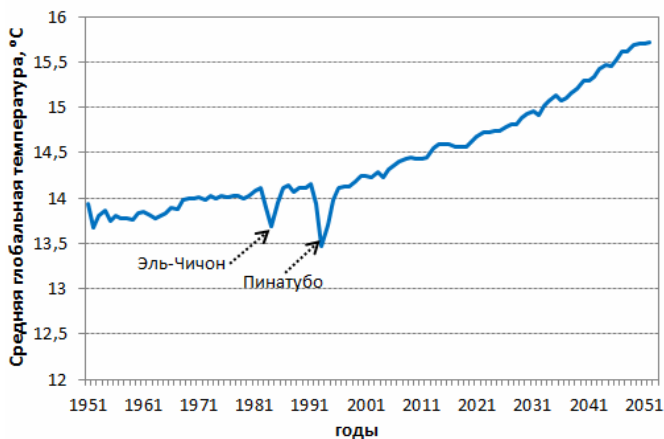


Рисунок 1. Рост средней приземной глобальной температуры при реализации сценария МГЭИК RCP8.5 в период с 1951 по 2052 гг.
Стрелками отмечены извержения вулканов Эль-Чичон (1982 г) и Пинатубо (1991 г).
Геоинженерное воздействие не применялось.

Этап 2. Результаты расчетов на этапе 2 (без применения геоинженерного метода при росте концентрации CO_2 по сценарию RCP8.5) представлены на

рисунках 1, 2, и 3 синими кривыми. Рис. 1 демонстрирует неуклонный рост средней глобальной температуры от значения 13.9°C в 1951 году до 15.7°C к 2051 году. Рис. 2 показывает рост температуры в Арктике на 4.1 градуса (до -5.9°C) по отношению к температуре преиндустриального периода. Одновременное снижение ПЛП с 8.5 до 6.4 млн. кв. км. при росте концентрации CO_2 по сценарию RCP8.5 изображено на рис.3.

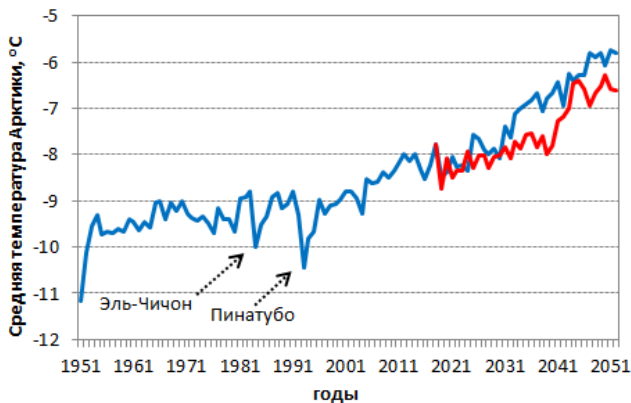


Рисунок 2. Рост средней приземной температуры в Арктике (синяя кривая) при реализации сценария МГЭИК RCP8.5 в период с 1951 по 2052 гг. без применения метода ССА. Красная кривая отражает эффект описанного выше геоинженерного воздействия в период с 2018 по 2052 гг. Стрелками отмечены извержения вулканов Эль-Чичон (1982 г) и Пинатубо (1991 г).

На фоне относительно постоянного роста температуры, как на глобальном уровне (рис. 1), так и в Арктике (рис. 2) выделяются два периода резкого кратковременного (2 -3 года) падения температуры, синхронных с извержениями вулканов Эль-Чичон и Пинатубо. Наиболее изученным природным аналогом геоинженерного воздействия стратосферных сульфатных аэрозолей на климат является извержение вулкана Пинатубо. Менее достоверны данные, полученные при извержении вулкана Эль-Чичон. В среднем температурный климатический отклик на извержение Пинатубо оценен по литературным данным величиной $0.5 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$ (NAS, 2015). Важно отметить, что максимум влияния извержения на глобальную температуру пришелся на 1992 год, и влияние носило кратковременный характер. Согласно данным, представленным на рис. 1, в 1992 году средняя приземная глобальная температура понизилась после извержения Пинатубо на $0.6 - 0.7^{\circ}\text{C}$. Отметим, что по данным (Driscoll et al., 2012) поствулканический эффект проявляется в Арктике наиболее ярко. На рис. 3, где показаны среднегодовые значения ПЛП, заметен кратковременный всплеск ледовитости Арктики, связанный с извержением Пинатубо (рис. 3).

В соответствии с данными, представленными на рис. 1, к середине текущего века средняя глобальная приземная температура при прогнозируемом сценарии роста концентрации CO_2 RCP8.5 может составить 15.7°C (средняя величина за период с 2048 по 2052 г.). Таким образом, будет превышен допустимый порог роста глобальной температуры $+2^{\circ}\text{C}$ над принятым преиндустриальным уровнем.

стриальным уровнем. Средняя температура в арктическом бассейне согласно расчетам возрастет до -5.9°C (рис. 2), что может привести к сокращению площади ледового покрова по отношению к преиндустриальному значению на 36% (рис. 3).

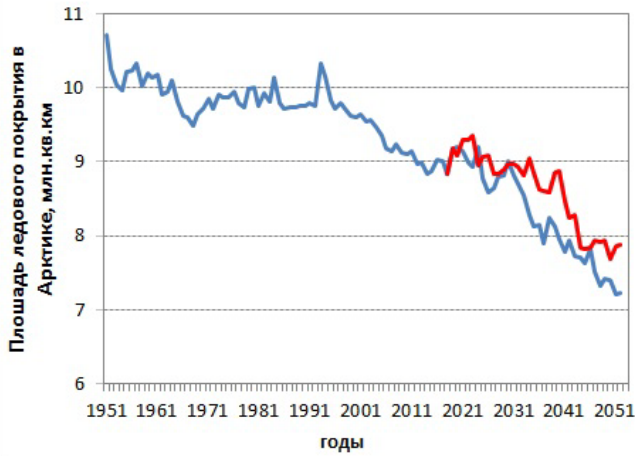


Рисунок 3. Изменение площади ледового покрытия в Арктике (синяя кривая) при реализации сценария МГЭИК RCP8.5 в период с 1951 по 2052 гг. без применения метода CCA. Красная кривая отражает эффект описанного выше геоинженерного воздействия в период с 2018 по 2052 гг.

Этап 3. На этапе 3 оцениваются эффекты геоинженерного влияния инъекции SO_2 в арктическую стратосферу на среднюю приземную температуру в регионе Арктики, в масштабах Северного полушария и на глобальном уровне, а также влияние применения геоинженерии климата на состояние ледового покрова Ледовитого океана (красные кривые на рисунках 2, 3). Для более надежного определения эффекта геоинженерного воздействия значения температуры и ПЛП усреднены за 2 пятилетних периода с 2018 по 2022 г. (начало применения) и с 2048 по 2052 г. (конец применения). Результаты расчетов для случая инъекции SO_2 на высоте 17-18 км представлены в таблице 1.

Таблица 1. Средняя температура в Арктике на уровне 2 м над подстилающей поверхностью и ПЛП в преиндустриальный период и на середину текущего века без применения и с применением геоинженерии.

Этап	Средняя температура, $^{\circ}\text{C}$		Изменение тем-ры, $^{\circ}\text{C}$	Ледовое покрытие, 10^6 кв. км		Сокращение, 10^6 кв. км
	1800-1850	2048-2052		1800-1850	2048-2052	
	годы	годы		годы	годы	
2	- 10	- 5.9	+4.1	8.5	6.4	2.1
3	- 10	- 6.5	+3.5	8.5	6.9	1.6

Выделенный арктический бассейн не является замкнутой системой, и геоинженерное воздействие стратосферных сульфатных аэрозолей прослеживается в более южных районах земного шара. На рис. 4 показано поле распределения разницы средних приземных температур между экспериментами с применением геоинженерии и без применения, в северном полушарии

за период 2048-2052 гг. Из результатов расчетов следует, что сколь-либо ощутимое влияние арктического геоинженерного воздействия достаточно надежно прослеживается лишь до зоны северных тропиков. Более того, в некоторых экваториальных регионах, а также на Аляске, при применении геоинженерных мер, может наблюдаться незначительный рост среднегодовой температуры, однако этот факт требует более детального изучения.

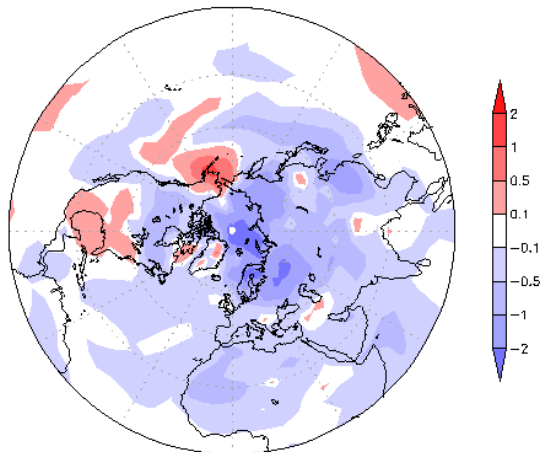


Рисунок 4. Разница средних приземных температур между экспериментами с применением геоинженерии и без применения, в северном полушарии за период 2048-2052 г.

В целом результаты наших исследований подтверждают выводы работы Робока и др. (Robock et al., 2008), которые моделировали снижение потока коротковолновой солнечной радиации при условии постоянной инъекции 3 MtS/год в арктическую стратосферу. Ими было показано, что к 30° северной широты поток солнечной энергии на подстилающую поверхность снижается на порядок величины по сравнению с потоком в районе арктической инъекции. Данные результаты позволяют утверждать, что инъекция сульфатных аэрозолей в арктическую стратосферу практически не может повлиять на характер муссонной циркуляции и на интенсивность осадков в тропической зоне (Kravitz and Robock, 2011).

Выводы

- 1) Рассмотрена возможность целенаправленного воздействия на климатическую систему Арктики путем введения в нижнюю стратосферу искусственно созданных сульфатных аэрозолей, способных отражать часть приходящего коротковолнового солнечного излучения. Предполагается, что данный подход даст возможность понизить температуру нижнего слоя тропосферы и, тем самым, замедлить процессы нежелательных климатических изменений.
- 2) Для получения количественных оценок изменения величины климатических характеристик использовалась модель глобальной земной климатической

системы, включающей динамику атмосферы, динамику океана и углеродный цикл (INMCM3). Модель, базовая версия которой была разработана в Институте вычислительной математики РАН, была дополнена блоком геоинженерного влияния на климат. Выходными параметрами модели служили значения температуры приповерхностного слоя атмосферы в пределах Арктики и на глобальном уровне, а также площадь ледового покрова Северного Ледовитого океана.

- 3) Рассмотрен вариант использования в качестве источника стратосферных сульфатных аэрозолей выбросов диоксида серы комбинатом «ОАО Норильский Никель», что позволило бы решить проблему недопустимо высокого загрязнения воздуха в г. Норильск.
- 4) Оценено значение средней глобальной прединдустриальной температуры приземного слоя воздуха в период с 1800 по 1850 год величиной $13.4 \pm 0.04^\circ\text{C}$. Аналогичное значение температуры в пределах Арктического бассейна согласно модельным расчетам составляло $(-10 \pm 0.16)^\circ\text{C}$. Ледовый покров в Северном Ледовитом океане распространялся на площадь 8.5 ± 0.1 млн. кв. км.
- 5) Представлен прогноз изменения глобальной и арктической средней температуры, а также изменения площади ледового покрова до середины текущего века. Прогноз основан на предположении, что концентрация CO_2 в атмосфере будет расти в соответствии со сценарием МГЭИК RCP8.5, по меньшей мере, до 2052 года. Согласно модельным оценкам средняя температура в арктическом бассейне может достичь (-5.9°C) , а площадь ледового покрова сократиться до 6.4 млн. кв. км. Предложенный геоинженерный метод стабилизации климата Арктики позволил бы если не решить проблему недопустимо высокого потепления климата Арктики, то выиграть время для заметного сокращения антропогенных выбросов CO_2 в атмосферу.
- 6) Важно, что влияние предложенного геоинженерного решения стабилизации климата Арктики будет практически ограничено территорией собственно Арктики. Возможное негативное влияние применения в Арктике метода стратосферных сульфатных аэрозолей на климатические характеристики муссонной зоны будет пренебрежимо малым.

Благодарности

Работа выполнена в ИГКЭ Росгидромета и РАН, в Институте географии РАН и в ИВМ РАН при поддержке РФФ (проект 14-27-00126). Авторы работы выражают благодарности С.А. Громову и С.С. Громову за неоценимую помощь в проведении вычислительных работ.

Список литературы

Будыко М.И. 1974. Метод воздействия на климат. - Метеорология и Гидрология, № 2, с. 91-97.

Володин Е.М., Дианский Н.А. 2006. Моделирование изменений климата в XX-XXII столетиях с помощью совместной модели общей циркуляции атмосферы и океана. - Известия РАН. Физика атмосферы и океана, т. 42, № 3, с. 1-16.

Володин Е.М., Дианский Н.А., Гусев А.В. 2010. Воспроизведение современного климата с помощью совместной модели общей циркуляции атмосферы и океана INMCM 4.0. - Известия РАН. Физика атмосферы и океана, т. 46, № 4, с. 448-466.

Володин Е.М., Кострыкин С.В. и Рябошапко А.Г. 2011. Моделирование изменения климата вследствие введения серосодержащих веществ в стратосферу. - Известия РАН. Физика атмосферы и океана, т. 47, № 4, с.467-476.

Государственный доклад. 2014. Государственный доклад о состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае в 2013 году. Министерство природных ресурсов и экологии Красноярского края. - Красноярск, 282 с.

Дроздов О.А. и др. 1989. Климатология. - Ленинград, Гидрометеиздат, 568 с.

Елисеев А.В., Мохов И.И. 2009. Модельные оценки эффективности ослабления и предотвращения глобального потепления климата в зависимости от сценариев контролируемых аэрозольных эмиссий. - Известия РАН. Физика атмосферы и океана, т. 45, № 2, с. 232-244.

Елисеев А.В., Мохов И.И., Карпенко А.А. 2009. Предотвращение глобального потепления с помощью контролируемых эмиссий аэрозолей в стратосферу: глобальные и региональные особенности отклика температуры по расчетам с КМ ИФА РАН. - Оптика атмосферы и океана, т. 22, № 6, с. 521-526.

Жаров В.Е. 2006. Сферическая астрономия. - Фрязино, 480 с.

Израэль Ю.А., Рябошапко А.Г. и Петров Н.Н. 2009. Сравнительный анализ геоинженерных способов стабилизации климата. - Метеорология и Гидрология, № 6, с. 5-24.

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

Рябошапко А.Г. 2011. Зависимость времени жизни субмикронного аэрозоля в атмосфере от высоты его внесения. - В сб.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем, т. XXIV. - ИГКЭ Росгидромета и РАН, Москва, с. 25-42.

Фролькис В.А., Кароль И.Л. 2010. Моделирование влияния параметров стратосферного аэрозольного экрана на эффективность компенсации парникового потепления глобального климата. - *Оптика атмосферы и океана*, т. 22, № 6, с. 710-722.

Чернокульский А.В., Елисеев А.В., Мохов И.И. 2010. Аналитические оценки эффективности предотвращения потепления климата контролируемые аэрозольными эмиссиями в стратосферу. - *Метеорология и гидрология*, № 5, с. 16-26.

Экологическая стратегия ГМК. – Электронный ресурс. URL:
http://rpn.gov.ru/sites/all/files/users/root/attachedfiles/8_dyachenko_v.t_ntu_oao_gmk_nn.ppt

Appell D. 2011. Stairway to the Heavens. - *Physics World*, vol. 24, No.12, pp. 30-34.

Arfeuille F., Weisenstein D., Mack H., Rozanov E., Peter T., and Brönnimann S. 2014. Volcanic forcing for climate modeling: a new microphysics-based data set covering years 1600–present. - *Clim. Past*, No.10, pp. 359–375.

ASOC. 2010. Asilomar Scientific Organizing Committee. The Asilomar Conference Recommendations on Principles for Research into Climate Engineering Techniques. - Climate Institute, Washington DC, 2006.

Ban-Weiss G.A. and Caldeira K. 2010. Geoengineering as an optimization problem. - *Environ. Res. Lett.*, 5 034009, doi:10.1088/1748-9326/5/3/034009

Bickel J.E., Lane L. 2010. An Analysis of Climate Engineering as a Response to Climate Change Copenhagen Consensus Center.
[info.ccc@cbs.dk www.copenhagenconsensus.com]

Bluth, G.J.S., Doiron, S.D., Krueger, A.J., Walter, L.S., and Schnetzler, C.C. 1992. Global tracking of the SO₂ clouds from the June 1991 Mount Pinatubo eruptions. - *Geophysical Research Letters*, vol. 19, No. 2, pp. 151-154.

Bolonkin, A.A. 2007. Optimal rigid space tower. - In *Proc. 45th Aerospace Science Meeting*. - Reno, Nevada, 8–11 January 2007, AIAA-2007-367.

Caldeira K. and Wood L. 2008. Global and Arctic climate engineering: numerical model studies. - *Phil. Trans. R. Soc., A*, vol. 366, pp. 4039-4056, doi:10.1098/rsta.2008.0132.

Cvijanovic I., Caldeira K., MacMartin D.G. 2015. Impacts of ocean albedo alteration on Arctic sea ice restoration and Northern Hemisphere climate. - *Environ. Res. Lett.*, vol.10, 044020, doi:10.1088/1748-9326/10/4/044020.

Davidson P., Burgoyne C., Hunt H., Causier M. 2012. Lifting options for stratospheric aerosol geoengineering: advantages of tethered balloon systems. - *Phil. Trans. R. Soc.*, vol. A.370, 4263–4300, doi:10.1098/rsta.2011.0639.

Driscoll S., Bozzo A., Gray L. J., Robock A., and Stenchikov G. 2012. Coupled Model Intercomparison Project 5 (CMIP5) simulations of climate following volcanic eruptions. - *J. Geophys. Res.*, vol.117, D17105, doi:10.1029/2012JD017607.

EU Climate Change Expert Group. 2008. The 2 Degree Celsius Target: Information Reference Document: Background on Impacts, Emission Pathways, Mitigation Options and Costs. – Available at: http://ec.europa.eu/clima/policies/international/docs/brochure_2c.pdf

Govindasamy B. and Caldeira K. 2000. Geoengineering Earth's radiation balance to mitigate CO₂-induced climate change. - *Geophys. Res. Lett.*, vol. 27, pp 2141–2144.

IPCC 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. - Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 p.

Keith D. 2000. Geoengineering the Climate: History and Prospect. - *Annu. Rev. Energy Environ.* vol. 25, pp. 245–284.

Kravitz, B., and A. Robock. 2011. Climate effects of high-latitude volcanic eruptions: Role of the time of year. - *J. Geophys. Res.*, vol. 116, D01105, doi:10.1029/2010JD014448.

Kravitz B., Robock A., Marquardt A. 2010. Climate Model Simulations of Stratospheric Geoengineering in the Arctic Spring. Submitted to *Journal of Geophysical Research – Atmospheres*. September, 2010, unpublished.

Kuo K.A. and Hunt H.E.M. 2015. Isothermal pumping analysis for high-altitude tethered balloons. - *R. Soc. open sci.* 2: 140468. – Available at: <http://dx.doi.org/10.1098/rsos.140468>.

Laakso A., Partanen A.-I., Kokkola H., Lehtinen K.E.J., Korhonen H. 2015. Optimizing stratospheric sulfur geoengineering by seasonally changing sulfur injections. *EGU General Assembly*. - Vienna, 4/13/2015.

Lane L., Caldeira K., Chatfield R., Longhoff S., 2007. Workshop Report on Managing Solar Radiation. /Edited by L. Lane, K. Caldeira, R. Chatfield, S. Langhoff. - Report NASA/CP-2007-214558, November 18-19, 2007, 40 p.

Modak A. and Bala G. 2013. Sensitivity of simulated climate to latitudinal distribution of solar insolation reduction in SRM geoengineering methods. - *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, vol.13, pp. 25387–25415, doi:10.5194/acpd-13-25387-2013.

MacCracken M.C., Shin H.-J., Caldeira K., and Ban-Weiss G.A. 2013. Climate response to imposed solar radiation reductions in high latitudes. - *Earth Syst. Dynam.*, vol. 4, pp. 301–315, doi:10.5194/esd-4-301-2013.

McCusker K.E., Battisti D.S., Bitz C.M. 2012. The Climate Response to Stratospheric Sulfate Injections and Implications for Addressing Climate Emergencies. - *Journal of Climate*, vol. 25, pp. 3096-3116. DOI: 10.1175/JCLI-D-11-00183.1

Ming T., de Richter R., Liu W., Caillol S. 2014. Fighting global warming by climate engineering: Is the Earth radiation management and the solar radiation

management any option for fighting climate change? - *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. vol. 31, pp. 792-834.

Moss R., Babiker M., Brinkman S., Calvo E., Carter T., Edmonds J., Elgizouli I., Emori S., Erda L., Hibbard K., Jones R., Kainuma M., Kelleher J., Lamarque J.F., Manning M., Matthews B., Meehl J., Meyer L, Mitchell J., Nakicenovic N., O'Neill B., Pichs R., Riahi K., Rose S., Runci P., Stouffer R., van Vuuren D., Weyant J., Wilbanks T., van Ypersele J.P., and Zurek M. 2008. Towards new scenarios for analysis of emissions. *Climate Change, Impacts, and Response Strategies*. - IPCC, Geneva, 132 pp.

NAS. 1992. US National Academy of Science, Committee on Science Engineering and Public Policy. *Geoengineering options*, appendix Q. : In *Policy implications of greenhouse warming: mitigation, adaptation, and the science base*, pp. 433–464. - Washington, DC: National Academies Press.

NAS. 2015. *Climate intervention: Reflecting sunlight to cool the Earth*. - The National Academic Press, Washington, D.C., 220 p., www.nap.edu.

Newton R., Pfirman S., Schlosser P., Tremblay B., Murray M., and Pomerance R. 2016. White Arctic vs. Blue Arctic: A case study of diverging stakeholder responses to environmental change. - *Earth's Future*, 4, doi:10.1002/2016EF000356.

Quine, B. M., Seth, R. K. & Zhu, Z. H. 2009. A free-standing space elevator structure: a practical alternative to the space tether. - *Acta Astronaut*, vol. 65, pp. 365–375.

RaschPh.J., Tilmes S., Turco R.P., Robock A., Oman L., Chen Chih-Chieh., Stenchikov G.L., Garcia R.R. 2008. An overview of geoengineering of climate using stratospheric sulphate aerosols. - *Phil. Trans. R. Soc. A*, vol. 366, pp 4007–4037, doi:10.1098/rsta.2008.0131.

Robock, A., Marquardt, A. B., Kravitz, B. and Stenchikov, G. 2009. The benefits, risks, and costs of stratospheric geoengineering. - *Geophys. Res. Lett.*, vol. 36, L19703. doi:10.1029/2009GL039209).

Robock A., Oman L., Stenchikov G.L. 2008. Regional climate responses to geoengineering with tropical and Arctic SO₂ injections. - *J. of Geophys. Res.*, vol. 113, D16101, doi:10.1029/2008JD010050.

Rudnick R.L. (ed), 2005. *The Crust*, vol.3. 703 p. ISBN: 0-08-044847-X.

Seinfeld J.H. and Pandis S.N. 2016. *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. ISBN: 978-1-118-59136-9, 1232 p.

Seitz R., 2011. Bright water: hydrosols, water conservation and climate change. - *Climatic Change*, vol. 105, issue 3, pp.365-381.

Smitherman Jr, D. V. 2000. *Space elevators: an advanced Earth-space infrastructure for the new millennium*. Report NASA/CP-2000-210429, NASA Marshall Space Flight Center, Huntsville, USA.

Song Guo, Bluth G.J.S., Rose W.I., Watson I.M., Prata A.J. 2004. Re-evaluation of SO₂ release of the 15 June 1991 Pinatubo eruption using ultraviolet and infrared

satellite sensors. - Geochemistry, Geophysics, Geosystems, vol. 5, No 4, doi:10.1029/2003GC000654.

Volodin E.M. Kostykin S.V. and Ryaboshapko A.G. 2011. Climate response to aerosol injection at different stratospheric locations. - Atmospheric Science Letters, doi: 10.1002/asl.351. vol. 12, issue 4, pp. 381–385.

Wallace J.M. and Hobbs P.V. 2006. Atmospheric Science: An Introduction Survey. - Elsevier Inc. ISBN 10: 0-12-732951-X. 483 p.

WMO 2015. Press-release 13/2015 of World Meteorological Organization.

Статья поступила в редакцию: 08.11.2016

После переработки: 02.03.2017