

УДК: 551.5, 517

## Анализ оптимальной по Парето эффективности предотвращения глобального потепления методами геоинженерии

В. П. Пархоменко

Вычислительный центр РАН,  
Россия, 119333, г. Москва, ул. Вавилова, д. 40

E-mail: parhom@ccas.ru

Получено 11 июня 2015 г.

Проведенное исследование основано на сочетании трехмерной гидродинамической модели глобального климата, включая модель океана с реальными глубинами и конфигурацией континентов, модель эволюции морского льда и энерго-, влагобалансовую модель атмосферы. Концентрация аэрозоля от 2010 г. до 2100 г. рассчитывается как управляющий параметр для стабилизации среднегодовой температуры воздуха у поверхности земли. На основе расчетов предполагается, что выбросы серы от 2010 г. до 2100 г. изменяются линейно для первого сценария и квадратично — для второго роста  $\text{CO}_2$ . Граница Парето исследована и визуализирована для двух параметров — среднеквадратичного отклонения атмосферной температуры для зимнего и летнего сезонов.

Ключевые слова: моделирование климата, геоинженерия, стабилизация климата

### Pareto optimal analysis of global warming prevention by geoengineering methods

V. P. Parkhomenko

*Dorodnicyn Computing Centre of RAS, 40 Vavilov st., Moscow, 119333, Russia*

**Abstract.** — The study is based on a three-dimensional hydrodynamic global climate coupled model, including ocean model with real depths and continents configuration, sea ice evolution model and energy and moisture balance atmosphere model. Aerosol concentration from the year 2010 to 2100 is calculated as a controlling parameter to stabilize mean year surface air temperature. It is shown that by this way it is impossible to achieve the space and seasonal uniform approximation to the existing climate, although it is possible significantly reduce the greenhouse warming effect. Climate will be colder at 0.1–0.2 degrees in the low and mid-latitudes and at high latitudes it will be warmer at 0.2–1.2 degrees. The Pareto frontier is investigated and visualized for two parameters — atmospheric temperature mean square deviation for the winter and summer seasons. The Pareto optimal amount of sulfur emissions would be between 23.5 and 26.5 TgS/year.

Keywords: climate modelling, geoengineering, climate stabilization

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2015, vol. 7, no. 5, pp. 1097–1108 (Russian).

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований Проектов РФФИ № 14-01-00308, № 14-07-00037.

## Введение

Изменение климата — это долгосрочная проблема, но в то же время проблема, которая требует срочных действий, учитывая темпы и масштабы накопления парниковых газов в атмосфере и опасность повышения температуры более чем на 2 °С. Сегодня необходимо сосредоточиться на фундаментальных аспектах и действиях, ибо в противном случае те риски, с которыми сталкивается человечество, будут повышаться каждый год.

Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК) в качестве межправительственного органа, учрежденного в 1988 г., совместно с Всемирной метеорологической Организацией и Программой Организации Объединенных Наций по окружающей среде предоставляет достаточно авторитетные и объективные научно-технические оценки.

Приведем здесь основные важные последние результаты МГЭИК [Изменение климата, 2013]. Этот доклад содержит глобальную оценку науки об изменении климата, из которой с 95-процентной достоверностью следует, что деятельность человека является доминирующей причиной потепления, наблюдаемого с середины XX века. В докладе подтверждается, что потепление климатической системы является неоспоримым фактом (рис. 1) и сопровождается множественными наблюдаемыми изменениями беспрецедентного характера в масштабах от десятилетий до тысячелетий: потепление атмосферы и океана, уменьшение массы снега и льда, повышение уровня моря и увеличение концентраций парниковых газов.

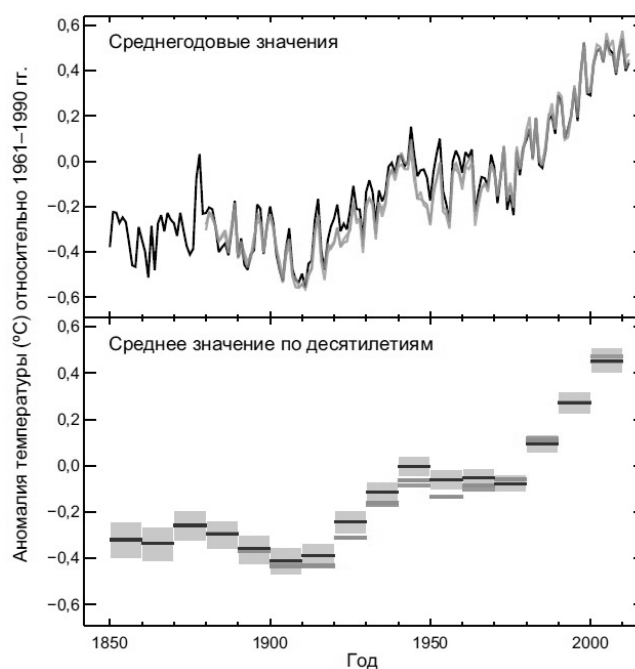


Рис. 1. Аномалия температуры

Кумулятивные выбросы двуокси углерода в значительной мере определяют повышение средней глобальной приземной температуры к концу XXI века и в дальнейшем. Прогнозы выбросов парниковых газов изменяются в широком диапазоне в зависимости как от социально-экономического развития, так и от политики в области климата.

Для Пятого доклада МГЭИК [Изменение климата, 2013] научное сообщество определило набор из четырех новых сценариев, именуемых репрезентативными траекториями концентраций (РТК) парниковых газов. Они определяются приблизительной суммарной величиной радиационного воздействия в 2100 г. по сравнению с 1750 г.: 2.6 Вт/м<sup>2</sup> для сценария РТК2.6; 4.5 Вт/м<sup>2</sup> для сценария РТК 4.5; 6.0 Вт/м<sup>2</sup> для сценария РТК 6.0 и 8.5 Вт/м<sup>2</sup> для сценария РТК8.5.

Эти четыре РТК включают один сценарий сокращения выбросов CO<sub>2</sub>, который предполагает весьма низкий уровень воздействия (РТК 2.6); два сценария стабилизации (РТК 4.5 и РТК 6.0)

и один сценарий с весьма высокими уровнями выбросов парниковых газов (РТК 8.5). Таким образом, РТК могут отражать результаты целого ряда направлений политических мер в области климата в XXI веке. Согласно РТК 6.0 и РТК 8.5, радиационное воздействие продолжает расти вплоть до 2100 г.; в РТК 2.6 оно достигает максимума и затем снижается; в РТК 4.5 оно стабилизируется к 2100 г. Каждый сценарий РТК определяет годовые концентрации парниковых газов и антропогенные выбросы до 2100 г. Сценарии РТК основаны на комбинации комплексных оценочных моделей, простых климатических моделей, моделей химии атмосферы и глобального углеродного цикла.

Большинство расчетов по климатическим моделям выполнялось с заданными уровнями концентраций  $\text{CO}_2$ , достигающими к 2100 г. 421 ppm (РТК 2.6), 538 ppm (РТК 4.5), 670 ppm (РТК 6.0) и 936 ppm (РТК 8.5). С учетом также заданных концентраций  $\text{CH}_4$  и  $\text{N}_2\text{O}$  суммарные концентрации в эквиваленте  $\text{CO}_2$  составляют 475 ppm (РТК 2.6), 630 ppm (РТК 4.5), 800 ppm (РТК 6.0) и 1 313 ppm (РТК 8.5).

## Методы климатического геоинжиниринга

Геоинжиниринг определяется как целенаправленное широкомасштабное вмешательство в систему Земля с целью противодействия нежелательным воздействиям, изменяющим климат планеты. Рассматривается несколько способов реализации геоинжиниринга. Методы удаления диоксида углерода (УДУ) направлены на то, чтобы замедлить или, возможно, повернуть вспять прогнозируемое увеличение будущих концентраций  $\text{CO}_2$  в атмосфере, ускоряя естественное удаление атмосферного  $\text{CO}_2$  и увеличивая запасы углерода на суше, в океане и в геологических резервуарах. Методы регулирования солнечной радиации (РСР) направлены на противодействие потеплению, связанному с повышением концентраций парниковых газов, посредством сокращения количества солнечного света, поглощаемого климатической системой.

Методы РСР остаются нереализованными и непроверенными, но если они реализуемы, то могли бы компенсировать повышение глобальной температуры и некоторые воздействия потепления климата.

При дальнейшем повышении концентрации парниковых газов потребовалось бы соразмерное увеличение РСР, усиливающее побочные эффекты. Кроме того, увеличение РСР до значительных уровней вызвало бы риск, связанный с тем, что при прекращении РСР по какой-либо причине существует высокая степень достоверности того, что приземные температуры быстро повысились бы (в течение одного или двух десятилетий) до значений, соответствующих воздействию парниковых газов. Это вызвало бы стресс систем, чувствительных к темпам изменения климата. И наконец, РСР не компенсировало бы закисление океана в результате увеличения содержания  $\text{CO}_2$ .

Пожалуй, наиболее широко обсуждаемым и простым вариантом геоинженерии климата является повышение планетарного альбедо с помощью рассеяния в стратосфере сульфатных аэрозолей ( $\text{SO}_2$ ) [Lin, 2009]. Истоки этого подхода лежат в предложении русского климатолога М. И. Будыко [Будыко, 1974], что с потенциально опасными изменениями климата можно бороться путем развертывания полетов самолетов для сжигания серы в атмосфере и производства аэрозолей [Кондратьев, 1998], отражающих солнечный свет. М. И. Будыко неоднократно подчеркивал, что подобное воздействие на климат будет возможно только после точной оценки его влияния «на атмосферные процессы во всех районах земного шара».

В [Израэль, 2005] утверждается, что этот подход — альтернатива «необходимости регулирования концентрации парниковых газов в атмосфере» и «не представляет опасности для планеты». По утверждению автора [Израэль, 2005], оптимальный радиус аэрозольных частиц для ослабления прямого солнечного излучения составляет 0,275 микрона, и для уменьшения температуры нижней атмосферы на 1–2 °С, по предварительным оценкам, потребуется 1–5 мегатонн постоянно поддерживаемого количества таких аэрозольных частиц в нижней стратосфере.

Процесс такого «аэрозольного охлаждения» происходит и в природе во время вулканических извержений. Тогда миллионы тонн  $\text{SO}_2$ , газов и пепла выбрасываются высоко в страто-

сферу. Там происходит преобразование  $\text{SO}_2$  в тонкие сульфатные частицы аэрозоля. Эти частицы отражают солнечный свет, прежде чем он имеет возможность глубже проникнуть в атмосферу и поглотиться. Например, извержение вулкана Пинатубо на Филиппинах в 1991 г. привело в глобальном масштабе к охлаждению около  $0,5^\circ\text{C}$ . За время этого извержения было выброшено около 10 миллионов тонн серы [Kerr, 2006].

В данной работе методами математического моделирования оцениваются:

- возможность сохранения среднегодовой среднеглобальной температуры атмосферы на уровне 2010 г. с помощью выбросов аэрозоля;
- объемы необходимых аэрозольных выбросов;
- возможность сохранения регионального климата.

## Описание и численная реализация климатической модели

Климатическая модель подробно описана в [Пархоменко, 2011; Marsh, Edwards, Shepherd, 2002], здесь приведем только ее основные характеристики. Трехмерная система гидро-, термодинамических уравнений модели океана рассматривается в геострофическом приближении с фрикционным членом в уравнениях импульса по горизонтали. Значения температуры и солености удовлетворяют адвекционно-диффузионным уравнениям, что позволяет описать термохалинную циркуляцию океана. Учитывается также процедура конвективного приспособления.

Для описания процессов, протекающих в атмосфере, используется энерго- и влагобалансовая модель. Прогностическими переменными являются температура и удельная влажность воздуха. В модели решается вертикально проинтегрированное уравнение для температуры, определяющее баланс приходящего и уходящего радиационных потоков, явных (турбулентных) обменов потоками тепла с подстилающей поверхностью, высвобождения скрытого тепла из-за осадков и простой однослойной параметризации горизонтальных процессов переноса. Источники в уравнении переноса для удельной влажности определяются осадками, испарением и сублимацией с подстилающей поверхности.

В термодинамической модели морского льда динамические уравнения решаются для сплоченности льда и для средней толщины льда. Рост и таяние льда в модели зависят только от разности между потоком тепла из атмосферы в морской лед и потока тепла из льда в океан. Для температуры поверхности льда решается диагностическое уравнение.

Все блоки модели связаны между собой обменом импульсом, теплом и водой. Обмен импульсом состоит только в использовании скорости верхнего слоя океана для адвекции морского льда. Всеми другими обменами импульсом пренебрегается.

Потоки тепла между «смежными» блоками могут быть модифицированы фазовыми переходами на границах (испарением, таянием и т. д.). Потоки из одного блока в другой могут отличаться на величину, определяемую латентными тепловыми эффектами. При этом материковые стоки воды добавляются в океанические ячейки на каждом шаге по времени.

Поток пресной воды в атмосферу определяется с учетом испарения с поверхности земли и сублимации морского льда. Считаем, что осадки выпадают непосредственно в океан без учета присутствия льда, а испаренная или сублимированная вода удаляется из океана или льда соответственно. В формулировке модели океана в приближении «твердой крышки», используемой здесь, модель представляет океан как неисчерпаемый источник пресной воды для морского льда и атмосферы. Пресная вода в них сохраняется, но конвертируется в соленость на поверхности океана.

В модели используется равномерная по долготе и синусу широты конечно-разностная сетка  $72 \times 72$  ячеек. Разрешение модели по долготе составляет  $5^\circ$ , а по широте оно изменяется приблизительно от  $1,5^\circ$  у экватора до  $10^\circ$  у полюсов. Используется реальная конфигурация материков и океанов. Глубина океана представляется в виде восьмиуровневой логарифмической шкалы до 5000 м.

### Численные прогнозные эксперименты

По этой модели на первом этапе проведены расчеты прогнозирования климата до 2100 г. с использованием сценариев роста CO<sub>2</sub> РТК 8.5 и РТК 4.5 (рис. 2), предложенных МГЭИК. Некоторые результаты сведены в таблице 1 и на рисунках 3–5.

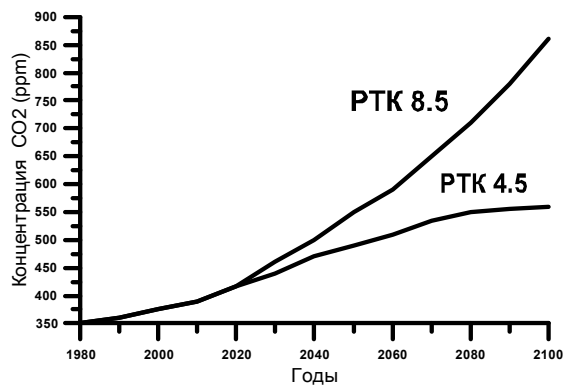


Рис. 2. Рост концентрации CO<sub>2</sub> (сценарии РТК 8.5 и РТК 4.5)

Таблица 1. Результаты расчетов по сценариям РТК 8.5 и РТК 4.5. Изменения по сравнению с 2010 г.

CO <sub>2</sub>	Температура (°C)	Макс. поток (%)	Влажность (%)	Площадь морского льда (%)	Толщина морского льда (%)
390 ppm	0.34	-0.7	2.0	0	-2.3
РТК 4.5	1.3	-13.3	9.0	-2.7	-5.3
РТК 8.5	2.2	-14.7	15.0	-5.5	-9.0

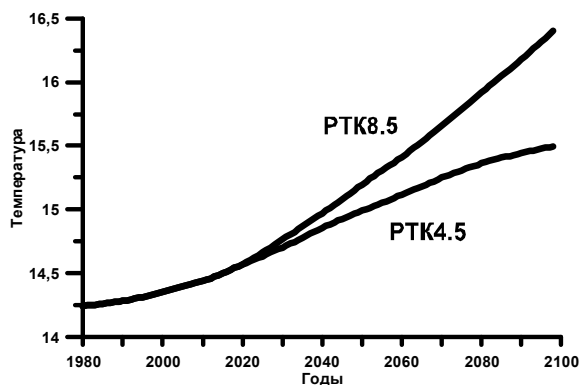


Рис. 3. Прогноз изменения температуры атмосферы при реализации сценариев РТК 8.5 и РТК 4.5

Далее проведены серии расчетов для оценки возможности стабилизации климата на уровне 2010 г. путем управления выбросами в стратосферу сульфатного аэрозоля, отражающего часть приходящего солнечного излучения. Влияние аэрозоля на климат учитывается в уравнении для температуры атмосферы, эффективно описывающим уменьшение солнечной радиации, поступающей в тропосферу путем введения альбедо аэрозольного слоя.

### Постановка задачи стабилизации климата

Математически задача формулируется по определению количества аэрозольных выбросов, необходимых для стабилизации климата на уровне 2010 г. в смысле минимизации суммы квад-

ратов отклонений среднегодовых температур атмосферы

$$\Phi(\alpha, t) = \sum_{ij} (T_{ij}(t) - T_{ij}(2010))^2,$$

где  $\alpha$  — альbedo аэрозольного слоя;  $T_{ij}(t)$ ,  $T_{ij}(2010)$  — среднегодовые температуры атмосферы в точке с координатами  $(i, j)$  в год  $t$  и в 2010 году соответственно.

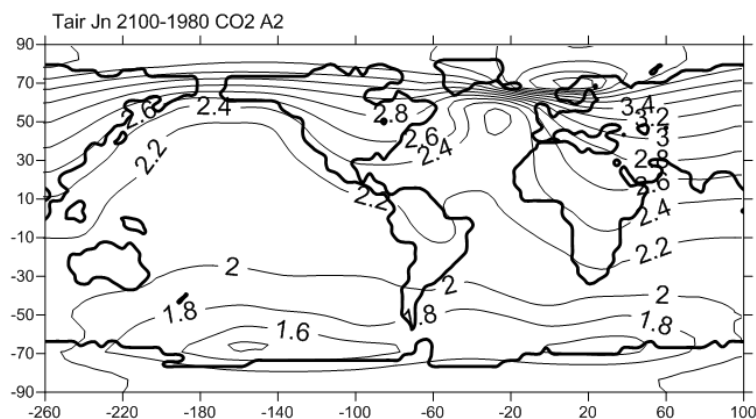


Рис. 4. Изменение температуры атмосферы (январь, 2100 г.). Сценарий РТК 8.5. Результаты расчетов по предлагаемой модели

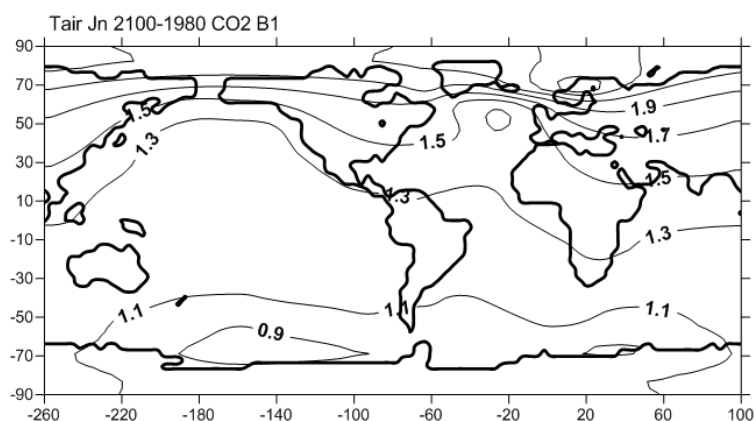


Рис. 5. Изменение температуры атмосферы (январь, 2100 г.). Сценарий РТК 4.5. Результаты расчетов по предлагаемой модели

Анализ вида полученной зависимости позволил предложить регрессионные модели. Изучался отклик модели при вариации аэрозольных выбросов. Были найдены их оптимальные по Парето подмножества [Лотов, Поспелова, 2008], в которых критериями выступали суммы квадратов отклонений температур для летнего и зимнего сезонов как глобально, так и отдельно для каждого из полушарий. Для расчета альbedo  $\alpha(t)$  аэрозольного слоя на каждом шаге по времени использовался итеративный процесс, основанный на методе парабол одномерной минимизации. Для достижения необходимой точности достаточно трех итераций.

Расчет выбросов аэрозоля для стабилизации климата проводился для сценариев РТК 8.5 (жесткий экспоненциальный рост) и РТК 4.5 (мягкий, выходящий на насыщение рост) изменения концентрации  $\text{CO}_2$  от 1980 г. до 2100 г. (рис. 2).

В обоих сценариях считается, что с 1980 г. до 2010 г. аэрозоль отсутствует. Затем для каждого года вычисляется необходимое значение альbedo обратного рассеяния слоя аэрозоля для стабилизации климата на уровне 2010 г. Расчеты проводились с альbedo, не зависящим от широты (то есть равномерно распределенный слой аэрозоля в стратосфере), с достижением усло-

вия минимума суммы квадратов отклонений среднегодовых температур атмосферы стабилизированного климата и климата 2010 г.

Для оценки соотношения между полученными альбедо аэрозоля  $\alpha$  и массой аэрозоля в атмосфере, а также массы выбросов аэрозоля в год применяется следующая модель.

Предполагается, что оптическая толщина стратосферного рассеивающего аэрозоля  $\tau$  линейно зависит от его массы  $m$  в столбе атмосферы единичной площади [Eliseev, Mokhov, Karpenko, 2009]  $\tau = km$ . Коэффициент экстинкции  $k = 7.6 \text{ м}^2/\text{г}$  был оценен по измерениям, проведенным при извержении вулкана Пинатубо в 1991 г., в результате которого в атмосферу было выброшено несколько миллионов тонн  $\text{SO}_2$ , что привело к глобальному понижению температуры примерно на  $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Мгновенный радиационный форсинг (возмущающее воздействие) на верхней границе атмосферы рассчитывается согласно соотношению  $R = -a\tau$ , где  $a = 22 \text{ Вт/м}^2$ .

Эволюция количества аэрозоля в атмосфере  $M$  подчиняется балансовому уравнению

$$\frac{\partial M}{\partial t} = E(t) - \frac{M}{T},$$

где  $E(t)$  — глобальная эмиссия, а  $T$  — время пребывания аэрозоля в атмосфере, которое оценивается как 2–3 года.

Приходящая коротковолновая солнечная радиация  $Q_{SW}$  при наличии аэрозоля в атмосфере задается соотношением

$$Q_{SW} = S_0 I(\theta, t)(1 - \alpha_p)(1 - \alpha),$$

где  $S_0$  — солнечная постоянная;  $I$  — множитель, описывающий сезонное и широтное распределение солнечной радиации;  $\alpha_p$  — планетарное альбедо;  $\alpha$  — альбедо аэрозоля.

Радиационный форсинг есть изменение потока энергии при поглощении аэрозолем и выражается через альбедо аэрозоля по формуле  $R = \Delta S = -\alpha S_0$ , следовательно, справедлива линейная связь между альбедо и массой стратосферных аэрозолей в столбе единичной площади:

$$\alpha = \frac{ak}{S_0} m.$$

Для полной массы аэрозоля в атмосфере отсюда легко получить

$$M = \int_s m ds = 4\pi R_E^2 \frac{\alpha S_0}{ak} = \alpha \Xi,$$

где  $R_E$  — радиус Земли, а постоянная  $\Xi \approx 1.5 \times 10^3 \text{ Тг}$ , если использовать значение среднего потока солнечной радиации  $S_0 = 500 \text{ Вт/м}^2$ .

## Результаты численных экспериментов

При проведении численных экспериментов были получены следующие зависимости альбедо от времени (рис. 6), которые было бы необходимо поддерживать для сохранения климата, близкого к климату 2010 г. в смысле минимизации отклонения среднегодовых температур на каждом десятилетнем промежутке в евклидовой норме [Калиткин, 1978].

Результаты расчета альбедо для сценария РТК 8.5 хорошо аппроксимируются линейной зависимостью  $\alpha = \beta t$ , где время  $t$  измеряется в годах, начиная с 2010 г., а  $\beta = 0.02/90 \text{ год}^{-1}$ . Используя эту зависимость, находим  $M(t) = t\beta\Xi$ . Подставляя это соотношение в балансовое уравнение, находим

$$E(t) = \beta\Xi \left( 1 + \frac{t}{T} \right).$$

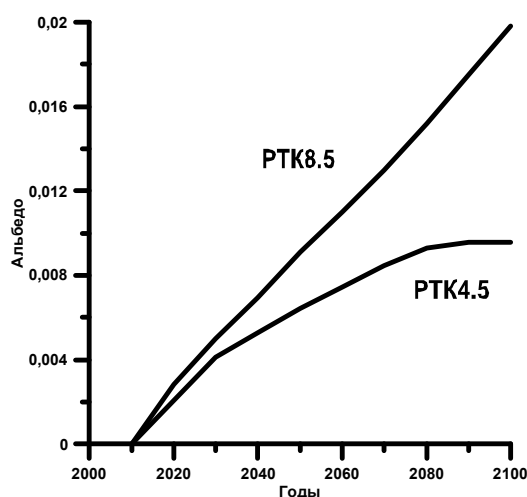


Рис. 6. Зависимость значения альбедо от времени для двух сценариев

При  $t = 100$  для эмиссии аэрозоля получаем оценку  $E(100) = 10.0$  Тг/год, что хорошо согласуется с приведенным в работах [Елисеев, Мохов, 2009, Чернокульский, Елисеев, 2010, Елисеев, Мохов, Карпенко, 2009] диапазоном от 0.4 Тг/год до 20 Тг/год.

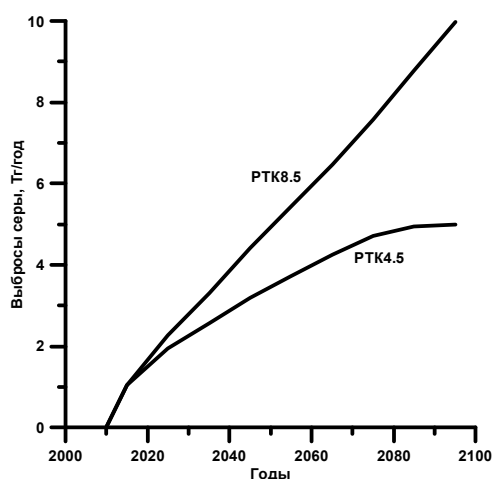


Рис. 7. Годовые выбросы серного аэрозоля для стабилизации климата

Для мягкого сценария роста  $\text{CO}_2$  РТК 4.5 альбедо атмосферы описывается эмпирической зависимостью  $\alpha = 0.01 (1 - \exp(-\beta t/0.01))$ , что позволяет оценить выбросы как  $E \approx 5.0$  Тг/год, что также дает хорошее согласие с приведенным выше диапазоном (рис. 7).

Выбросы аэрозоля в атмосферу приведут к следующим изменениям температуры и влажности по сравнению с климатом 2010 г. (рис. 8, 9). Аналогичные расчеты проводились для сценария РТК 4.5.

## Исследование оптимальных по Парето выбросов аэрозоля в атмосферу

Для полученных зависимостей альбедо исследована возможность их сведения к простым функциональным зависимостям от одного или двух параметров для возможности изучения оптимальности по Парето [Лотов, Поспелова, 2008]. Оптимизация проводилась по следующим парам критериев: сумма квадратов отклонений температур в Северном полушарии для января и июля 2100 г., сумма квадратов отклонений температур в Южном полушарии и сумма квадратов отклонений для всего мира.



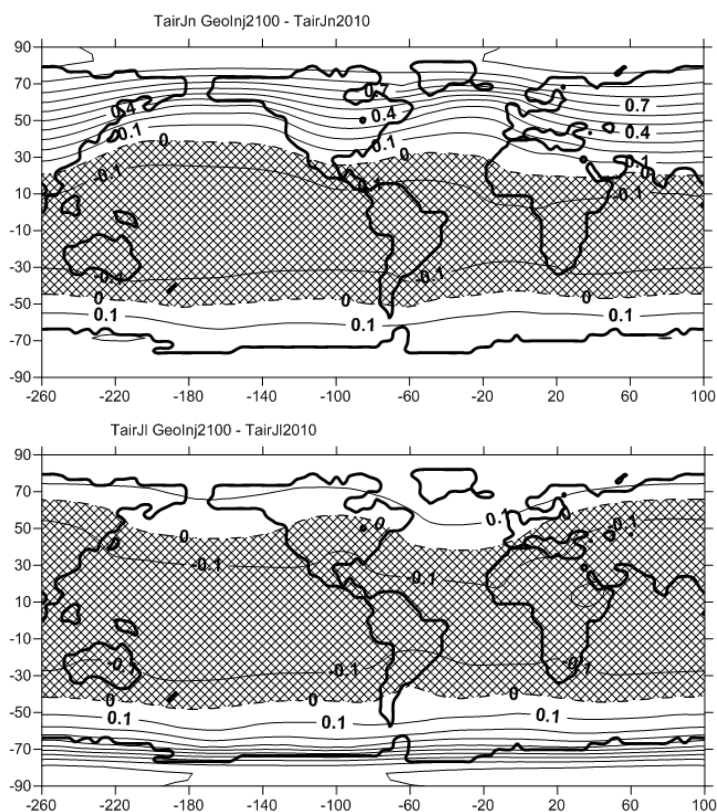


Рис. 8. Отклонение температуры атмосферы стабилизированного климата (2100 г.) от современного. Сценарий РТК 8.5. Июль (вверху) и январь (внизу)

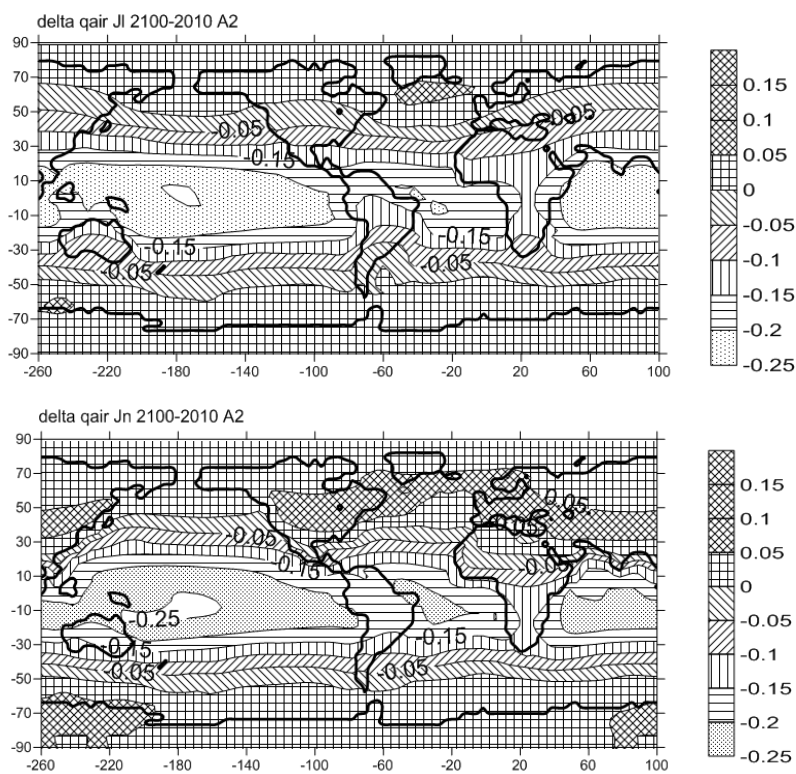


Рис. 9. Отклонение влажности атмосферы стабилизированного климата (2100 г.) от современного. Сценарий РТК 8.5. Июль (вверху) и январь (внизу)

Анализ полученной кривой (рис. 6) для сценария РТК 8.5 позволяет сделать вывод о хорошем согласии с линейной зависимостью  $\alpha = \beta t$ , где параметр  $\beta = 0.02$  и  $t$  — нормированное время в годах, отсчитываемое от 2010 г.

Были проведены расчеты сумм квадратов отклонений температур для летнего и зимнего сезонов глобально и для Северного и Южного полушарий в отдельности и построены параметрические кривые (рис. 10), по которым были найдены оптимальные диапазоны выбросов (таблица 2).

Таблица 2. Диапазон оптимальной по Парето массы аэрозоля (ТгS/год) в 2100 г. Сценарий РТК 8.5

	Мин значение	Макс значение	Диапазон	Глобальный оптимум
Северное полушарие	19.19	21.91	15 %	20.65
Южное полушарие	19.19	19.92	4 %	20.65
Глобально	19.92	20.86	4.5 %	20.65

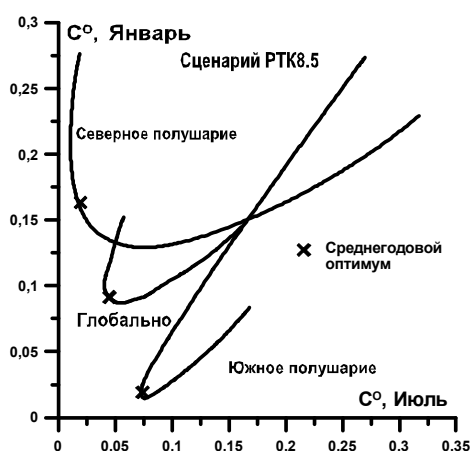


Рис. 10. Границы Парето. Отклонение температуры атмосферы для июля и января. Сценарий РТК 8.5

Для сценария РТК 4.5 зависимость альбедо от времени (рис. 6) может быть аппроксимирована однопараметрической квадратичной зависимостью с максимумом в 2100 г. Из анализа этих данных построена таблица 3 с оптимальными диапазонами выбросов аэрозоля.

Таблица 3. Диапазон оптимальной по Парето массы аэрозоля (ТгS/год) в 2100 г. Сценарий РТК 4.5

	Мин значение	Макс значение	Диапазон	Глобальный оптимум
Северное полушарие	9.28	10.54	11%	10.01
Южное полушарие	9.49	9.70	2%	10.01
Глобально	9.49	10.12	6%	10.01

По результатам расчетов и анализа составлена таблица 4, в которой приведены необходимые выбросы аэрозоля в 2100 г. и изменения во влажности и толщине морского льда по сравнению с 2010 г.

Таблица 4. Отклонения влажности, толщины морского льда по сравнению с 2010 г. и оптимальные выбросы аэрозоля в 2100 г.

Сценарий	Влажность	Толщина льда	2100 г. (ТгS/год)
РТК 8.5	-8.2 %	-4.1 %	9.97
РТК 4.5	-4.5 %	-2.0 %	4.98

## Заключение

В течение последних десятилетий наблюдаются изменения климата, выражающиеся в его глобальном потеплении. Эти изменения в основном связывают с антропогенным увеличением количества парниковых газов в атмосфере (главный из них —  $\text{CO}_2$ ). Рассматриваются проблема и возможность стабилизации климата на современном уровне. Исследование ведется на основе глобальной совместной трехмерной гидродинамической модели климата, включающей модель Мирового океана с реальными глубинами и конфигурацией материков, модель эволюции морского льда и энерго-, влагобалансовую модель атмосферы. По этой модели на первом этапе проведены расчеты прогнозирования климата до 2100 г. с использованием сценариев роста  $\text{CO}_2$  РТК 8.5 и РТК 4.5, предложенных МГЭИК. Они показывают увеличение среднегодовой глобальной поверхностной температуры атмосферы, а также влажности воздуха. Далее проведены серии расчетов для оценки возможности стабилизации климата на уровне 2010 г. путем управления выбросами в стратосферу аэрозоля, отражающего часть приходящего солнечного излучения. Вычислены изменения концентрации аэрозоля во времени с 2010 г. до 2100 г., позволяющие стабилизировать среднегодовую температуру приповерхностного слоя атмосферы.

Показано, что таким путем можно значительно ослабить эффект парникового потепления климата. При условии однородного по пространству распределения аэрозоля в стратосфере можно стабилизировать среднюю глобальную температуру атмосферы, но при этом в низких и средних широтах климат будет холоднее, а в высоких широтах — теплее. Кроме того, эти отличия имеют сильно выраженный сезонный ход — в зимний период они увеличиваются. Анализ изменения влажностей показал, что применение аэрозолей приводит к уменьшению влажности атмосферы в экваториальных областях. Наблюдается также ослабление морского ледового покрытия.

Проведен анализ количества выбрасываемых в год аэрозолей для достижения полученной зависимости альбедо от времени. Результаты оказались хорошо согласованы с диапазонами, приведенными в работах [Елисеев, Мохов, 2009; Чернокульский, Елисеев, 2010; Елисеев, Мохов, Карпенко, 2009].

Исследованы оптимальные по Парето диапазоны параметров выбросов в атмосферу для летнего и зимнего сезонов как глобально, так и для Северного и Южного полушарий в отдельности. Получен диапазон выбросов, оптимальный по всем критериям для сценария РТК 8.5. Для сценария РТК 4.5 предложена двухпараметрическая модель изменения концентрации аэрозолей и показано, что удовлетворить всем критериям одновременно невозможно.

## Список литературы

- Будыко М. И. Метод воздействия на климат // Метеорология и гидрология. — 1974. — № 2. — С. 91–97.
- Елисеев А. В., Мохов И. И. Модельные оценки эффективности ослабления и предотвращения глобального потепления климата в зависимости от сценариев контролируемых аэрозольных эмиссий в стратосферу // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. — 2009. — Т. 45, № 2. — С. 232–244.
- Елисеев А. В., Мохов И. И., Карпенко А. А. Предотвращение глобального потепления с помощью контролируемых эмиссий аэрозолей в стратосферу: глобальные и региональные особенности отклика температуры по расчетам с КМ ИФА РАН // Оптика атмосферы и океана. — 2009. — Т. 22, № 6. — С. 521–526.
- Изменение климата, 2013 г. // Пятый доклад об оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата. МГЭИК, 2013. — 222 с.
- Израэль Ю. А. Эффективный путь сохранения климата на современном уровне — основная цель решения климатической проблемы // Метеорология и гидрология. — 2005. — № 10. — С. 5–9.

- Калиткин Н. Н.* Численные методы. — М. : Наука, 1978. — 512 с.
- Кондратьев К. Я.* Аэрозоль и климат: некоторые результаты и перспективы дистанционного зондирования // Экологическая химия. — 1998. — Т. 7 (3). — С. 145–163.
- Лотов А. В., Поспелова И. И.* Многокритериальные задачи принятия решений. — М. : Макс Пресс, 2008. — 197 с.
- Пархоменко В. П.* Модель климата с учетом глубинной циркуляции Мирового океана // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Естественные науки. Спец. выпуск «Математическое моделирование». — 2011. — С. 186–200.
- Чернокульский А. В., Елисеев А. В.* Аналитические оценки эффективности предотвращения потепления климата контролируемые аэрозольными эмиссиями в стратосферу // Метеорология и гидрология. — 2010. — № 5. — С. 16–26.
- Eliseev A. V., Mokhov I. I., Karpenko A. A.* Global Warming Mitigation by Means of Controlled Aerosol Emissions into the Stratosphere: Global and Regional Peculiarities of Temperature Response as Estimated in IAP RAS CM Simulations // Atmospheric & Oceanic Optics. — 2009. — Vol. 22 (4). — P. 388–396.
- Kerr R. A.* Pollute the Planet for Climate's Sake // Science. — 2006. — Vol. 314, No. 5798. — P. 401–403.
- Lin A. C.* Geoengineering Governance // Issues in Legal Scholarship. — 2009. — Vol. 8. — Iss. 3.
- Marsh R., Edwards N. R., Shepherd J. G.* Development of a fast climate model (C-GOLDSTEIN) for Earth System Science // SOC. — 2002. — No. 83. — 54 p.