

РАНЖИРОВАНИЕ НЕГАТИВНЫХ ПОБОЧНЫХ ЭФФЕКТОВ ПРИМЕНЕНИЯ ГЕОИНЖЕНЕРИИ КЛИМАТА ПО СТЕПЕНИ ОПАСНОСТИ

А.П. Ревокатова, А.Г. Рябошапка*

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

Реферат. Проведен критический анализ степени опасности возможных побочных эффектов применения геоинженерии климата с использованием сульфатных стратосферных аэрозолей. Показано, что многие из отмеченных в научной литературе возможных эффектов не имеют научного обоснования. В частности, часто используемый противниками геоинженерии климата довод о связи повышения содержания в стратосфере сульфатных аэрозолей и закисления вод Мирового океана является абсолютно спекулятивным. В то же время такие эффекты как появление заметных климатических аномалий в ряде регионов Земли или усиление разрушения стратосферного озона имеют определенную физическую связь с наличием в стратосфере аэрозолей. Такие последствия требуют дальнейшего детального изучения. В данной работе 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.

Ключевые слова. Геоинженерия климата, стратосферный аэрозоль, негативные эффекты, степень опасности.

RANKING OF NEGATIVE SIDE EFFECTS OF CLIMATE GEOENGINEERING APPLICATION WITH RESPECT TO DANGER DEGREE

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

Abstract. Critical analysis of danger degree for potential side effects of climate engineering application using stratospheric sulfate aerosols is carried out. It is shown that many of side effects mentioned in

scientific literature have no scientific justification. In particular, an argument about relationship between enrichment of the stratosphere with aerosols and acidification of the World Ocean (used very often by opponents of climate engineering) is absolutely speculative. At the same time, such effects as the appearance of noticeable climatic anomalies in some regions of the Earth, or increase in stratospheric ozone destruction really have physical relation to enrichment of the stratosphere with aerosols. These effects require further careful investigation. In this paper, ranking of possible side effects of climate engineering application was carried out taking into account size of an influenced area, number of people potentially affected, degree of danger for humans and natural ecosystems, and level of confidence in the occurrence of an effect.

Key words. Climate geoengineering, stratospheric aerosol, negative effects, danger degree.

Введение

Последние всемирные климатические конференции в Копенгагене (2009), Канкуне (2010), Дохе (2012) зафиксировали фактический провал Киотского протокола (Kyoto Protocol, 1998), основной целью которого было сокращение выбросов в атмосферу парниковых газов (ПГ) и стабилизация их концентраций в атмосфере на уровне, не представляющем экологической угрозы. Несмотря на усилия некоторых стран, выбросы ПГ продолжают расти, что предполагает дальнейший рост глобальной температуры. Это обстоятельство определяет рост внимания к возможности использования более эффективных, оперативных и дешевых мер стабилизации климата, чем меры Киотского протокола. Реализацию таких мер предполагает геоинженерия климата (ГИК) – целенаправленное изменение параметров климатической системы Земли (Будыко, 1974; NAS, 1992; Teller et al., 1997; Израэль, 2005; Crutzen, 2006). П.Крутцен (Crutzen, 2006) недвусмысленно заявил, что «геоинженерия климата является единственным доступным путем быстрого понижения температуры, если провалятся международные усилия обуздать эмиссию парниковых газов».

К настоящему времени предложены десятки вариантов геоинженерной стабилизации климата. Их сравнение по различным параметрам (энергетическая эффективность, стоимость, экологическая безопасность и т.д.) показало, что несомненными преимуществами обладает метод, основанный на внесении в

стратосферу субмикронного сульфатного аэрозоля, способного отразить часть приходящего солнечного излучения (Израэль и др., 2009; Lenton, Vaughan, 2009; The Royal Society, 2009).

Наряду с несомненными достоинствами данного ГИК метода ему присущи определенные недостатки. Физические основы парникового эффекта и ГИК с использованием отражения части солнечного света принципиально различны (Израэль, Рябошапко, 2011). Это делает невозможным с помощью данного метода компенсировать воздействие ПГ одновременно на все климатические параметры, что создает предпосылки возникновения различных негативных эффектов.

А.Робок (Robock, 2008) обобщил информацию о возможных негативных эффектах в своей статье «20 причин, по которым геоинженерия может быть плохой идеей». Часть побочных эффектов упоминалась и в более поздних работах (Robock et al., 2013). Следует заметить, что все рассуждения о возникновении негативных эффектов носят либо умозрительный характер, либо основаны на результатах моделирования с использованием глобальных климатических моделей. Целью настоящей работы является попытка критического анализа степени реальной опасности побочных эффектов ГИК, выделенных А.Робоком.

Влияние на региональный климат

Одновременное наличие в атмосфере ПГ и отражающего солнечное излучение аэрозольного слоя не может не вызвать изменений климатических характеристик по сравнению с тем случаем, когда отсутствует и то, и другое. Можно подобрать такой уровень воздействия аэрозолей, который будет практически компенсировать глобальный температурный эффект, но на региональном уровне пространственное распределение температур будет неизбежно меняться. Этот эффект отмечается при мощных выбросах вулканического аэрозоля в стратосферу (Robock, 2000).

Анализ климатических последствий извержения вулкана Пинатубо показал, что при падении глобальной температуры в течение 3-х лет после извержения на вполне ощутимую величину (десятичные доли градуса), эффект был весьма мозаичным по площади земного шара и неодинаковым по сезонам (Robock, 2002). Так в северном полушарии лето 1992г. было заметно холоднее обычного, а

зима 1991/92 годов несколько теплее. Весьма вероятно, что извержение вулкана Лаки в 1783г. сопровождалось ослаблением индийского муссона и засухой в Сахеле (Morton, 2007). Гипотетически можно допустить, что такой температурный сдвиг способен повлиять на производство сельскохозяйственных культур.

Повышение зимней температуры после мощных извержений было впервые обнаружено П.Гройсманом (1985) на территории центральной части России. Над Северной Америкой потепления не было. Позднее он обнаружил зимнее потепление как над Россией, так и над Северной Америкой после извержений вулканов Эль-Чичон и Пинатубо (Groisman, 1992). П.Гройсман объяснил явление усилением меридионального переноса, вызванного повышением температурного градиента между экваториальной областью и полярной зоной.

Модели прогнозируют изменение конфигурации глобальных полей распределения температуры и осадков (Robock et al., 2008), но эти изменения существенно ниже тех, которые возникают при росте концентраций ПГ в отсутствие применения методов ГИК (Morton, 2007; Rasch et al., 2008; Bala, 2009). Изменения региональных климатических параметров при применении методов ГИК следует рассматривать в сравнении с той ситуацией, когда действует только парниковый эффект. Модельные расчеты показывают, что при удвоении концентрации CO_2 и компенсации парникового эффекта стратосферными аэрозолями заметные температурные аномалии могут отмечаться на 15% площади планеты. Без применения ГИК в этом случае аномалии возникнут на 97% всей площади (Keith, 2000). Следует заметить, что современные климатические модели удовлетворительно воспроизводят глобальные характеристики климата, но не обладают достаточным разрешением для надежного выявления региональных климатических аномалий (Robock et al., 2008; Jones et al., 2010). Можно надеяться, что постоянное совершенствование моделей позволит преодолеть этот недостаток в ближайшее десятилетие.

Подчеркнем, что проблему региональных аномалий климата при ГИК необходимо рассматривать с точки зрения баланса выгод и потерь для мировой экономики в целом и для отдельных стран. Вполне вероятна ситуация, когда мировое сообщество может компенсировать потери индивидуальной страны ради получения выгоды для большинства стран.

Продолжение закисления Мирового океана

Закисление поверхностных вод Мирового океана вызвано растущим содержанием в атмосфере важнейшего ПГ – диоксида углерода. Это ведет к повышению кислотности морской воды за счет повышения концентрации бикарбонатного иона. По оценкам с середины XVIII века по конец XX среднее глобальное значение pH поверхностного слоя Мирового океана уже упало с 8,179 до 8,104 (Orr et al., 2005).

Включение продолжающегося закисления мирового океана в список негативных последствий ГИК является безосновательным, так как по физической природе оно не имеет никакого отношения к введению серосодержащих аэрозолей в стратосферу. Идея включения закисления океана в список возможных негативных эффектов состоит в том, что, добившись компенсации потепления, человечество перестанет снижать выбросы CO₂. Это не следует из философии ГИК, и рассмотренный негативный эффект следует считать надуманным.

Разрушение озона в стратосфере

Можно выделить три механизма влияния ГИК воздействия на озоносферу в том случае, если сульфатные аэрозоли генерируются в результате инъекции в стратосферу сероводорода. Во-первых, можно гипотетически допустить, что только озон расходуется на окисление сероводорода. Если проигнорировать действие других, более эффективных окислителей (гидроксильный радикал, атомарный кислород), то на окисление 1 Мт H₂S будет израсходовано около 6 Мт озона, или 0,2% от общего содержания озона в стратосфере (отметим, что это оценка «по максимуму»).

Во-вторых, дополнительное количество аэрозоля ведет к увеличению поглощения части потока солнечной энергии и, соответственно, к нагреву стратосферы. Изменение температуры в свою очередь ведет к смещению динамического равновесия между процессами генерации и разрушения озона (Pueschel, 1996). Эксперты ВМО (WMO, 2007) указывают, что после извержения вулкана Пинатубо в 1991 году температура стратосферы на уровне 50 hPa могла вырасти на 1°C, что вызвало снижение глобального содержания озона примерно на 2%. В результате этого извержения в стратосферу поступило огромное количество пеплового материала и

со временем образовалось около 30 Мт аэрозольных сульфатов. Скорее всего, роль сульфатных частиц в нагреве стратосферы минимальна, поскольку они в основном рассеивают солнечное излучение, не поглощая его.

В-третьих, реакции разрушения озона могут протекать на поверхности аэрозольных частиц в присутствии химически активных соединений хлора (Crutzen, 1974; Molina, Rowland, 1974). Источником активных соединений хлора являются в основном фреоны антропогенного происхождения. Этот механизм признан в настоящее время основным для наблюдавшегося в конце 20-го века истощения озонового слоя.

По мнению С.Соломон (Solomon, 1999) именно жидкие сферические частицы серной кислоты несут ответственность за резкое усиление явления антарктической озоновой «дыры» в марте-апреле 1992 года после извержения вулкана Пинатубо. С другой стороны, влияние извержения Пинатубо, выбросившего около 30 Мт аэрозоля, на толщину озонового слоя оценивается диапазоном 2 – 4% на глобальном уровне и до 8% в Арктике. Минимум ОСО был достигнут в 1994 году (а не в 1992/93 гг.), т.е. через 3 года после извержения вулкана Пинатубо, когда в стратосфере уже практически не осталось вулканических продуктов. Мощное извержение вулкана Эль-Чичон в 1982 году никак не отразилось на долговременном нисходящем тренде ОСО. Эксперты ВМО по озону (WMO, 2007) вообще воздержались от утверждения о наличии связи между средним ОСО и вулканическими выбросами в стратосферу. Такого же мнения придерживались К.Кондратьев и др., (1974), заключившие, «что не обнаруживается определенной связи уменьшения концентрации озона с увеличением концентрации аэрозоля, т.е. озоноразрушающее действие аэрозольных частиц не является, вероятно, определяющим фактором содержания озона в стратосфере».

Химический состав частиц и состояние вещества (кристаллическое, аморфное, жидкое) играют первостепенную роль в определении скоростей гетерогенных реакций. Оценено (Ивлев, Довгалюк, 1999), что скорости гетерогенных реакций на поверхности растворов серной кислоты на 2-3 порядка ниже, чем на поверхности твердых частиц. Исходя из сказанного, можно заключить, что наблюдаемое уменьшение содержания озона после мощных вулканических извержений связано, скорее, с деструкцией на

поверхности твердых частиц, а не жидких (полужидких) сульфатных частиц (Deshler et al., 1996). Соответственно, разрушение озона сульфатными частицами при ГИК должно проходить намного слабее, чем на аэрозолях вулканического происхождения.

Какова бы ни была природа аэрозолей, для ответа на вопрос о возможности влияния ГИК на озоносферу важнейшим фактором является динамика содержания в стратосфере фреонов. Содержание фреонов в стратосфере в последние годы постоянно падает за счет снижения их антропогенных выбросов. Прогнозируется, что ко времени востребованности ГИК в середине 21-ого века механизм гетерогенного разрушения озона в стратосфере практически потеряет свое значение. Модельные расчеты показывают, что это может произойти в ближайшие десятилетия (Lane et al., 2007). По мнению экспертов ВМО, при отсутствии в стратосфере «активного» хлора сульфатные частицы могут даже способствовать генерации озона (WMO, 2007). С учетом этих обстоятельств можно заключить, что разрушение озона вследствие увеличения массы стратосферного сульфатного аэрозоля, скорее всего, не может рассматриваться как негативный эффект ГИК.

Влияние на растительность

Снижение потока солнечного излучения при применении отражающих стратосферных аэрозолей, допустим, на 2% не означает, что на такую же величину снизится продуктивность фотосинтеза. Наземная растительность использует лишь около 1% потенциально доступной фотосинтетически активной радиации, поскольку продуктивность ограничена недостатком тепла и влаги (Будыко, 1984). На этом основании можно уверенно заключить, незначительное ослабление потока солнечной радиации при использовании геоинженерии климата никак не отразится на продуктивности наземных растений. Исключение могут составлять бурые водоросли, обитающие на глубинах в десятки метров, но их вклад в глобальный фотосинтез ничтожен.

Считается, что из-за введения аэрозолей в стратосферу уменьшится доля прямой радиации и увеличится доля рассеянной. Суммарная эффективность поглощения CO₂ кронами деревьев будет увеличиваться, так как увеличится рассеянная радиация. Это связано с тем, что в этом случае крона дерева получает более равномерное освещение, и количество поглощенной растением энергии возрастает

(Будыко, 1984). При этом может возрасти первичная продукция у некоторых видов, что может рассматриваться как негативный эффект, поскольку нарушается баланс экосистемы. С другой стороны, рост первичной продукции может поспособствовать увеличению поглощения углекислого газа растениями. В таком случае, при увеличении доли рассеянной радиации скорее имеет место позитивный эффект.

Увеличение кислотности атмосферных осадков

В случае введения в стратосферу серосодержащих газов образующаяся серная кислота может нейтрализоваться не полностью и выпасть на земную поверхность. Следовательно, избыточная кислота потенциально может изменить степень закисления осадков. Напомним, что закисление осадков определяется концентрацией свободных ионов водорода.

Допустим, что образовавшиеся в стратосфере сульфаты представлены исключительно серной кислотой (нейтрализация кислоты на всех этапах поступления кислоты из стратосферы на земную поверхность игнорируется). В работе (Израэль и др., 2013) показано, что при самом негативном сценарии роста концентраций ПГ, к концу 21 века потребуется поддержание дополнительного слоя стратосферного сернокислотного аэрозоля массой 27 Мт. При времени жизни 1,5 года необходимо ежегодное введение в стратосферу количество серы, эквивалентное $2,4 \cdot 10^{11}$ г-моль $[H^+]$. Допустим, кроме того, что кислота выводится исключительно осадками (сухое поглощение аэрозолей поверхностью игнорируется). При площади поверхности Земли $5,1 \cdot 10^{14}$ м² на каждый квадратный метр будет дополнительно выводиться в $4,7 \cdot 10^{-4}$ г-моль $[H^+]$ в год. Средняя интенсивность выпадающих на всем земном шаре осадков составляет около 1000 л/м²/год (Henshow et al., 2000). Таким образом, дополнительная концентрация кислоты в дождевой воде (при условии наших допущений) составит максимально $4,7 \cdot 10^{-7}$ г-моль $[H^+]$ /литр. Современная кислотность осадков варьирует по территории земного шара в пределах величины рН от 4 до 7 (Whelpdale, Kaiser, 1996). Для расчетов в качестве среднего можно взять значение рН=5,6. Это значение соответствует абсолютно чистой воде с растворенным в ней атмосферным углекислым газом. Добавление к чистой дождевой воде $4,7 \cdot 10^{-7}$ г-моль $[H^+]$ /литр снизит среднюю величину рН со значения 5,6 лишь до 5,53. Такая

кислотность дождевой воды в принципе не может вызвать каких-либо негативных эффектов (Израэль и др., 1989). Напомним, что приведенный расчет базировался на максимально жестких предположениях. Таким образом, учет дополнительного сколь либо опасного закисления атмосферных осадков, т.е. снижения величины рН ниже 4,0 лишен всякого смысла.

К выводу об отсутствии превышения нагрузки по кислотности пришли Кравитц и др. (Kravitz et al., 2009). На основе модельных расчетов они показали, что внесение в стратосферу 4 Мт серы приведет к дополнительному выпадению кислоты на уровне 0,001 г-моль/м²/год лишь на очень малых площадях. Это значение ниже принятой критической нагрузки для самых чувствительных экосистем на порядки величины.

Влияние на перистые облака

Переохлажденный водный раствор, содержащий частицы растворенной серной кислоты – важный предшественник кристаллов льда. Влияние геоинженерных аэрозолей на перистые облака проявляется, когда за счет седиментации или других процессов они попадают в верхнюю тропосферу (Pueschel, 1996). Исследованию влияния вулканических аэрозолей на перистые облака было посвящено множество работ. В большинстве исследований (Minnis et al., 1993; Pueschel et al., 1994) говорится об увеличении количества ядер конденсации и, соответственно увеличении альбедо облаков. В работе (Mitchell, Finnegan, 2009) показано, что перистые облака контролируют поток уходящей длинноволновой радиации, при этом, чем выше перистое облако, тем сильнее оно влияет на этот поток. Таким образом, за счет изменения размеров кристаллов в перистых облаках можно менять и климат (Mitchell, Finnegan, 2009). То есть генерация дополнительных перистых облаков не должна рассматриваться как негативный эффект, поскольку является частью механизма геоинженерного воздействия на климат.

Осветление/помутнение неба

Один из предполагаемых побочных эффектов метода «стратосферных аэрозолей» – осветление неба (или образование белесого неба). Считается, что увеличенное количество сульфатных аэрозолей в стратосфере приведет к увеличению рассеянной радиации с неоднородным спектральным распределением.

Результаты модельных расчетов показали, что при любом распределении частиц по размерам, стратосферные аэрозоли приведут к увеличению белого цвета в спектре (Kravitz et al., 2012).

Изменение цвета неба наблюдалось в периоды после крупных извержений вулканов, например таких, как Пинатубо в 1991г. Наиболее сильный эффект наблюдался на малозаселенных территориях. В атмосфере городов, которые сами по себе являются сильнейшими источниками загрязнения атмосферы, находится множество аэрозолей, рассеяние на которых высветляет небо даже в отсутствии ГИК. В настоящее время в мире каждый второй человек проживает в городе, а всего через 35 лет в городах будет проживать две трети населения (Народонаселение, 2011). Т.е., скорее всего, введение в стратосферу аэрозольных частиц вызовет осветление неба, однако этот эффект будет заметен лишь для трети населения планеты. Эффект в данном случае носит чисто эстетический характер.

Ухудшение условий для астрономических наблюдений

Важную информацию о влиянии стратосферного аэрозоля могут дать результаты астрономических наблюдений после мощных вулканических извержений. После извержения вулкана Эль-Чичон в Мексике в 1982 году аэрозольное поглощение в высокогорной обсерватории ГАИШ в Казахстане возросло с 2-3% до 15-20% (Мошкалев, 1983). Изменение аэрозольной экстинкции в течение длительного периода после извержения Пинатубо в 1991г. проанализировано в целом ряде работ (Guerrero et al., 1998; Ильясов, 2011; Burki et al., 1995).

Из-за значительных вариаций коэффициента экстинкции после вулканических извержений учесть его влияние на качество астрономических наблюдений достаточно сложно. Однако ни в одной из цитируемых работ не отмечалась принципиальная невозможность наблюдений в связи с появлением стратосферного вулканического аэрозоля. Важным является то, что при относительной фотометрии астрономических объектов измеряется интенсивность их излучения с привязкой к звездам-стандартам. Поэтому при наблюдениях такого рода, снижение прозрачности стратосферы не должно вызывать значимых помех (комментарий сотрудника НИАИ СПбГУ Капацкой Е.Н.). Заметим, что наблюдения в Пулковской обсерватории после извержений вулканов Эль Чичон и

Пинатубо продолжались в обычном режиме (комментарий научного сотрудника Пулковской обсерватории В.Д. Галкина)

Таким образом, исследования показывают, что создание дополнительного аэрозольного слоя может отразиться на некоторой части наземных астрономических наблюдений. Однако в меняющихся предсказуемым образом условиях прозрачности атмосферы будет возможность учесть эти изменения при астрономических наблюдениях.

Снижение эффективности солнечной энергетики

В настоящее время солнечная энергетика обеспечивает 0,05% от нужд мировой энергетики. Считается, что к 2025 году этот показатель может вырасти до 2,5%, а к 2040 году до 16%. Если при использовании ГИК будет достигнуто глобальное снижение потока солнечной радиации на 3%, то доля потерь мировой энергетикой составит от 0,00075 в 2025 году до 0,0048 в 2040 году. Если же доля солнечной энергетики останется прежней, то общие потери составят 0,000015, что представляется ничтожной величиной. При самых оптимистичных темпах развития солнечной энергетики потери к середине XXI века составят менее чем полпроцента от общего производства энергии. Величина экономических потерь в этом случае будет несопоставимо мала с потерями в результате непереносимого повышения глобальной температуры.

Негативное влияние самого процесса применения метода

Любой метод доставки предшественников аэрозоля в стратосферу будет так или иначе негативно влиять на окружающую среду. В первую очередь это связано с токсичностью доставляемых веществ – сероводорода или диоксида серы. Однако годовой оборот транспортируемых веществ для целей ГИК существенно ниже объемов переработки аналогичных веществ на крупных химических предприятиях. Возможное влияние на окружающую среду и человека будет носить локальный характер даже в случае аварийной ситуации, и радиус воздействия не превысит десяти километров.

В соответствии с большинством оценок (Израэль и др., 2009; Robock et al, 2009) использование авиации является наиболее легко реализуемым методом доставки необходимых веществ в стратосферу. Для выполнения работ по ГИК возможно строительство одного или нескольких аэродромов в удаленных ненаселенных

местах. На планете есть достаточно пустынных мест, где возможные негативные эффекты не скажутся ни на природные экосистемы, ни на человека.

Быстрый рост температуры при прекращении использования метода

Мгновенное обнуление аэрозольного форсинга ведет к появлению дисбаланса климатической системы. Глобальная температура начнет быстро расти, стремясь к величине, соответствующей накопленной за период реализации ГИК концентрации ПГ. Модельные расчеты подтверждают быстрый рост температуры, что может рассматриваться как опасное явление, присущее ГИК (Robock, 2008; Чернокульский и др., 2010).

Данная схема предполагает, что если прекращение геоинженерного воздействия произойдет по каким-либо причинам в самом начале его применения, существенного скачка глобальной температуры не будет, поскольку сумма абсолютных величин положительного и отрицательного форсингов будет ещё не велика. Если геоинженерная стабилизация температуры использовалась длительное время и не приводила к недопустимым негативным явлениям, трудно представить себе причины, которые потребовали бы мгновенного прекращения. Постепенное прекращение практики ГИК позволит избежать недопустимо быстрого роста температуры, что подтверждается модельными исследованиями (Израэль и др., 2013).

Неопределенность в представлении о возврате климата в исходное состояние

Исследования последствий вулканических извержений показали, что через 2-3 года после извержения охлаждающий эффект стратосферных аэрозолей прекращается. Например, после извержения Пинатубо в 1991г., вулканический аэрозоль наблюдался в стратосфере в течение 3 лет (Pyle et al, 1996). В историческое время даже самые мощные вулканические извержения вызывали эффект, длившийся не более 5 лет. Стратосферный сульфатный аэрозоль принципиально ничем не отличается от сульфатного аэрозоля вулканического происхождения. Трудно представить себе механизм, в соответствие с которым через 3-4 года после прекращения

воздействия ГИК климатическая система не пришла бы в исходное состояние.

Возможность человеческой ошибки при использовании метода

Безусловно, возможны аварии, вызванные человеческим фактором. Риски здесь сопоставимы с рисками при промышленном крупнотоннажном производстве токсичных веществ или при рутинных полетах самолетов с оружием массового поражения на борту. Для снижения риска массового поражения места проведения ГИК работ вполне могут быть выбраны в безлюдных районах.

Подрыв политики снижения выбросов парниковых газов

Предполагается, что добившись стабилизации глобальной температуры за счет применения методов ГИК, человечество прекратит заботиться о необходимости снижения выбросов ПГ. Данный негативный эффект не связан с особенностями геоинженерного воздействия.

Стоимость

Грубую оценку капитальных и текущих затрат в расчете на ежегодную доставку в стратосферу 2 Мт сероводорода выполнила А. Ревокатова (2012). Считая, что стоимость пропорциональна доставляемой массе, находим, что для поддержания массы стратосферного аэрозоля на уровне 27 Мт (Израэль и др., 2013) капитальные затраты составят 6-10 млрд. долларов США, а текущие затраты 3 – 6 млрд. долларов США в год. В сравнении с военными бюджетами стран (1,2 триллиона долларов в год) эти цифры представляются незначительными. Они тем более незначительны в сравнении с затратами на декарбонизацию мировой экономики.

Коммерческий контроль технологии, военное использование технологии

Коммерческий и технологический контроль должны осуществляться международной уполномоченной организацией. Начало применения ГИК возможно лишь при достижении международного консенсуса. Возможно достижение соглашений на уровне ООН о компенсации потерь индивидуальной страны мировым сообществом ради получения выгоды для большинства стран. Геоинженерная база не будет находиться во владении одной

страны, и контроль над техникой исполнения должен проводиться экспертами из разных стран. Таким образом, можно исключить враждебное или иное использование ГИК.

Конфликт с действующими соглашениями

Существует целый ряд действующих соглашений, которые, не упоминая напрямую ГИК, могут препятствовать его применению. Например, часто упоминается Конвенция 1976 года «...о запрете военного или любого другого враждебного использования средств воздействия на окружающую среду» как фактор, препятствующий использованию ГИК. Однако, цель ГИК не имеет военного значения, и не направлена на враждебное воздействие. Над юридическими аспектами применения ГИК в настоящее время работают десятки квалифицированных юристов, что дает основание предполагать возможность скорого разрешения данного вопроса.

Контроль терморегулятора

А.Робок (Robock, 2008) ставит вопрос о том, кто будет решать, какую температуру должна иметь Земля. Проще всего эту проблему решить, выбрав эталонной определенную температуру. Например, температуру середины 20 века или температуру доиндустриальной эпохи. Возможно принятие решения о стабилизации глобальной температуры на определенном уровне (например, на уровне $+2^{\circ}\text{C}$ от глобальной температуры в прединдустриальный период). ГИК предназначена для решения общемировой проблемы. Выбор желательного уровня средней глобальной температуры будет производиться совместно всеми странами исходя из разумных предпосылок. В таком случае эта проблема вряд ли может стать негативным эффектом применения ГИК.

Непредсказуемые последствия

Для предсказания возможных последствий ГИК используются климатические модели, которые в силу своей несовершенности не могут точно отразить состояние климатической системы Земли спустя несколько десятилетий. Но те же самые климатические

модели используются и для прогноза будущего изменения климата. Безусловно, человек не способен предусмотреть абсолютно все эффекты, которые могут возникнуть в исключительно сложной климатической системе Земли при масштабном применении методов ГИК. Данный вопрос представляется исключительно общим и не имеющим ответа в принципе. С равным успехом его можно адресовать любой новейшей технологии.

Ранжирование возможных негативных эффектов использования ГИК

В таблице представлена классификация степени опасности побочных эффектов ГИК по четырем критериям (по трехбалльной шкале) – охват территории возможным негативным воздействием; охват количества населения Земли возможным негативным воздействием; степень опасности для человека и экосистем; количество целевых исследований данного негативного эффекта. Из таблицы следует, что основная часть рассмотренных потенциальных опасностей имеют глобальный характер, как по площади воздействия, так и по количеству подвергаемого воздействию населения. Это обусловлено глобальностью воздействия самого метода. В тоже время, степень опасности практически всех побочных эффектов очевидным образом преувеличена. Наиболее вероятно, что негативное воздействие ГИК может проявиться на уровне отдельных регионов и оказывать влияние на жизнь больших групп населения, например, в юго-восточной Азии, в Индии, в центральной Африке (Robock et al, 2008; Володин и др., 2011).

Уровень знаний о предмете и о путях предотвращения угроз дают возможность с уверенностью говорить том, что основная часть поставленных А.Робокком вопросов носит надуманный характер. В этом случае можно говорить о том, что уровень угроз явно преувеличен. Однако некоторые побочные эффекты (воздействие на региональный климат, влияние на озон в стратосфере и др.) требуют дальнейшего изучения оценки величины и характера потенциального ущерба.

Ранжирование степени опасности побочных эффектов геоинженерии климата

Побочный эффект	По пространственному охвату	По охвату количества населения	По степени опасности	Количество целевых исследований
Воздействие на региональный климат	*	**	**	***
Закисление Мирового океана	***	-	-	***
Разрушение озоносферы	***	***	*	***
Влияние на растительность	***	***	-	*
Увеличение кислотности осадков	***	***	-	**
Влияние на перистые облака	**	**	-	**
Помутнение неба	***	***	*	*
Ухудшение астрономических наблюдений	***	-	-	*
Снижение эффективности солнечной энергетики	*	*	-	*
Негативное влияние процесса применения метода	-	-	*	*
Опасность быстрого прекращения использования	***	***	*	***
Возможность невозврата в исходное состояние	***	***	-	*
Возможность человеческой ошибки	*	-	*	*
Подрыв политики снижения выбросов ПГ	***	***	-	*
Стоимость	-	-	-	**
Коммерческий контроль технологии	-	-	*	*
Военное использование технологии	***	***	-	*
Конфликт с действующими соглашениями	***	***	-	**
Контроль терморегулятора	***	***	-	*
Непредсказуемые последствия	***	***	*	*

Примечание. Прочерк в таблице означает отсутствие связи между конкретным побочным эффектом и соответствующим критерием. Экспертные оценки степени проявления возможных негативных эффектов представлены возрастающим количеством звездочек.

Заключение

Возможность стабилизации глобальной температуры путем воздействия на климатическую систему Земли (геоинженерия климата) находит среди научного сообщества, как сторонников, так и противников. Противники данного подхода изыскивают аргументы,

подтверждающие их точку зрения о недопустимости вмешательства в климатическую систему, поскольку такое вмешательство приведет к появлению негативных последствий для человека и природных экосистем. Наиболее полный набор таких аргументов был обобщен в работе А.Робока (Robock, 2008).

Анализ возможности появления нежелательных эффектов при геоинженерии климата с использованием стратосферных сульфатных аэрозолей показывает, что наиболее вероятно возникновение региональных климатических аномалий. Открытым остается вопрос о возможности заметного влияния стратосферных сульфатных аэрозолей на состояние озонового слоя.

В литературе часто упоминается тот факт, что геоинженерия с использованием стратосферных аэрозолей не предотвращает растущее закисление Мирового океана. Это естественно – геоинженерия не предназначена для решения всех экологических проблем.

Многие из отмечаемых недостатков геоинженерии связаны с юридическими, экономическими, социальными и этическими аспектами. Они никак не связаны с физическими основами рассматриваемого метода. Не отрицая важности некоторых из этих аспектов, мы можем утверждать, что их нельзя рассматривать в качестве принципиальных ограничений использования геоинженерной стабилизации глобальной температуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Будыко М.И. 1974. Метод воздействия на климат. Метеорология и Гидрология. № 2. С. 91-97.
2. Будыко М.И. 1984. Эволюция биосферы. – Л.: Гидрометеиздат. 488 С.
3. Володин Е.М., Кострыкин С.В., 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.
4. Гройсман П.Я. 1985. Региональные климатические последствия вулканических извержений. Метеорология и Гидрология. № 4. С. 39-45.
5. Ивлев Л.С., Довгалюк Ю.А. 1999. Физика атмосферных аэрозольных систем. – С.-Пб.: НИИХ СПбГУ. 194 С.
6. Израэль Ю.А. 2005. Эффективный путь сохранения климата на современном уровне – основная цель решения климатической проблемы. Метеорология и гидрология. № 10. С. 5-9.
7. Израэль Ю.А., Володин Е.М., Кострыкин С.В., Ревокатова А.П., Рябошапко А.Г. 2013. Возможность геоинженерной стабилизации глобальной

- температуры в 21 веке с использованием стратосферных аэрозолей и оценка возможных негативных последствий. *Метеорология и Гидрология*. (В печати).
8. Израэль Ю.А., Назаров И.М., Прессман А.Я., Ровинский Ф.Я., Рябошапко А.Г., Филиппова Л.М. 1989. Кислотные дожди. –Л.: Гидрометеиздат. 269 С.
 9. Израэль Ю.А., Рябошапко А.Г. 2011. Геоинженерия климата: возможности реализации. Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т. 24. –М.: ИГКЭ Росгидромета и РАН. С. 11-24.
 10. Израэль Ю.А., Рябошапко А.Г., Петров Н.Н. 2009. Сравнительный анализ геоинженерных способов стабилизации климата. *Метеорология и Гидрология*. № 6. С. 5-24.
 11. Ильясов С.П. 2011. Комплексное исследование астроклимата Майданакской обсерватории. Дисс. на соис. уч. ст. д.ф.-м.н. Ташкент: Астрономический институт им. Улугбека.
 12. Кондратьев К.Я., Ивлев Л.С., Никольский Г.А. 1974. Комплексные исследования стратосферного аэрозоля. *Метеорология и Гидрология*. № 9. С. 16-26.
 13. Мошкалев В.Г. 1983. Резкое повышение поглощения в атмосфере в 1982 году. *Астрономический циркуляр* №1309.
 14. Народо́население 2011. Народо́население мира в 2011 году. Доклад фонда Организации Объединенных Наций в области народонаселения UNFPA. ISBN 978-0-89714-994-5.
 15. Ревокатова А.П. 2012. Сравнение методов и оценка стоимости создания стратосферного аэрозольного слоя для целей инженерии климата. В кн. Исследование возможностей стабилизации климата с помощью новых технологий. Труды Международной конференции «Проблемы адаптации к изменениям климата», Москва, 7-9 ноября 2011г. –М.: Росгидромет. С. 138-150.
 16. Чернокульский А.В., Елисеев А.В., Мохов И.И. 2010. Аналитическая оценка эффективности предотвращения потепления климата контролируемыми аэрозольными эмиссиями в стратосферу. *Метеорология и Гидрология*. № 5. С. 16-26.
 17. Bala G. 2009. Problems with geoengineering schemes to combat climate change. *Current Science*. V. 96, № 1. P. 41-48.
 18. Burki G., Rufener F., Burnet M. et al. 1995. The atmospheric extinction at the E.S.O. La Silla observatory. *Astronomy and Astrophysics Supplement*. V. 112. P. 383.
 19. Crutzen P.J. 1974. Estimates of possible future ozone reductions from continued use of fluorochloromethanes (CF₂Cl₂, CFC₃). *Geophys. Res. Lett.* V. 1, P. 205-208.
 20. Crutzen P.J. 2006. Albedo enhancement by stratospheric sulfur injection: a contribution to resolve a policy dilemma? *Climate Change*. V. 77. P. 211-219.
 21. Deshler T., Nardi B., Hofmann D.J., Johnson B.J. 1996. Correlation between ozone loss and volcanic aerosol at altitudes below 14 kilometers over McMurdo Station, Antarctica. *Antarctic Journal of the United States. Review* 1996. V. 25, № 2.
 22. Groisman P.Y. 1992. Possible regional climate consequences of the Pinatubo eruption: An empirical approach. *Geophys. Res. Lett.* V. 19. P. 1603-1606.
 23. Guerrero M., García-López R., Corradi R. 1998. Extinction over the Canarian observatories: the limited influence of Saharan dust. *New Astronomy Reviews*. V. 42. Issue 6-8. P. 529-532.

24. Jones A., Haywood J., Boucher O., Kravitz B., Robock A. 2010. Geoengineering by stratospheric SO₂ injection: results from the Met Office HadGEM2 climate model and comparison with the Goddard Institute for Space Studies ModelE. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* V. 10. P. 7421-7434.
25. Keith D. W. 2000. *Geoengineering the Climate: History and Prospect*. Annual Review of Energy and the Environment. V. 25. P. 245-284.
26. Kravitz B., MacMartin D.G., Caldeira K. 2012. Geoengineering: Whiter skies? *Geophys. Res. Lett.* V. 39. L11801, doi: 10.1029/2012GL051652.
27. Kravitz B., Robock A., Oman L., Stenchikov G., Marquardt A.B. 2009. Sulfuric acid deposition from stratospheric geoengineering with sulfate aerosols. *J. Geophys. Res.* V. 114. D14109. doi: 10.1029/2009JD011918
28. Kyoto Protocol 1998. The Kyoto Protocol to the UN Framework Convention on Climate Change. <http://unfccc.int/2860.php>
29. 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.
30. Lenton T.M., Vaughan N.E. 2009. The radiative forcing potential of different climate geoengineering options. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* V. 9. P. 2559-2608.
31. Minnis P., Harrison E.F., Stowe L.L., Gibson G.G., Denn F.M., Doelling D.R., Smith W.L. 1993. Radiative climate forcing by the Mt. Pinatubo eruption. *Science.* V. 259. P. 1411-1415.
32. Mitchell D.L., Finnegan W. 2009. Modification of cirrus clouds to reduce global warming, *Environ. Res. Lett.* V. 4. 045102, doi:10.1088/1748-9326/4/4/045102.
33. Molina M.J., Rowland F.S. 1974. Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom-catalyzed destruction of ozone. *Nature.* V. 249. P. 810-812.
34. Morton O. 2007. Climate change: Is it what it takes to save the world? *Nature.* V. 447. P. 132-136.
35. NAS 1992. US National Academy of science. 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.
36. Orr J.C., Fabry V.J., Aumont O., et al. 2005. Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature*, v. 437, pp. 681-686.
37. Pueschel R. 1996. Stratospheric aerosols: formation, properties, effects. *J. Aerosol Sci.* V. 27, № 3. P. 383-402.
38. Pueschel R., Russell P., Allen D., Ferry G., Snetsinger K., Livingston J., Verma S. 1994. Physical and optical properties of the Pinatubo volcanic aerosol: Aircraft observations with impactors and a Sun-tracking photometer. *J. Geophys. Res.* V. 99 (D6). doi: 10.1029/94JD00621. ISSN: 0148-0227.
39. Pyle D.M., Beattie P.D., Bluth G.J.S. 1996. Sulphur emission to the stratosphere from explosive volcanic eruptions. *Bull. Volcanol.* V. 57. P. 663-671.
40. 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.
41. Robock A., MacMartin G., Duren R., Christensen W. 2013. Studying geoengineering with natural and anthropogenic analogs. *Climatic Change*. DOI 10.1007/s10584-013-0777-5.

42. Robock A. 2002. Pinatubo eruption: The climate aftermath. *Science*. V. 295. P. 1242-1244.
43. Robock A. 2008. 20 reasons why geoengineering may be a bad idea. *Bulletin of the Atomic Scientists* V. 64, №. 2. P. 14-18.
44. Robock A., Marquardt A., Kravitz B., Stenchikov G. 2009. The benefits, risks, and costs of stratospheric geoengineering. *Geophys. Res. Lett.* V. 36. L19703. 9 P.
45. Robock A., Oman L., Stenchikov G.L. 2008. Regional climate responses to geoengineering with tropical and Arctic SO₂ injections. *J.Geoph. Res.* V. 113. D16101. doi:10.1029/2008JD010050.
46. Solomon S. 1999. Stratospheric ozone depletion: A review of concepts and theory. *Rev. Geophys.* V. 37. P. 275-316.
47. Teller E., Hyde R., Wood L. 2002. Active Climate Stabilization: Practical Physics-Based Approaches to Prevention of Climate Change. Preprint UCRL-JC-148012, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA [www.llnl.gov/global-warm/148012.pdf]
48. The Royal Society 2009. *Geoengineering the climate: Science, governance and uncertainty*. ISBN: 978-0-85403-773-5. 83 P.
49. Whelpdale D., Kaiser M. 1996. *Global Acid Deposition Assessment*. WMO Report 106. 241 P.
50. WMO 2007. WMO (World Meteorological Organization), *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2006*, Global Ozone Research and Monitoring Project – Report No. 5. Geneva. 572 P.