

Климатические ресурсы

УДК 504.38

Инженерия климата: возможности реализации

Ю.А. Израэль, академик РАН, А.Г. Рябошапка, д.ф.-м.н.
Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН
E-mail: Yu.Izrael@23.relcom.ru

Предметом рассмотрения статьи служит антропогенное воздействие на климат. Отмечается, что меры Киотского протокола по стабилизации концентрации парниковых газов продемонстрировали свою несостоятельность. В тоже время технологии целенаправленного изменения параметров климатической системы, объединенные термином «инженерия климата», дают возможность предотвратить потенциальные катастрофические последствия глобального потепления и позволить человечеству адаптировать мировую экономику к новым вызовам.

Ключевые слова: потепление климата, порог допустимого потепления, Киотский протокол, инженерия климата, стратосферные сульфатные аэрозоли, экологические последствия.

Введение

На протяжении последних двух столетий деятельность человека привела к заметному изменению состава атмосферы Земли. В первую очередь это связано с использованием огромных количеств ископаемого топлива. За считанные десятилетия человечество сожгло такое количество каменного угля, на накопление которого природа потратила миллионы лет в каменноугольном периоде. Кроме того, на огромных территориях леса были заменены пашнями и пастбищами. Промышленность выбрасывала и выбрасывает в окружающую среду миллионы тонн веществ, многие из которых были не свойственны живой природе.

Неконтролируемое антропогенное воздействие привело не только к загрязнению атмосферы, но и к изменению ее оптических характеристик. В результате антропогенная деятельность по своим последствиям стала в один ряд с естественными астрономическими, геофизическими и биологическими факторами, определяющими изменчивость глобального климата. Принципиальная возможность человечества влиять на климат Земли была впервые рассмотрена и научно обоснована в классических работах Дж. Тиндалла [1], С. Аррениуса [2], Т. Чамберлина [3], Г. Коллендара [4] и М.И. Будыко [5].

Основной целью решения климатической проблемы можно считать стабилизацию климата Земли в состоянии, которое мы называем современным. Под этим термином, по-видимому, следует понимать климат до начала его антропогенного изменения в последние десятилетия [6, 7].

Чаще всего климатические изменения антропогенного характера связывают с ростом в атмос-

фере концентраций так называемых парниковых газов (в первую очередь, диоксида углерода, закиси азота, метана, фреонов). Однако, существует и много других геосферных характеристик, изменение которых под влиянием деятельности человека способно повлиять на глобальный климат, при этом как в сторону потепления, так и в сторону похолодания.

По данным глобальной сети метеорологических станций температура приземного воздуха выросла за XX в. примерно на 0,74°C. Сама по себе эта величина не должна вызывать каких-либо опасений. В геологическом прошлом Земли были периоды с температурой, превышающей современную на десять и более градусов, и жизнь на Земле при этом процветала. Следует подчеркнуть, что большинство экспертов Межправительственной группы по изменению климата (МГЭИК) не утверждает с абсолютной уверенностью об исключительной антропогенной причине современного роста глобальной температуры. За период инструментальных наблюдений температуры и ранее отмечались довольно резкие изменения средних глобальных значений. Так резкий рост температуры имел место в 20-30-х гг. XX в., когда за два десятилетия температура возросла примерно на 0,4°C. Такое изменение вряд ли можно объяснить антропогенными выбросами, поскольку их интенсивность была в тот период в несколько раз ниже современных.

Если рассмотреть темпы роста глобальной температуры за два 20-летних периода – с 1921 г. по 1940 г. и с 1987 г. по 2006 г. – то окажется, что в первом случае ежегодное приращение было даже несколько выше (0,0208 град/год), чем во втором

(0,0195 град/год). Несмотря на определенные сомнения относительно природы климатических, изменений сам факт интенсивного роста температуры вызывает тревогу научного сообщества и мировой общественности.

Роль Киотского протокола в стабилизации климата

С принятием Конвенции ООН по изменению климата проблема переросла чисто научные рамки и приобрела социальный, экономический и политический характер. Принятый в рамках Конвенции Киотский протокол предусматривал добровольное уменьшение выбросов парниковых газов развитыми странами, по меньшей мере, на 5% за период 2008-2012 гг. по сравнению с выбросами 1990 года [8]. Изначально Киотский протокол являлся документом политическим – основная тяжесть по снижению выбросов парниковых газов возлагалась лишь на развитые страны и страны с переходной экономикой.

Довольно быстро стало очевидным, что стабилизация климата путем снижения антропогенной нагрузки за счет CO₂ и других парниковых газов произойдет очень весьма нескоро, по крайней мере, не в XXI в. [9]. Здесь важно также отметить, что предусмотренные Протоколом конкретные цифры снижения выбросов парниковых газов в период 2008-2012 гг., не имеют под собой четкого научного обоснования безопасного уровня потепления [10]. Прогнозы темпов роста экономик развивающихся стран являются весьма неопределенными. Даже при самых благоприятных условиях можно добиться стабилизации концентраций парниковых газов на безопасном уровне при киотском подходе лишь спустя многие столетия, но при этом развитые страны должны снизить эмиссию до нуля, что совершенно не реально.

Это опасение подтвердил фактический провал Всемирной климатической конференции в 2009 г. в Копенгагене, где не удалось согласовать необходимые уровни снижения выбросов парниковых газов. Не продемонстрировала какого-либо прогресса и следующая конференция в Канкуне (2010 г.).

Реально имеющий место факт роста глобальной температуры с одной стороны, и неэффективность «киотского подхода» с другой стороны породили множество предположений о наступлении эпохи необратимых катастрофических последствий изменения климата. Это заставляет исследовать возможности использования более эффективных, оперативных и дешевых мер стабилизации климата, чем меры Киотского протокола. Эти меры должны, по меньшей мере, отсрочить или вовсе исключить наступление катастрофических последствий изменения климата и дать возможность человечеству перестроить мировую экономику с целью стабилизации состава земной атмосферы.

Возможности инженерной стабилизации климата

Указывая на то, что сжигание огромного количества ископаемых топлив в течение XX в. само по себе представляет глобальный геоинженерный

эксперимент, известный американский геофизик М.С. МакКракен [11] задает вопрос: «... если мы смогли сделать что-то неумышленно, можем ли мы сделать что-либо тщательно продуманное для противодействия уже сделанному?».

Еще до принятия Киотского протокола ученые предлагали инженерные решения для противодействия изменениям климата и для управления климатом Земли. Первым, кто теоретически обосновал возможность борьбы с потеплением климата, был советский академик М.И. Будыко [12]. На эту мысль его навели заметные снижения глобальной температуры после мощных вулканических извержений. Причиной этого явления было образование в стратосфере долгоживущего слоя сульфатных аэрозолей, отражающего часть приходящей солнечной радиации. М.И. Будыко предложил искусственно воспроизводить это природное явление путем сжигания в стратосфере необходимого количества серы.

В 1977 г. итальянский геофизик Марчетти [13] ввел термин «geoengineering», обозначающий действия по модификации глобального климата. К концу 1990-х годов этот термин начал означать новое научное направление, в последнее время чаще определяемое термином «climate engineering» (инженерия климата).

К настоящему времени сложилось два основных направления инженерии климата. Первое предполагает изменение потока приходящей солнечной энергии (главным образом, в видимом диапазоне спектра). Если речь идет о предотвращении потепления климата, то поток должен быть уменьшен за счет отражения в космос части радиации. Для борьбы с похолоданием возможно размещение вне Земли зеркал, направляющих дополнительную энергию на Землю. Второе направление включает в себя также методы улавливания атмосферных парниковых газов (в основном CO₂) с последующей их консервацией. Естественно, оба направления (а также и любые киотские меры) могут реализовываться одновременно.

Реакция научного сообщества на идею управления глобальными климатическими процессами была неоднозначной. В первую очередь, негативное восприятие инженерии климата было связано с опасением, что в случае использования инженерных подходов человечество прекратит борьбу с выбросами парниковых газов. Лишь в последнее время сложилось представление об инженерии климата как средстве предотвращения катастрофического потепления, которое может при необходимости быть применено в дополнение к традиционным методам сокращения выбросов парниковых газов.

Важным обстоятельством, определяющим неприятие идеи инженерии климата, было отсутствие общепринятого определения этого понятия. Здесь мы определяем это понятие следующим образом: «*Инженерией климата* является любое преднамеренное действие, направленное на изменение потока приходящей на Землю солнечной энергии или на изъятие из атмосферы парниковых газов с целью увеличения потока уходящей от Земли длинноволновой радиации».

Значительный теоретический вклад в инженерию климата внес великий американский физик Э. Теллер [14-16]. Толчок к переходу от теоретических рассуждений к осмыслению практических возможностей применения инженерии климата дали статьи Ю.А. Израэля [6] и П. Крутцена [17] в середине 2000-х годов. Нобелевский лауреат П. Крутцен недвусмысленно заявил, что «инженерия климата является единственным доступным путем быстрого снижения температуры, если провалятся международные усилия обуздать эмиссию парниковых газов».

В дальнейшем идеи М.И. Будыко использовать стратосферные аэрозоли для отражения части солнечного излучения были развиты и детализированы Ю.А. Израэлем [6, 7, 18]. В этих работах акцент делался на перспективность разработки метода целенаправленного увеличения оптической толщи стратосферного аэрозоля в достаточно сжатые сроки, пока глобальное потепление климата не достигло критического уровня. В этом случае вопрос о сохранении концентрации парниковых газов на некотором предельном уровне является одним из возможных важнейших путей решения проблемы, но не единственным. Если будет найдено иное средство против потепления климата, повышенная концентрация парниковых газов (в первую очередь, диоксида углерода) не представит большой опасности [6]. Более того, повышенные концентрации диоксида углерода ускоряют фотосинтез растений и способствуют повышению урожайности сельскохозяйственных культур [19].

Важной вехой в развитии идей инженерии климата явился форум президентов (или их представителей) академий наук 15-и ведущих стран мира в Токио в июле 2008 г. в преддверии саммита «Большой Восьмерки». Форум принял положение, открывающее широкие пути развития идей инженерии климата: «Существуют также благоприятные возможности способствовать исследованиям новых подходов, которые могут дать свой вклад в сохранение стабильного климата, включая так называемые технологии геоинженеринга...».

Условия начала использования инженерии климата

Возникает вопрос – когда и при каких условиях должно начаться применение инженерии климата. Эксперты NASA [20] назвали инженерные подходы «методом аварийного парашюта», который следует иметь, но использовать лишь в случае неотвратимой опасности. Вопрос о пороге такой опасности остается открытым.

Условия начала применения геоинженерного воздействия на климат определяются, прежде всего, представлениями об оптимальном климате на планете для всего человечества или для большинства стран. Можно выделить три возможных подхода. Первый предполагает, что оптимальным для существования человека был климат раннего голоцена, когда средняя температура была примерно на 2°C выше, чем в первой половине XX в. (голоценовый оптимум). Второй подход основан на предположении, что до 1990 г. антропогенные климатические изменения были незначительны-

ми, но дальнейшее повышение глобальной температуры недопустимо. Наконец, третий подход основан на компромиссе между желанием сохранить привычный климат XX в. и реальными возможностями сокращения выбросов парниковых газов. Последний подход допускает превышение глобальной температуры над уровнем 1990 года на критическую пороговую величину.

Ю.А. Израэль и С.М. Семенов [21] оценили, что +2,5°C можно рассматривать как предельно допустимый уровень потепления глобального климата по сравнению с его доиндустриальным состоянием. Эксперты Евросоюза [22] предложили считать величину 2°C допустимым порогом превышения средней глобальной температурой ее доиндустриального уровня. Выбор величины в 2°C является весьма условным. С одной стороны Европейский Союз настаивает, что это та величина повышения температуры, после которой начнутся катастрофические изменения в окружающей среде (<http://www.stabilisation2005.com>). С другой стороны надежно установлено, что в период голоценового «климатического оптимума» (8-6 тыс. лет назад) средняя глобальная температура была выше современной на 2,5°C.

В соответствии с наиболее пессимистичным сценарием МГЭИК [9] этот порог может быть преодолен к 2050 г., при этом МГЭИК отмечает, что реальный рост выбросов CO₂ в настоящее время превышает даже самый пессимистический прогноз. Не следует забывать, что средняя глобальная температура является величиной флуктуирующей и зависящей не только от концентрации CO₂ в воздухе. Вполне возможно повторение ситуации 20-30-х гг. XX в., когда температура возросла на 0,4°C. Такая флуктуация может наложиться на общий тренд роста температуры, в результате чего допустимый порог может быть превышен существенно ранее 2050 года.

Следует подчеркнуть, что поскольку речь идет о глобальной угрозе, для ее своевременного предотвращения должны использоваться стратегии, которые эффективны даже в условиях максимально неблагоприятного сценария. Важно, чтобы разработка приемлемых методов инженерии климата активно развивалась уже в настоящее время. Полномасштабное опробование технологий инженерии климата (сначала без достижения ощутимого климатического эффекта) должно начаться уже в текущем десятилетии.

Метод стратосферных аэрозолей

В работах [24-26] было выполнено сравнение разных 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. По сути, речь идет о создании небольшого *виртуального*, непрерывно извергающегося вулкана, действие которого должно быть направлено исключительно на нижнюю стратосферу.

Для создания глобального климатического эффекта желательно создание дополнительного слоя над всем земным шаром, но возможно ограничиться лишь Северным полушарием или даже только арктической зоной [20]. Ограничение применения метода лишь высокими широтами имеет то преимущество, что высота тропопаузы здесь существенно ниже, чем в тропической зоне. Это позволит вводить необходимое вещество на высоте 12-14 км с использованием современных авиационных средств.

Реализация схемы должна включать в себя создание дополнительного к природному сульфатному стратосферному слою искусственного аэрозольного слоя массой порядка мегатонны. Поскольку аэрозольные частицы постепенно выводятся из стратосферы за счет естественных процессов, потребуются непрерывная подпитка этого слоя с интенсивностью порядка 0,5 Мт/год (это ориентировочная оценка).

Предполагается, что изменение потока входящей к земной поверхности солнечной радиации на 1% изменяет среднюю глобальную температуру приблизительно на 1,5°C [16]. При долговременном воздействии, приводящем к увеличению площади оледенения полярных зон и увеличению альбедо Земли, температурный эффект может быть еще выше [27]. Уточненные расчеты показали, что для предотвращения возможного катастрофического потепления климата следует уменьшить радиационный поток на величину 7,5-8 Вт/м² [18]. Это составит около 2% от величины потока солнечного излучения, падающего на Землю в настоящее время.

Наиболее реально создание дополнительного аэрозольного слоя путем доставки в нижнюю стратосферу серосодержащих газов с помощью самолетов. В качестве предшественников стратосферного аэрозоля возможно использование любого серосодержащего газа, но наиболее перспективным представляется применение сероводорода. В стратосфере сера из восстановленного состояния окисляется до VI-валентного состояния с образованием субмикронных сульфатных частиц. Важно отметить, что на одну тонну вводимого газа-предшественника в стратосфере может образоваться от 2 до 4 тонн аэрозольного вещества. Время жизни таких частиц в нижней стратосфере достаточно велико (1-2 года) для создания долговременного эффекта отражения части солнечного излучения.

Доставка в стратосферу порядка мегатонны вещества является на современном уровне развития авиации вполне разрешимой задачей. Затраты на ежегодную доставку в стратосферу порядка 1 Мт необходимого газа с учетом стоимости создания специально оснащенных самолетов и их непрерывной работы, стоимости самих газопредшественников, аэродромного обслуживания и т.д. не превысят 3 млрд. долларов США в год. Это весьма малая величина в сравнении со стоимостью мер сокращения выбросов парниковых газов, предусмотренных Киотским протоколом [27].

По мнению Ю.А. Израэля [6] предложенный способ может быть реализован в течение 3-4 лет. Важным обстоятельством является то, что метод может быть разработан и испытан в полном масштабе до наступления критической ситуации, вызванной потеплением климата. Его применение может идти параллельно с использованием других методов, о которых речь пойдет ниже. При прекращении воздействия климатическая система Земли вернется к исходному состоянию за 2-3 года.

Предложение об использовании сульфатных аэрозолей вызывает у ряда экспертов опасения относительно возможности возникновения побочных негативных эффектов. Это исключительно важный вопрос, поскольку воздействие на климатическую систему носит глобальный характер, то и негативные эффекты могут быть глобальными. А. Робок [28] обобщил информацию о возможных негативных эффектах в своей статье «20 причин, по которым геоинженеринг может быть плохой идеей». В этой же статье он дает анализ каждой из причин, показывая степень опасности того или иного негативного эффекта.

Наиболее часто в литературе упоминается возможность дополнительного закисления осадков. В работах Ю.А. Израэля [6] и Б. Кравитца и др. [17] было показано, что дополнительное количество выпадающей серы на земную поверхность в предельном случае может составлять малые доли процента от существующих уровней выпадений от антропогенных источников. Даже в том случае, если дополнительная масса аэрозолей будет составлять 5 Мт в виде чистой серной кислоты, значение pH осадков снизится не более, чем на 0,001, что в принципе не может сказаться на закислении окружающей среды.

Можно предположить, что введение в стратосферу дополнительного количества аэрозольного вещества может повлиять на озоносферу Земли и вызвать определенное негативное влияние на биосферу за счет увеличения интенсивности ультрафиолетового излучения, достигающего поверхности планеты. Действительно, некоторые модельные оценки показывают, что создание стратосферного аэрозольного слоя с массой 5-10 Мт может привести к заметному (до 10%) снижению общего содержания озона (ОСО). Даже если это и так, величина такого снижения не может быть сколь либо опасной, поскольку естественные вариации ОСО существенно выше [29], и все элементы биосферы адаптировались к вариациям потока УФ излучения в процессе эволюции.

Важную информацию дают наблюдения за изменением содержания озона после мощных вулканических извержений. Эффект извержения вулкана Пинатубо (1991 г.), 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 г. (а не в 1992/1993 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 г. никак не отразилось на долговременном нисходящем тренде ОСО. Эксперты ВМО по озону [30] вообще воздержались от утверждения о наличии связи между средним ОСО и вулканическими выбросами в стратосферу. Такого же мнения придерживались К.Я. Кондратьев и др. [31], 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».

Возможно влияния стратосферного аэрозольного вещества на содержание озона за счет нагрева стратосферы, вызванного частичным поглощением солнечного излучения. Изменение температуры в свою очередь ведет к смещению динамического равновесия между процессами генерации и разрушения озона [32, 33]. Эксперты ВМО [30] указывают, что после мощных извержений вулкана температура стратосферы на уровне 50 hPa могла вырасти на 1°K, что вызвало снижение глобального содержания озона примерно на 2%.

Следует иметь в виду, что ОСО в последние годы постоянно растет, скорее всего, за счет снижения в стратосфере содержания антропогенного хлора. Расчеты с использованием климатической модели Института вычислительной математики РАН показали, что ОСО в конце XXI в. станет примерно на 10 ЕД больше, чем в середине XX века. Инженерное воздействие с применением 10 Мт стратосферного аэрозоля приведет к снижению ОСО на 5 ЕД, т.е. в любом случае ОСО будет выше современного уровня [34].

Парниковый эффект и воздействие стратосферных аэрозолей имеют различную физическую основу. Это ведет к невозможности идеальной компенсации парникового эффекта с сохранением всех региональных климатических характеристик [35, 36]. Следует, однако, сравнить величины отклонений в полях осадков, например, при применении сульфатных аэрозолей с прогнозируемыми последствиями глобального потепления. Вызванные инженерным воздействием аномалии представляются совершенно ничтожными в сравнении с эффектами потепления.

Международные аспекты использования геоинженерии

Следует отметить, что интерес к инженерии климата стремительно растет как со стороны отдельных ученых, так и правительственных и неправительственных организаций. Геоинженерия занимает серьезное место в планах Академии наук США. Метеорологическое общество США в июне 2009 г. сформулировало рекомендации по изучению геоинженерных подходов. В 2008 г. Королев-

ское общество Великобритании организовало рабочую группу по развитию исследований геоинженерных методов. Наконец, Евросоюз в ноябре 2009 г. провел «Стратегический семинар по изучению геоинженерии климата». К проблеме инженерии климата обратилась такая организация как ЮНЕСКО, проведшая соответствующие слушания в 2010 г.

Естественно, что любое вмешательство человека в природные процессы меняет параметры окружающей среды. Отсюда следует, что если решение о применении метода сульфатных аэрозолей мировым сообществом будет в будущем принято, этому будет предшествовать детальное исследование не только отклонений геофизических параметров, но и глубокий экономический анализ выгод и потерь в масштабах мировой экономики. Кроме того, должно приниматься во внимание то обстоятельство, что вопросы о применении средств инженерии климата должны решаться на основе международных договоров с учетом того, что разные страны могут быть заинтересованы в различных сценариях изменения климата.

Заключение

Рост глобальной температуры является надежно установленным фактом вне зависимости от причин, его порождающих. В соответствии с наиболее пессимистическими прогнозами МГЭИК критический температурный порог (+2°C) может быть превышен к середине XXI века. Принимаемые в рамках Киотского протокола меры по стабилизации содержания в атмосфере парниковых газов не могут предотвратить превышение температурного порога и обеспечить стабилизацию климата в приемлемом состоянии. В последние годы разработаны методы целенаправленного изменения потоков солнечного излучения (методы инженерии климата), способные в сжатые сроки понизить глобальную температуру и предотвратить наступление климатического кризиса. В этом отношении наиболее перспективен метод стратосферных сульфатных аэрозолей, который может быть реализован в течение 3-4 лет. Метод может быть разработан и испытан в полном масштабе до наступления критической ситуации, вызванной потеплением климата. Решению о полномасштабном применении метода сульфатных аэрозолей должен предшествовать глубокий экономический анализ выгод и потерь в масштабах мировой экономики. Его применение может идти параллельно с другими методами, включая методы Киотского протокола. Вопросы о применении средств инженерии климата должны решаться на основе международных договоров с учетом того, что разные страны могут быть заинтересованы в различных сценариях изменения климата.

Литература

1. Tyndall J. Heat Considered as a Mode of Votion. 2nd ed. – London: Longmans, Green and Co., 1865.
2. Arrhenius S. On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground // Philosophical

Magazine and Journal of Science. Fifth Series. – London, Edinburgh and Dublin, 1896. – Pp. 237-276.

3. Chamberlin T. An Attempt to Frame a Working Hypothesis of the Cause of Glacial Periods on an Atmospheric Basis

// J. of Geol., 7, 1899. – Pp. 545-584.

4. Callendar G.S. The Artificial Production of Carbon Dioxide and its Influence on Temperature // *Quart J. of Royal Meteorol. Soc.*, 1938. – Pp. 223-240.

5. Будыко М.И. Изменение климата. 2005. – Л.: Гидрометеоиздат, 1974. – 280 с.

6. Израэль Ю.А. Эффективный путь сохранения климата на современном уровне – основная цель решения климатической проблемы // *Метеорология и гидрология*, 2005. № 10. – С. 5-9.

7. Израэль Ю.А. Роль стратосферных аэрозолей в сохранении современного климата / *Международная конф. по проблемам гидрометеорологической безопасности*. – М., 2006.

8. Kyoto Protocol. The Kyoto Protocol to the UN Framework Convention on Climate Change, 1998, <http://unfccc.int/2860.php>

9. Climate Change 2007. IPCC Fourth Assessment Report. Working Group I: The Physical Science Basis, Geneva: WMO, 2007.

10. Израэль Ю.А. Возможности предотвращения изменения климата и его негативных последствий. Проблема Киотского протокола / Под ред. Ю.А. Израэля. – М.: «Наука», 2006. – 408 с.

11. Morton O. Climate Change: Is it what it Takes to Save the World? // *Nature*, 2007. 447. – Pp. 132-136.

12. Будыко М.И. Метод воздействия на климат // *Метеорология и гидрология*, 1974. № 2. – С. 91-97.

13. Marchetti C. On Geoengineering and the CO₂ Problem // *Clim. Change*, 1977. 1. № 1. – Pp. 59-68.

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

15. Teller E., Hyde R., and Wood L. Active Climate Stabilization: Practical Physics-Based Approaches to Prevention of Climate Change / Preprint UCRL-JC-148012. – Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory, 2002. [www.llnl.gov/global-warm/148012.pdf]

16. Teller E., Hyde R., Ishikawa M., Nuckolls J., Wood L. Active Climate Stabilization: Presently-Feasible Albedo-Control Approaches to Prevention of Both Types of Climate Change / *Symposium on Macro-Engineering Options for Climate Change Management and Mitigation*, England, 7-9 January 2004. Cambridge: – Newton Institute, 2004.

17. Crutzen P.J. Albedo Enhancement by Stratospheric Sulfur Injection: a Contribution to Resolve a Policy Dilemma? // *Climate Change*, 2006. V. 77. – Pp. 211-219.

18. Израэль Ю.А., Борзенкова И.И., Северов Д.А. Роль стратосферных аэрозолей в сохранении современного климата // *Метеорология и гидрология*, 2007. № 1. – С. 5-14.

19. Будыко М.И., Израэль Ю.А., Яншин А.Л. Глобальное потепление и его последствия // *Метеорология и гидрология*, 1992. № 5. – С. 1-13.

20. Lane L., Caldeira K., Chatfield R., Longhoff S. Workshop Report on Managing Solar Radiation / Ed. by L.Lane, K.Caldeira, R.Chatfield, S.Langhoff, Report NASA/CP-2007-214558, 2007. – 40 p.

[<http://event.arc.nasa.gov/main/home/reports/Solar-RadiationCP.pdf>]

21. Izrael Yu.A., Semenov S.M. Critical Levels of Green-

house Gases, Stabilization Scenarios, and Implications for the Global Decisions / In: *Avoiding Dangerous Climate Change* / Ed. by H. J. Schellnhuber, W. Cramer, N. Nakicenovic, T. Wigley, G. Yohe. – Cambridge University Press, 2006. – Pp. 73-79.

22. The 2 Degree Celsius Target: Information Reference Document: Background on Impacts, Emission Pathways, Mitigation Options and Costs, 2008.

http://ec.europa.eu/clima/policies/international/docs/brochure_2c.pdf

23. Salamatin A.N., Lipenkov V.Yu., Barkov N.I., Jonsel J., Petit J.R., Reynaud D. Ice-core CAGE Dating and Paleothermometer Calibration Based on Isotope and Temperature Profiles from deep Boreholes at Vostok Station (East Antarctica) // *J. Geophys. Res.*, 1998. V. 103, N. D 8. – Pp. 8963-8977.

24. Израэль Ю.А., Рябошапка А.Г., Петров Н.Н. Сравнительный анализ геоинженерных способов стабилизации климата // *Метеорология и гидрология*, 2009. № 6. – С. 5-24.

25. Lenton T.M., Vaughan N.E. The Radiative Forcing Potential of Different Climate Geoengineering Options // *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 2009. V. 9. – Pp. 2559-2608.

26. Geoengineering the climate: Science, Governance and Uncertainty, 2009. – 83 p.

27. Gribbin J. Climatic Change. Part 2, Thermal Balance of the Earth / Ed. by J. Gribbin. – Cambridge: Cambridge University Press, 1977.

28. Robock A. 20 Reasons why Geoengineering may be a bad Idea // *Bulletin of the Atomic Scientists*, 2008. V. 64. N. 2. – Pp. 14-18.

29. Александров Э.Л., Израэль Ю.А., Кароль И.Л. и Хргиан А.Х. Озонный щит Земли и его изменения. – СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. – 288 с.

30. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2006, Global Ozone Research and Monitoring Project – Report N. 5. – Geneva: WMO, 2007. – 572 pp.

31. Кондратьев К.Я., Ивлев Л.С., Никольский Г.А. Комплексные исследования стратосферного аэрозоля // *Метеорология и гидрология*, 1974. № 9.

32. Poeschel R.F. Stratospheric Aerosols: Formation, Properties, Effects // *J. Aerosol Sci.*, 1996. V. 27. N. 3. – Pp. 383-402.

33. Stenchikov G., Robock A., Ramaswamy V., Schwarzkopf M., Hamilton K., Ramachandran V. Arctic Oscillation Response to the 1991 Mt. Pinatubo Eruption: Effect of Volcanic Aerosols and Ozone Depletion // *J. Geophys. Res.*, 2002. V. 107. – P. 4803.

34. Израэль Ю.А., Рябошапка А.Г., Володин Е.М., Мохов И.И., Гервальд А.Ю. Исследование эффективности и разработка технологии стабилизации климата Земли с использованием стратосферных аэрозолей. Проект РФФИ 09-0513538. 2011.

35. Robock A., Oman L., Stenchikov G.L. Regional Climate Responses to Geoengineering with Tropical and Arctic SO₂ injections // *JGR*, 2008. V. 113, D16101, doi:10.1029/2008JD010050.

36. Володин Е.М., Кострыкин С.В., Рябошапка А.Г. Изменение климата вследствие введения серосодержащих веществ в стратосферу в модели земной системы // *Известия РАН: ФАО*, 2011 (в печати).