

УДК 551.510.42+551.521+551.583

ТЕХНИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ АЭРОЗОЛЬНОГО СЛОЯ В СТРАТОСФЕРЕ С ЦЕЛЬЮ СТАБИЛИЗАЦИИ КЛИМАТА

А.П. Ревокатова, А.Г. Рябошапка

Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН,
Россия, 107258, Москва, ул. Глебовская, д. 20Б, revokatova@gmail.com

Резюме. Рассмотрены источники образования аэрозоля в стратосфере и возможные способы доставки предшественников аэрозолей в высокие слои атмосферы. Оценены достоинства и недостатки использования SO_2 и H_2S в качестве предшественников сернокислотного аэрозоля в стратосфере. Проведен анализ стоимости стабилизации климата с использованием метода управления потоком приходящей солнечной радиации.

Ключевые слова. Стабилизация климата, управление солнечной радиацией, стратосферный аэрозоль, предшественники аэрозоля, стоимость стабилизации климата.

TECHNICAL CAPABILITIES FOR CREATING AN AEROSOL LAYER IN THE STRATOSPHERE FOR CLIMATE STABILIZATION PURPOSE

A.P. Revokatova, A.G. Ryaboshapko

Institute of Global Climate and Ecology of Roshydromet and RAS,
20B, Glebovskaya str., 107258 Moscow, Russia, revokatova@gmail.com

Summary. Sources of aerosol formation in the stratosphere and possible methods of delivery of the aerosol precursors to the upper atmosphere are considered. Advantages and disadvantages of SO_2 and H_2S usage as precursors of sulfuric acid aerosols in the stratosphere are assessed. Costs of climate stabilization through management of incoming solar radiation flux are assessed.

Keywords. Climate stabilization, solar radiation management, stratospheric aerosols, aerosol precursors, climate stabilization costs.

Введение

Ежегодные оценки глобальных выбросов CO_2 в атмосферу показывают, что их рост опережает самые пессимистические прогнозы МГЭИК, сделанные в первых годах 21 века. По данным Международной группы экспертов по изменению климата (IPCC, 2014) антропогенный выброс CO_2 достиг в 2011 году 9,5 (от 8,7 до 10,3) ГтС, что на 54% больше, чем в 1990 г. За период с 1750 по 2011 годы за счет

сжигания ископаемого топлива и производства цемента антропогенный выброс CO_2 составил от 335 до 395 (среднее 365) ГтС. К этому нужно добавить поступление CO_2 в атмосферу за счет вырубки лесов и изменения характера землепользования в объеме 180 (100 – 260) ГтС. Все это привело в результате к величине кумулятивной антропогенной эмиссии в 545 (460 – 630) ГтС. Возросшие антропогенные выбросы CO_2 привели к росту его концентрации в атмосфере на глобальном уровне. С начала индустриальной революции (условно 1750 год) концентрация CO_2 в атмосфере выросла с 277 ppm(v) на 44%, и в 2013 году достигла отметки 400 ppm. Если темпы роста концентрации CO_2 сохранятся, это приведет к катастрофическому повышению средней глобальной температуры. В этой ситуации методы целенаправленного изменения параметров климатической системы (инженерия климата) могут быть востребованы уже в ближайшие десятилетия. В работе (Рябошапка, Ревактова, 2015) показано, что даже совокупность всех разработанных к настоящему моменту эффективных методов удаления CO_2 из атмосферы не способна удержать глобальную температуру в рамках допустимых значений, при реализации сценариев RCP6.0 и RCP8.5 (а также при любом промежуточном сценарии). Поэтому человечество должно быть готовым применить методы воздействия на климатическую систему Земли (методы SRM – Solar Radiation Management).

В работах (Израэль и др., 2009; Lenton, Vaughan, 2009; The Royal Society, 2009) было выполнено сравнение различных методов и технологических схем реализации инженерного воздействия на климатическую систему для предотвращения недопустимого повышения глобальной температуры. Сравнение показало, что с точки зрения эффективности, реализуемости в ближайшие десятилетия и минимизации затрат наиболее перспективным методом является создание в стратосфере отражающего аэрозольного слоя. Потенциальная возможность геоинженерной стабилизации глобальной температуры на приемлемом уровне методом инъекции стратосферного аэрозоля была продемонстрирована в работе (Израэль и др., 2013).

Выбор оптимальной методологии создания аэрозольного слоя с заданными оптическими свойствами в стратосфере предполагает учет нескольких факторов: метод получения аэрозоля, способ его доставки в стратосферу, выбор оптимального района Земли, времени года и режима введения для создания аэрозольного слоя, стоимость использования технологии. Поскольку практические знания в области инженерии климата основаны только на изучении проявлений вулканизма (Асатуров, 1986; Pyle et al., 1996), определение параметров методологии может быть основано лишь на теоретических предположениях.

Возможные источники образования аэрозоля в стратосфере

Расчеты параметров взаимодействия солнечной радиации с аэрозолями показали (Израэль и др., 2007; Rasch et al., 2008; Teller et al., 1997), что для максимального отражения оптимальными могут быть аэрозольные частицы с диаметром в диапазоне 0,2 – 0,5 мкм. Создание аэрозольных частиц субмикронного размера возможно двумя путями – дроблением материала или получением частиц из газообразных предшественников. Первый путь не эффективен, поскольку при измельчении энергетические затраты растут обратно пропорционально квадрату линейного размера. Кроме того, при измельчении образуются частицы с широким спектром размеров от долей микрона до десятков микрон. Кроме того, недостатком тонкодисперсных сыпучих порошков является их высокая аутогезия (слипаемость), что затрудняет их рассеивание в стратосфере.

Второй путь связан с химической трансформацией газов-предшественников с образованием жидких или твердых продуктов. В этом случае, в результате нуклеации, конденсации и коагуляции образуются частицы с узким диапазоном размеров в субмикронной области. Технология введения должна предусматривать максимально возможное разбавление газа-предшественника в процессе введения, поскольку коагуляция протекает тем медленнее, чем больше расстояние между отдельными прото-частицами. Это ведет к образованию и длительному существованию в стратосфере частиц малых размеров, наиболее эффективных для отражения солнечной радиации в видимой области спектра.

В природных условиях постоянно реализуется второй путь образования аэрозольных частиц в стратосфере. Газообразными предшественниками в этом случае служат соединения серы, которые поступают в стратосферу либо за счет диффузии из тропосферы (диоксид серы SO_2 , сероуглерод CS_2 , карбонилсульфид COS), либо при вулканических извержениях (диоксид серы SO_2 , сероводород H_2S). В цепочке реакций окисления данные газы образуют серную кислоту, которая частично нейтрализуется с образованием ее солей – сульфатов. При целенаправленном создании сульфатных аэрозольных частиц наиболее реально использование двух серосодержащих газов – SO_2 и H_2S .

Способы доставки исходного вещества в стратосферу

За последние два десятка лет предложено несколько способов доставки необходимого вещества в стратосферу. Некоторые варианты представляются вполне реалистичными на уровне современного технического развития, другие выглядят весьма экзотичными.

Первый детальный обзор вариантов доставки вещества аэрозольных частиц в стратосферу был сделан экспертами США в 1992

году (COSEPUP, 1992). Ими было рассмотрено четыре потенциально возможных способа: вертикальная стрельба из корабельных орудий большого калибра, использование ракет, запуск воздушных шаров с грузом и выброс части топлива самолетами коммерческой авиации в виде субмикронных капель. Три первых из рассмотренных вариантов оказались высоко затратными. Более дешевым представился четвертый способ, но он не эффективен, поскольку практически все коммерческие полеты осуществляются ниже тропопаузы, где время жизни аэрозольных частиц весьма мало. Кроме того, следует учитывать постоянный рост цен на авиационное топливо. Высказывалась также идея добавлять соединения серы в топливо. Она нереалистична по двум причинам. Первая, указанная выше – недостаточная высота коммерческих полетов. Вторая – невозможность существенного увеличения сернистости без потери необходимых свойств авиационного топлива.

В работе (Robock et al., 2009) дополнительно рассмотрены еще несколько вариантов. Возможен запуск шаров, наполненных смесью H_2S или SO_2 с водородом. Оценки показали (Robock et al., 2009), что такой метод потребовал бы около 10 миллионов запусков в год и в расчете на 1 Мт поднимаемой в стратосферу серы. В условиях Арктики, где высота тропопаузы составляет около 8 км, возможно поднятие привязного аэростата, соединенного с землей рукавом (шлангом) из тканого полимера (Lane et al., 2007). Закачка газов на высоту установки аэростата производится с земли насосами. Экзотичным, но технически реализуемым представляется проект строительства башни высотой около 20 км. Считается, что современные сооружения ограничены по высоте лишь архитектурными решениями и отсутствием необходимости строить выше. На самом деле, современные наука и техника теоретически позволяют построить башню из углеродно-эпоксидных композитов высотой более 100 км (Robock et al., 2009). В таком варианте доставка газов также может производиться с земли насосами.

Представляется, что наиболее близким к реализации может быть вариант использования современных крупнотоннажных самолетов. Основные лимитирующие факторы при использовании самолета в целях инженерии климата – это максимальная высота, на которую он может подняться, и его грузоподъемность. В табл. 1 приведены характеристики самолетов, которые потенциально могли бы использоваться в настоящее время или после модернизации для целей доставки аэрозоля или его предшественников в стратосферу.

Из табл. 1 следует, что уже в настоящее время уровень развития авиационных технологий может обеспечить потребности инженерии климата. Наиболее близкими прототипами являются самолеты-заправщики. Так, заправщик KC-135 имеет полезную нагрузку около 100 тонн и крейсерский потолок 15,2 км. Такие самолеты могут применяться в высоких и средних широтах, где высота тропопаузы не

превышает 15 км. Стоимость бомбардировщиков существенно выше, что обусловлено стоимостью оборудования военного назначения, но они имеют более высокий потолок. Наконец, самолеты коммерческого назначения имеет максимальную полезную нагрузку, но относительно небольшой потолок. В последних трех строчках таблицы 1 представлены самолеты, ныне не выпускаемые. Требованиям инженерии климата мог бы полностью соответствовать советский самолет Т-4МС. Он прошел летные испытания, но серийно не выпускался.

Таблица 1 – Характеристики самолетов, потенциально пригодных для использования в целях инженерии климата

Марка, страна	Тип	Полезная нагрузка, т	Рабочий потолок, км	Примерная стоимость, 10 ⁶ USD
ИЛ-78М, Россия	Танкер	80	12	30
КС-135, США	Танкер	91	15,2	40
КС-10, США	Танкер	160	13	90
В-1В, США	Бомбардировщик	36	18	290
ТУ-160, Россия	Бомбардировщик	40	15	250
A380-800F, Airbus S. A. S.	Пассажирский	150	13	30
АН-225, Украина	Транспортный	247	11	20
Ту-144, СССР	Пассажирский	25	20	–
Concorde, Фр./Англ.	Пассажирский	13	19,2	–
Т-4МС, СССР	Бомбардировщик	45	23	–

По всей видимости, наиболее разумным вариантом была бы модернизация уже имеющихся самолетов-заправщиков с целью повышения их рабочей высоты за счет снижения скорости и дальности полета. Опыт такой модернизации ИЛ-76 показал, что за счет увеличения площади крыла можно значительно поднять практический потолок самолета. Кроме того, увеличение грузоподъемности и снижения стоимости (вплоть до порядка величины) возможно за счет удаления чисто военного оборудования. Самолетный вариант доставки вещества в стратосферу обладает существенными преимуществами перед ранее описанными. Решающим достоинством является очень низкая удельная стоимость в расчете на массу вещества.

H₂S или SO₂?

Если представить, что найдена (или создана) оптимальная модель самолета, то далее встает вопрос о виде выбрасываемого вещества и о способе его выведения непосредственно из фюзеляжа самолета. В литературе (Будыко, 1974; COSEPUP, 1992; Crutzen, 2006) чаще всего в качестве предшественника аэрозольных частиц рассматривается SO₂, однако, обоснованный выбор должен опираться на сравнение важнейших свойств H₂S и SO₂ (табл. 2).

Таблица 2 – Свойства H₂S и SO₂

Свойство	H ₂ S	SO ₂
Молекулярная масса, г/моль	34	64
Температура кипения (при 1 атм), °C	-60,2	-10,1
Температура замерзания, °C	-86	-76
Плотность газовой фазы (при 1 атм, 0°C), кг/м ³	1,54	2,93
Плотность жидкой фазы (при 1 атм, температур кипения), кг/м ³	915	1458
Скрытая теплота испарения (при 1 атм), кДж/кг	548	390
Токсичность (ПДК для рабочей зоны), мг/м ³	10	10
Класс опасности	II	III

Из таблицы следует, что молекулярная масса H₂S практически в 2 раза меньше, чем SO₂. Это означает, что для доставки в стратосферу 1 тонны серы (как действующего начала образования сульфатных частиц) требуется поднять 1,063 тонны H₂S или 2 тонны SO₂. Таким образом, с точки зрения доставляемой в стратосферу массы H₂S имеет неоспоримое преимущество.

Температура кипения H₂S ниже, чем типичная для стратосферы температура (около -50°C). Напротив, температура кипения SO₂ существенно выше. Это означает, что H₂S может вводиться в стратосферу в виде мелких капель, которые при -50°C будут быстро испаряться. Этот вариант не приемлем для SO₂ – процесс испарения капель займет длительное время, за которое капли под действием гравитации пролетят вниз существенное расстояние.

Если период пребывания самолета в стратосфере составит лишь несколько часов, жидкий газ в емкости не успеет охладиться до температуры стратосферы. При самопроизвольном испарении сероводород будет выходить из сопла в газообразном виде, тогда как диоксид серы на уровне сопла может сжижаться и выбрасываться в виде капель.

При транспортировке газов в стратосферу в жидком виде важным технологическим параметром является давление паров над жидкостью. Естественно, что емкости для транспортировки должны быть герметичными. Поскольку температуры кипения рассматриваемых газов довольно низки, в условиях обычных летних температур у поверхности земли жидкая фаза может существовать только при определенном давлении, при этом величина давления является функцией температуры. Для расчета прочностных свойств емкостей давление является важнейшим параметром, определяющим их массу. Зависимость давления над жидкой фазой от температуры индивидуальна для каждого вещества. Обычно для расчетов используется уравнение Антуана, имеющее вид:

$$\log_{10}(P) = A - (B / (T + C)),$$

где P – давление газа над жидкостью (бар);

$T(K)$ – температура системы «газ-жидкость»;

A , B и C – эмпирические константы.

Для H_2S и SO_2 эмпирические константы даны в табл. 3 (Stull, 1947).

Таблица 3 – Значения констант в уравнении Антуана для H_2S и SO_2

Газ	Температурный диапазон, К	A	B	C
H_2S	138,8 – 212,7	4,43681	829,439	-25,412
	212,7 – 349,4	4,52887	958,587	-0,5390
SO_2	177,6 – 263,0	3,48586	668,225	-72,252
	263,0 – 414,8	4,37798	966,575	-42,071

Результаты расчетов зависимостей давления от температуры для обоих газов, представленные на рисунке 1, выполнены для диапазона температур от 190К (минимально возможная в стратосфере) до 320К (максимально возможная в тропосфере). Расчеты показали, что при условиях стратосферы SO_2 будет находиться в жидком виде, тогда как H_2S – в газообразном. В период заправки емкостей на земле температура может быть очень высокой – до 40°C. В этом случае давление в емкостях может достигнуть 8 атм. в случае SO_2 и 34 атм. в случае H_2S . Это означает, что конструкция емкостей должна быть достаточно прочной, при этом для H_2S масса емкости будет существенно выше, чем в случае SO_2 .

Из табл. 2 следует, что значения скрытой теплоты испарения относительно велики для обоих газов. Это означает, что при испа-

рени температура оставшейся жидкости будет снижаться. Этому же способствует значительный градиент между начальной температурой емкости и температурой стратосферы. Расчеты показали, что при начальной температуре $+20^{\circ}\text{C}$ и внешнем давлении $0,1$ атм. из емкости может испариться лишь 75% SO_2 , а температура остатка достигнет точки замерзания (-76°C), после чего испарение практически прекратится. В случае H_2S испарение практически прекратится, когда в емкости останется, примерно, 15% начального количества.

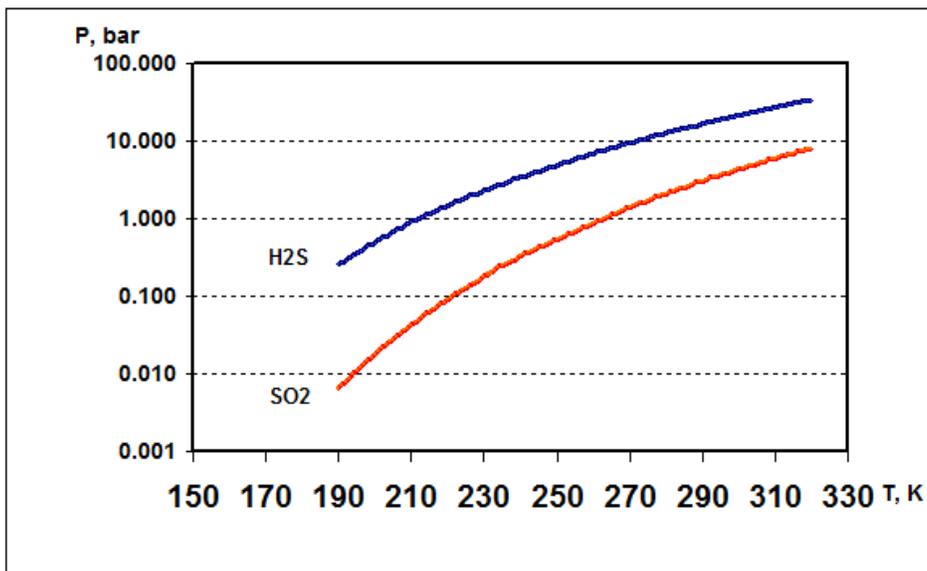


Рисунок 1 – Зависимость давления газа над жидкостью от температуры для H_2S и SO_2 .

Сказанное означает, что простое испарение сжиженного газа из емкости большого объема даже в случае H_2S потребует длительного времени. Поэтому, если выброс из самолета осуществлять в виде газа, потребуется затратить дополнительную энергию на испарение жидкости. Для этого может быть использован автономный нагреватель. Мощность такого нагревателя рассчитана для гипотетического случая, когда масса сжиженного газа составляет 50 тонн, а время испарения и выброса газа – 4 часа. В этом случае мощность должна составить 6300 кВт для H_2S и 4500 кВт для SO_2 .

Оба рассматриваемых газа являются токсичными веществами. Значения предельно допустимой концентрации (ПДК) для обоих газов в воздухе рабочей зоны одинаковы, однако H_2S считается более опасным и относится к веществам II класса опасности. Следует заметить, что оба вещества широко используются в химической промышленности. Объемы их транспортировки в сжатом или

сжиженном виде составляют во всем мире десятки миллионов тонн в год. В промышленности накоплен огромный опыт безопасного обращения с этими токсичными веществами. Например, только Астраханский газоперерабатывающий завод ежегодно выделяет из природного газа и перерабатывает около 4 Мт H_2S . По действующим санитарным нормам для аварийных ситуаций на опасных производствах радиус зоны отчуждения должен составлять 10 км для обеспечения не превышения 1 ПДК на границе зоны (Карабалин, 2008).

Рассмотрение пригодности обоих газов для инженерии климата показывает, что оба газа обладают определенными достоинствами. Тем не менее, H_2S имеет несомненное преимущество, как с экономической, так и с технологической точек зрения.

Стоимость стабилизации климата с помощью создания аэрозольного слоя в стратосфере

Одним из важнейших параметров, определяющих возможность применения инженерии климата, является стоимость применения описываемой технологии. Поскольку ее использование рассчитано на многие годы, важно оценить отдельно капитальные и текущие затраты. Здесь рассмотрен вариант введения в стратосферу 2 Мт H_2S в год с помощью гипотетического самолета с разовой загрузкой 50 т. Для обеспечения работ потребуются строительство аэродрома в малонаселенной местности, создание аэродромной инфраструктуры, строительство подъездных путей и т.д.

Парк самолетов при 2 вылетах в день в течение 250 дней в году должен составить 80 машин. Стоимость одного специально сконструированного самолета примем равной 40 Мд¹ (см. табл. 1). Таким образом, капитальные затраты на парк самолетов составят 3200 Мд. Период эксплуатации самолета примем равным 10 годам. Отсюда текущие расходы на возобновление парка в длительной перспективе составят 320 Мд/год.

Аэродром должен быть построен исключительно для нужд инженерии климата в малонаселенном районе. Идеальным решением могло бы стать использование для строительства изолированного острова в Тихом океане. В России в настоящее время имеются проекты реконструкции старых и строительство новых аэропортов (Иваново, Омск, Саратов, Геленджик). По аналогии стоимость аэродрома можно оценить в 330 Мд. Это, безусловно, оценка по максимуму, поскольку в нашем случае аэродром носит чисто техническое назначение. Аэродром должен включать в себя специфическую инфраструктуру хранения, транспортировки и заправки сжиженного газа. Приравняем стоимость такой системы к стоимости одного самолета – 40 Мд.

1. Здесь и далее 1 Мд = 1 млн. долларов США.

Поскольку аэродром располагается в изолированном районе, к нему должна быть подведена автомобильная и железная дороги для транспортировки сжиженного газа и других грузов. Примем длину таких подъездных путей равной 100 км. Стоимость строительства 1 км автомобильной дороги шириной 6 м составляет 0,3 Мд, а одного километра однопутной железной дороги – 1,5 Мд. Таким образом, затраты на строительство подъездных путей составят 180 Мд. В непосредственной близости от аэродрома должен быть построен поселок для 1 тысячи человек персонала, работающего вахтовым методом. Общее количество персонала, вовлеченного в деятельность системы, примем равным 2000 человек. В соответствии с ценами на строительство в городах России стоимость строительства поселка составит 60 Мд.

Текущие затраты складываются из оплаты работы персонала (включая летный состав), обслуживание самолетов, стоимости сжиженного газа и его транспортировки, обслуживание автомобильной и железной дорог. Среднюю заработную плату всего персонала примем равной заработной плате пилота гражданской авиации в США (135 тыс. долларов в год <http://www.rhr.ru/index/jobmarket/foreign/12178,0.html>). Отсюда общие текущие затраты на оплату персонала составят 270 Мд/год. По оценкам, представленным в работе (Robock et al., 2009), стоимость обслуживания одного крупнотоннажного самолета в США составляет около 4 Мд/год при годовом налете 300 часов. Если принять, что стоимость обслуживания пропорциональна годовому налету, текущие расходы на одну машину составят 28 Мд/год, а на весь парк машин – 2240 Мд/год. Это явно завышенная оценка, поскольку она включает уже учтенную выше заработную плату персонала.

Сероводород во многих производствах является либо вредной примесью, либо побочным продуктом. Например, природный газ Астраханского месторождения содержит 26% H_2S . В цепочке технологических процессов из H_2S сначала получают SO_2 и далее серную кислоту. В работе (Robock et al., 2009) приводится стоимость SO_2 , равная 230 долларов за тонну в ценах 2008 г. Стоимость H_2S должна быть как минимум в 2 раза ниже, исходя из чего, принимаем значение цены H_2S равное 100 долларов за тонну. Отсюда затраты на закупку 2 Мт H_2S в год составят 200 Мд/год.

Стоимость доставки H_2S от поставщика к аэродрому зависит от вида транспорта и расстояния перевозки. По данным ОАО «РЖД» (<http://www.rtarif.ru>) удельная цена перевозки сжиженного H_2S цистернами на большие расстояния составляет около 1 руб/тонна·км. Если предположить, что дальность перевозки 2 Мт H_2S /год составит 3000 км, годовые затраты на транспортировку не превысят 200 Мд/год.

Итог сделанным оценкам представлен в табл. 4. Из нее следует, что капитальные затраты составят 3,8 млрд. долларов, а текущие 3,2 млрд. долларов. Необходимо учесть, что модификация существующих или конструирование и изготовление новых самолетов займет несколько лет. Строительство аэродрома и подъездных путей также достаточно длительный процесс. Таким образом, капитальные затраты распределяются на срок 5-10 лет.

Таблица 4 – Затраты на подготовку и реализацию инженерии климата с использованием технологии стратосферных аэрозолей

Капитальные затраты	10⁶ USD	Текущие затраты	10⁶ USD/год
Парк самолетов	3200	Замена самолетов	320
Аэродром	330	Оплата персонала	270
Система заправки газом	40	Обслуживание самолетов	2240
Подъездные пути	180	Закупка H ₂ S	200
Жилой поселок	60	Транспортировка H ₂ S	200
Итого:	3810	Итого:	3230

На первый взгляд, представленные значения необходимых затрат на стабилизацию климата могут показаться нереально большими. Однако, описанная выше технология решает глобальную задачу, и затраты следует соотносить со статьями расходов всего человечества. Так по данным Стокгольмского института изучения мира (http://www.mr7.ru/today/facts/2007/10/04/news_15.html) совокупный текущий военный бюджет всех стран составляет 1200 млрд. долларов в год. Следовательно, текущие затраты на стабилизацию климата могут составлять лишь доли процента военных расходов.

Затраты на снижение выбросов парниковых газов и на адаптацию к росту глобальной температуры могут лечь тяжелым бременем на мировую экономику. Оценено, что полное выполнение условий Киотского протокола в период 2008-2012 гг. обошлось бы в среднем в 180 млрд. долларов в год. Очень высокими будут затраты на адаптацию к новым климатическим условиям. По оценкам Всемирного банка для инвестиций в адаптацию мирового хозяйства к изменениям климата на современном этапе требуется 70-100 млрд. долларов в год (World Bank, 2010). Только для России адаптация экономики к климатическим изменениям может обойтись как минимум в 7 млрд. долларов в год (Порфирьев, 2008). По сравнению с этими величинами расходы на инженерию климата представляются ничтожными. Конечно, инженерия климата не является

панацеей и не может самостоятельно решить проблемы антропогенного влияния на климатическую систему Земли. Однако, она способна в существенной степени смягчить переход мировой экономики на такой путь, который не приводил бы к климатическому кризису.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Асатуров М.Л. 1986. Влияние вулканических выбросов на стратосферный аэрозольный слой. Труды ГГИ, вып. 320, с. 38-49.

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

Израэль Ю.А., Борзенкова И.И., Северов Д.А. 2007. Роль стратосферных аэрозолей в сохранении современного климата. Метеорология и Гидрология, № 1, с. 5-14.

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

Израэль Ю.А., Володин Е.М., Кострыкин С.В., Ревокатова А.П., Рябошапка А.Г. 2013. Возможность геоинженерной стабилизации глобальной температуры в XXI в. с использованием стратосферных аэрозолей и оценка возможных негативных последствий. Метеорология и гидрология, № 6. с. 9-23.

Карабалин У.С. 2008. Методы ликвидации и предупреждения аварийных ситуаций при освоении месторождений углеводородного сырья. Алматы, 185 с.

Порфирьев Б.Н., 2008. Экономика климатических изменений. – М.: Анкил, 63 с.

Рябошапка А.Г., Ревокатова А.П. 2015. Потенциальная роль негативной эмиссии диоксида углерода в решении климатической проблемы. Метеорология и гидрология, № 7. с. 18-36.

COSEPUP. 1992. Policy Implications of Greenhouse Warming: Mitigation, Adaptation, and the Science Base. Panel on Policy Implications of Greenhouse Warming. National Academies Press, Washington, DC, 994 p.

Crutzen P.J. 2006. Albedo enhancement by stratospheric sulfur injection: a contribution to resolve a policy dilemma? Climate Change, V. 77, pp. 211-219.

IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

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, 2006, 40 p.

Lenton T.M., Vaughan N.E. 2009. The radiative forcing potential of different climate geoengineering options. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, V. 9, pp. 2559-2608.

Pyle D.M., Beattie P.D., Bluth G.J.S. 1996. Sulphur emission to the stratosphere from explosive volcanic eruptions. *Bull. Volcanol.* V. 57, pp. 663-671. doi:10.1007/s004450050119.

Rasch P.J., Crutzen P.J., Coleman D.B. 2008. Exploring the geoengineering of climate using stratospheric sulphate aerosols: The role of particle size. *Geophys. Res. Lett.*, V. 35, L02809, doi:10.1029/2007GL032179.

Robock, A., Marquardt A., Kravitz B., Stenchikov G. 2009. Benefits, risks, and costs of stratospheric geoengineering. *Geophys. Res. Lett.*, V. 36. No 19.

Stull D.R. 1947. Vapor Pressure of Pure Substances Organic Compounds. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, V. 39, pp. 517-540.

Teller E., Wood L., Hyde R. 1997. Global Warming and Ice Ages: Prospects for Physics-Based Modification of Global Change. UCRL-JC-128715, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, California, USA, 20 p.

The Royal Society. 2009. *Geoengineering the climate: Science, governance and uncertainty*. ISBN: 978-0-85403-773-5, 83 p.

World Bank. 2010. *Economics of Adaptation to Climate Change: Synthesis Report*, Washington DC: WB, 2010; *World Development Report 2010*, Washington DC: World Bank, p. 9.