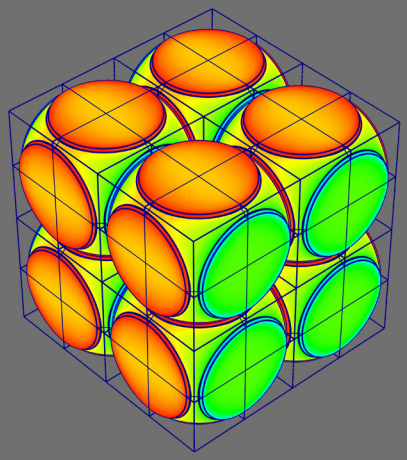
ISSN 2309-3684



Математическое моделирование и численные методы

Пархоменко В.П. Моделирование пространственного и временного глобально-го распределения стратосферного аэрозоля искусственного происхождения для стабилизации климата. Математическое моделирование и численные методы, 2018, № 4, с. 107–119.

Источник: https://mmcm.bmstu.ru/articles/184/

Параметры загрузки:
IP: 216.73.217.23
07.11.2026 00:48:39

УДК 551.513 DOI: 10.18698/2309-3684-2018-4-107119

Моделирование пространственного и временного глобального распределения стратосферного аэрозоля искусственного происхождения для стабилизации климата

© В.П. Пархоменко[1, 2]

[1]Вычислительный центр им. А.А. Дородницына ФИЦ ИУ РАН
Москва, 119333, Россия
[2]МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Приведены расчеты для оценки возможности стабилизации климата на современном уровне путем управляемых выбросов в стратосферу сульфатных аэрозолей, отражающих часть поступающего солнечного излучения (геоинженерия). Исследование основано на трехмерной гидродинамической модели глобального климата, включающей модель океана с реальной конфигурацией глубин и континентов, модель эволюции морского льда и модель общей циркуляции атмосферы. Исследована возможность получения предписанного пространственного и временного глобального распределения стратосферного аэрозоля в условиях, когда существует ограниченное количество источников аэрозолей. Приняты во внимание ветровой перенос и осаждение аэрозоля.

Ключевые слова: *моделирование глобального климата, потепление климата, выбросы аэрозолей*

Введение. Климат — один из основных природных ресурсов, влияющий на экономику, сельское хозяйство, энергетику и другие важные аспекты цивилизации. Результаты исследований свидетельствуют о том, что человеческая деятельность представляет собой важный фактор, воздействующий на климатическую систему, и в ближайшие десятилетия последствия антропогенного воздействия на нее могут быть если не катастрофическими, то существенными. Выбросы парниковых газов могут повысить среднюю глобальную температуру воздуха в течение нескольких десятилетий, в то время как естественные причины повышения температуры на одно и то же значение составят не менее нескольких тысячелетий. Беспрецедентными являются не сами будущие изменения в численном измерении, а темпы их роста [1]. Сохраняется большая неопределенность таких изменений в региональном масштабе. Кроме того, крайне неблагоприятные социально-экономические последствия могут быть вызваны и естественными климатическими изменениями.

Математическое и численное моделирование является мощным инструментом для исследования климатической системы и прогнозирования изменений климата. Современное моделирование осуществляется

с помощью мощных программных средств, в том числе отечественных, например, для решения задач нестационарной газодинамики многокомпонентного газа разными численными методами [2–5].

Модели общей циркуляции представляют собой наиболее сложные климатические модели [1, 6]. В полной версии для изучения парникового эффекта в их состав должны входить модели атмосферы и океана. Кроме того, необходимы модели для описания эволюции морского льда, а также процессов, происходящих на земной поверхности: образование и изменение снежного покрова, изменение влажности почвы и эвапотранспирация. Увеличение числа климатических наблюдений в атмосфере и океане, организация непрерывного мониторинга факторов, вызывающих изменение климата, таких как концентрация парниковых газов, солнечная постоянная, степень прозрачности атмосферы, связанная с извержениями вулканов и другими природными и антропогенными эффектами, очень важны [1]. Для проведения надежных климатических прогнозов требуется мощное компьютерное обеспечение [9].

Описание и численная реализация климатической модели. Климатическая модель Вычислительного центра РАН [6, 10] включает в себя модель ОЦА с параметризацией ряда подсеточных процессов, модель океана и модель эволюции морского льда [7–9, 11]. Взаимодействие между блоками осуществляется в интерактивном режиме.

Модель атмосферы описывает тропосферу ниже уровня изобарической тропопаузы [12]. Основные уравнения имеют следующий вид:

$$\frac{d\boldsymbol{V}}{dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla p - 2\boldsymbol{\Omega}\boldsymbol{V} - g;$$

$$\frac{\partial}{\partial}\frac{\rho}{t} + \nabla(\rho\boldsymbol{V}) = 0;$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho(E + \frac{\boldsymbol{V}^2}{2}) + \nabla\rho\boldsymbol{V}(H + \frac{\boldsymbol{V}^2}{2}) = R;$$

$$\frac{\partial}{\partial}\frac{(\rho q)}{t} + \nabla(\rho q\boldsymbol{V}) = Q;$$

$$E = E(T,\ p,\ \rho,\ q),\ H = H(T,\ p,\ \rho,\ q).$$

Здесь $\boldsymbol{V}$ — скорость течений (ветра); p — давление; ρ — плотность воздуха; Ω — угловая скорость вращения Земли; g — ускорение свободного падения; t — время; q — отношение смеси водяного пара; T — температура; $E = E(T,\ p,\ \rho,\ q)$ — внутренняя энергия; $H = H(T,\ p,\ \rho,\ q)$ — энтальпия; R — скорость тепловыделения; Q — скорость образования влаги в атмосфере.

Система уравнений дополняется соответствующими граничными условиями.

Модель ОЦА — это программы, в комплексе имитирующие многие физические процессы [8, 10, 12]. Можно выделить две основные составляющие: блок динамики модели ОЦА, в котором с помощью конечных разностей вычисляют течения в атмосфере, описываемые примитивными уравнениями [12], и блок физики, в котором вычисляют солнечные и тепловые радиационные потоки, рассматривают адиабатические и конвекционные процессы. Результаты, полученные в блоке физики, используют в блоке динамики для расчетов течений и термодинамических характеристик. В модели использована трехмерная разнесенная разностная сетка для скорости и термодинамических переменных: температуры, давления, отношения смеси водяного пара и т. д. Блок динамики состоит из двух основных компонентов: фактических разностных расчетов и спектральной фильтрации. Фильтрация необходима на каждом временном шаге в областях, близких к полюсам, для обеспечения устойчивости счета по времени, когда фиксированный временной шаг применяется для всей сферической конечно-разностной сетки [8]. Блоки климатической модели подробно описаны в работах [10, 11], здесь приведены только ее основные характеристики.

Система уравнений модели океана рассматривается в геострофическом приближении с фрикционным членом в уравнениях горизонтального импульса [11]. Значения температуры и солености удовлетворяют уравнениям адвекции—диффузии, что позволяет описать термохалинную циркуляцию океана. Учтена также процедура конвективного приспособления.

С помощью динамических уравнений модели эволюции морского льда решают задачи при изучении сплоченности и средней толщины льда. Рост и таяние льда в модели зависят только от разности между тепловым потоком от атмосферы к морскому льду и потоком теплоты из льда в океан. С помощью диагностического уравнения моделируют зависимости для вычисления температуры поверхности льда.

Блоки модели связаны между собой обменом импульсом, теплоты и воды. Обмен импульсом состоит в использовании скорости верхнего слоя океана для адвекции морского льда. Всеми остальными обменами при расчете обменом импульсом пренебрегается.

Тепловые потоки между смежными блоками могут быть изменены фазовыми переходами на границах (испарение, таяние и т. д.). Континентальный водный сток добавляется к океаническим ячейкам на каждом временном шаге.

Поток пресной воды в атмосферу определяется с учетом испарения с поверхности земли и сублимации морского льда. Предполагается, что осадки попадают непосредственно в океан. Наличие льда не

учитывается, а вода удаляется из океана при испарении или из льда в процессе сублимации.

Модель океана использует равномерную по долготе и синусу широты разностную сетку размером 72×72 ячеек. Разрешение модели по долготе составляет 5°, по широте она изменяется примерно от 1,5° на экваторе до 10° на полюсах. Глубина океана представлена в логарифмическом масштабе в виде восьми уровней до 5000 м.

Численные прогнозные эксперименты и задача стабилизации климата. Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК) в качестве межправительственного органа, учрежденного совместно в 1988 г. Всемирной метеорологической организацией и Программой ООН по окружающей среде, публикует достаточно авторитетные и объективные научно-технические оценки эволюции климата и связанных процессов.

Для Пятого оценочного доклада МГЭИК [1] научное сообщество определило набор из четырех новых сценариев эмиссии парниковых газов, именуемых репрезентативными траекториями концентраций (РТК):

- один сценарий сокращения выбросов, который предполагает весьма низкий уровень воздействия (РТК 2.6);
- два сценария стабилизации (РТК 4.5 и РТК 6.0);
- один сценарий с весьма высокими уровнями выбросов парниковых газов (РТК 8.5).

Таким образом, РТК могут отражать результаты целого ряда направлений экономических мер в области климата в XXI в. Согласно РТК 6.0 и РТК 8.5, радиационное воздействие на атмосферу будет расти вплоть до 2100 г.; в РТК 2.6 оно достигает максимума и затем снижается; в РТК 4.5 оно стабилизируется к 2100 г.

В рамках описанной здесь глобальной модели на первом этапе расчеты прогноза климата до 2100 г. были выполнены с использованием сценариев роста РТК 8.5 (жесткий экспоненциальный рост) и РТК 4.5 (мягкий рост, приближающийся к насыщению) [13].

Результаты показали увеличение температуры атмосферы у поверхности на 2,2 и 1,3 °С соответственно (рис. 1). Повышение температуры над континентами на средних и высоких широтах северного полушария достигает 5 °С.

Наблюдаемые изменения климата привели к более серьезному рассмотрению возможной роли геоинженерии в качестве потенциального средства предотвращения «чрезвычайной ситуации в климате» [14], такой как быстрое таяние ледниковых щитов в Гренландии и Антарктике, или в качестве промежуточной меры, чтобы иметь дополнительное время для принятия эффективных мер по смягчению последствий выбросов. Общая цель предложений по геоинженерии климата заклю-

чается во вмешательстве в климатическую систему путем искусственного изменения энергетического баланса Земли для снижения потенциального повышения температуры и в конечном итоге для стабилизации температуры на уровнях ниже, чем прогнозируется.

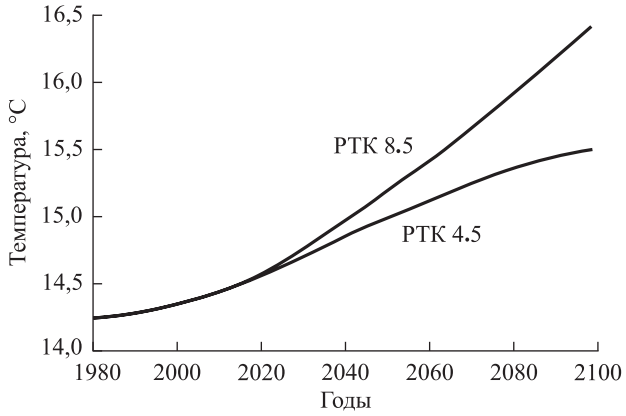


Рис. 1. Прогноз изменения температуры атмосферы при реализации сценариев РТК 8.5 и РТК 4.5

Наиболее широко обсуждаемым вариантом геоинженерии климата является повышение планетарного альбедо (поверхностной отражательной способности солнечного излучения) с использованием стратосферных сульфатных аэрозолей [15]. Истоки этого подхода лежат в предложении М.И. Будыко в 1974 г. [16]. В работе [17] сделан вывод о том, что количество выбросов серы, необходимое для компенсации прогнозируемого потепления к 2050 г., будет составлять от 5 до 16 Тг в год, увеличиваясь до 10–30 Тг в год к концу века.

Для оценки возможности стабилизации климата на уровне 2010 г. путем управляемых выбросов в стратосферу сульфатных аэрозолей, отражающих часть поступающего солнечного излучения, в рамках описанной модели были проведены серии расчетов [6, 13].

Влияние аэрозоля на климат учитывалось множителем в уравнении для температуры атмосферы, который эффективно учитывает уменьшение солнечной радиации путем введения альбедо аэрозольного слоя. Вычисления выбросов аэрозоля для стабилизации климата были выполнены для сценариев РТК 8.5 и РТК 4.5 изменения концентрации CO_2 с 1980 по 2100 г. Оценка выбросов аэрозолей 10,0 Тг в год была получена для 2100 г., что хорошо согласуется с диапазоном от 0,4 до 20 Тг в год, приведенным в [15–17]. Для мягкого сценария роста объема выбросов CO_2 РТК 4.5 получена оценка выбросов 5,0 Тг в год, что также соответствует указанному выше диапазону (рис. 2).

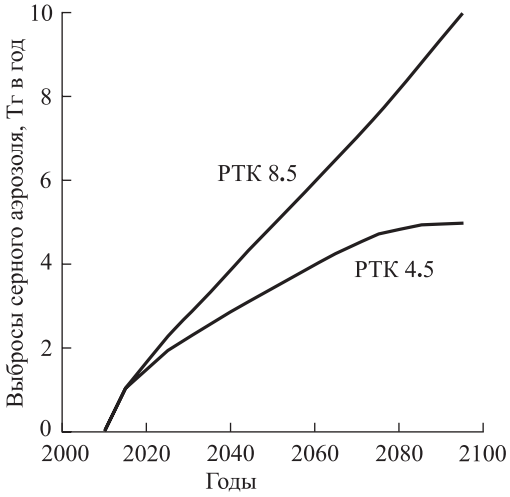


Рис. 2. Годовые выбросы серного аэрозоля для стабилизации климата

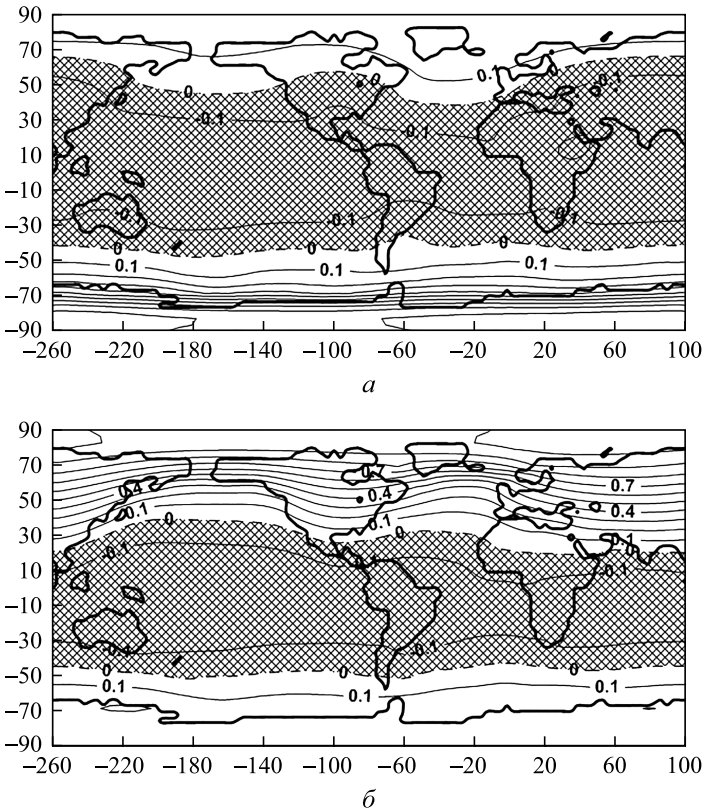


Рис. 3. Отклонение температуры атмосферы стабилизированного климата (2100 г.) от современного (сценарий РТК 8.5):
а — июль; *б* — январь

Концентрацию аэрозолей с 2010 по 2100 г. рассчитывают как параметр [13], управляющий стабилизацией температуры приземного воздуха на уровне 2010 г. Было показано, что таким образом невозможно достичь пространственного и сезонного равномерного приближения к существующему климату, но можно значительно снизить парниковый эффект. Выбросы аэрозолей в атмосферу приведут к изменениям температуры и соответственно к изменению климата по сравнению с климатом 2010 г. (рис. 3).

Расчеты в предположении об однородном пространственном распределении аэрозолей показывают возможность стабилизации средней глобальной температуры атмосферы, но климат будет холоднее на 0,1–0,2 градуса в низких и средних широтах, а в высоких широтах — теплее на 0,2–1,2 градуса.

Моделирование распределения стратосферного аэрозоля при наличии конечного числа источников. Для оценки возможности получения заданного (например, однородного) распределения аэрозолей в верхних слоях тропосферы были проведены численные эксперименты по описанной климатической модели, дополненной уравнениями, описывающими транспорт и эволюцию аэрозолей:

$$\frac{\partial}{\partial}\frac{(\rho s)}{t}+\nabla(\rho s\boldsymbol{V})=S,$$

где s — концентрация примеси в атмосфере; S — источник примеси в данной точке.

Источник суммарно определяется выбросами аэрозолей в данной точке, процессами гравитационного осаждения, вымывания с осадками и химических превращений.

Многочисленные расчеты были сделаны с учетом разных мощностей выбросов аэрозолей, количества и положения источников. Число эмиссионных зон варьировалось от 3 до 8. Расчеты показали, что устойчивое горизонтальное распределение количества аэрозолей достигается только с постоянными выбросами аэрозолей в определенных регионах. Они задаются фиксированной во времени концентрацией в этих регионах, что моделирует непрерывную подкачку аэрозолей в стратосферу.

Расчеты показывают (рис. 4), что глобальное распределение аэрозолей в стационарном состоянии достигается в течение примерно четырех месяцев. Если выбросы прекращаются через три года, количество аэрозолей падает практически до нуля примерно через два года (1,7 года), что согласуется с данными вулканического происхождения.

Постоянные выбросы в пяти регионах обеспечивают достаточно равномерное зональное распределение аэрозолей. Однако меридиональное распределение демонстрирует сильную зависимость от ши-

роты. Минимальная концентрация аэрозолей наблюдается в экваториальной области, а максимальная — в области полюсов (см. рис. 4), что объясняется особенностями циркуляции атмосферы.

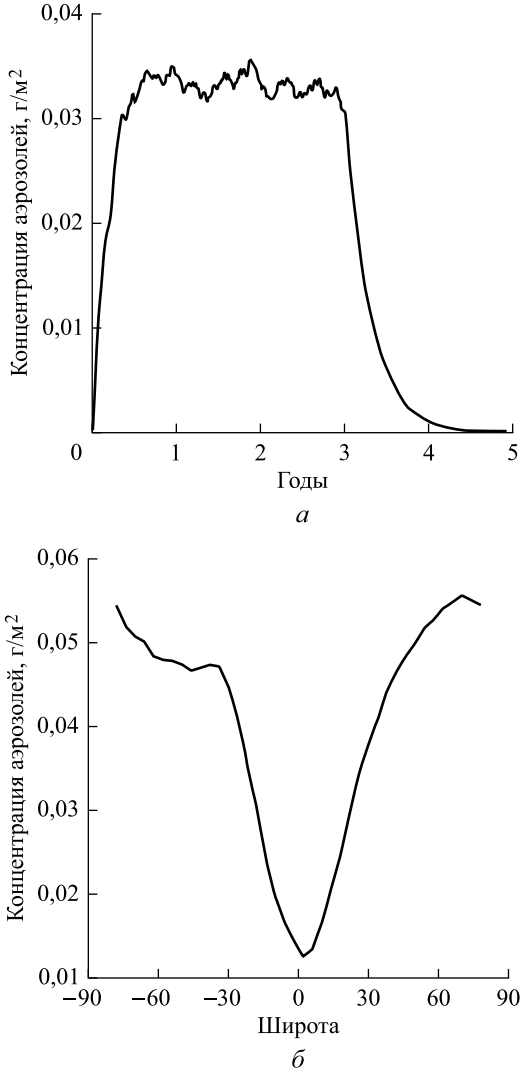


Рис. 4. Зависимость глобального распределения аэрозолей от времени (*а*) и меридиональное распределение аэрозолей (*б*)

Поле распределения аэрозолей через один месяц от начала выбросов в пяти фиксированных географических регионах, обозначенных на карте черными крестиками, показано на рис. 5 (более темные области соответствуют более высокой концентрации). Предполагается постоянная концентрация аэрозолей в этих регионах. Расчеты соответствуют июлю месяцу. Отметим более широкое распространение

аэрозолей в южном полушарии зимой, что связано с более интенсивными зональными ветрами по сравнению с северным полушарием в это время года.

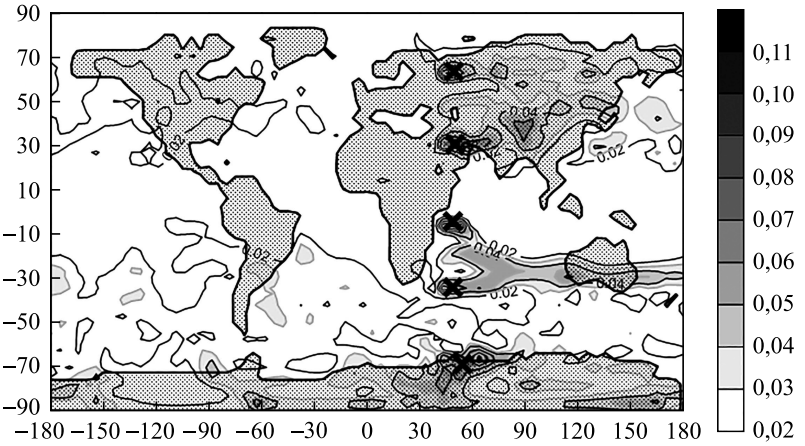


Рис. 5. Поле распределения аэрозолей через один месяц от начала выбросов

Поле распределения аэрозолей через три года с момента начала эмиссии для той же конфигурации источников показано на рис. 6. Расчеты показывают достижение устойчивого состояния распределения аэрозолей (см. рис. 4). Сохранение постоянных выбросов в фиксированных регионах является обязательным. Несмотря на наличие источника аэрозоля, его концентрация (0,2 г/м^2) в экваториальной области ниже, чем на территориях со средними и высокими широтами (0,4 г/м^2 и более). Аналогичные результаты дают расчеты с разным количеством источников (от 3 до 8).

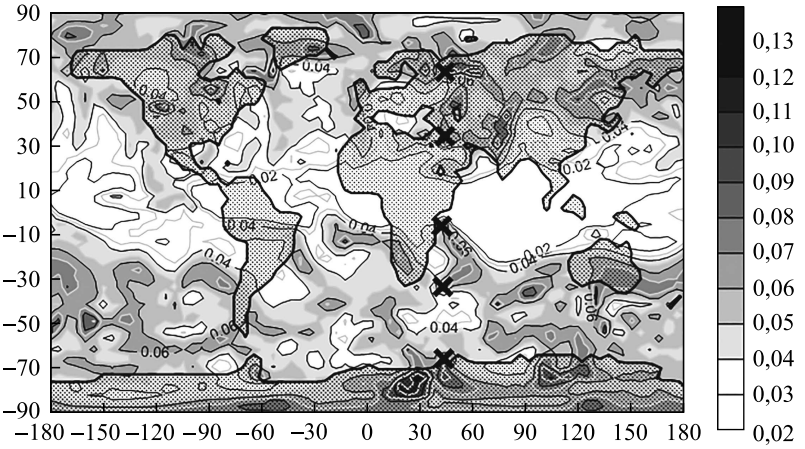


Рис. 6. Поле распределения аэрозоля через три года с момента начала эмиссии

Заключение. Для расчета последствий применения методов геоинженерии была использована глобальная климатическая трехмерная гидродинамическая модель, включающая в себя модель океана с реальными глубинами и континентами, модель эволюции морского льда и модель общей циркуляции атмосферы. Ряд сценариев выбросов, описанных в статье, продемонстрировал снижение средней глобальной температуры атмосферы у подстилающей поверхности.

Рассматривается эволюция сульфатного аэрозоля в разных условиях инжекции для анализа влияния на климат. Концентрацию аэрозолей с 2010 по 2100 г. вычисляют как управляющий параметр для стабилизации среднегодовой температуры приземного воздуха.

Исследована возможность получения предписанного пространственного и временного глобального распределения стратосферных аэрозолей в условиях, когда существует ограниченное количество источников аэрозолей. Приняты во внимание перенос ветра и осаждение аэрозолей. Показана невозможность достижения достаточно однородного распределения аэрозолей при условии небольшого конечного числа фиксированных источников.

Стратегии снижения концентрации CO_2 в атмосфере относительно долговременные (от десятилетий до столетий) и дорогостоящие. Изменение альбедо может происходить очень быстро и при стоимости, которая составляет 1 % или менее от стоимости мероприятий по снижению уровня CO_2 в атмосфере.

Работа выполнена при поддержке Проектов РФФИ № 16-01-0466, № 17-01-00693.

ЛИТЕРАТУРА

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

[2] Dimitrienko Yu.I., Koryakov M.N., Zakharov A.A. Computational Modeling of Conjugated Aerodynamic and Thermomechanical Processes in Composite Structures of High-speed Aircraft. *Applied Mathematical Sciences*, 2015, vol. 9, no. 98, pp. 4873–4880. http://dx.doi.org/10.12988/ams.2015.55405

[3] Димитриенко Ю.И., Коряков М.Н., Захаров А.А. Применение метода RKDG для численного решения трехмерных уравнений газовой динамики на неструктурированных сетках. *Математическое моделирование и численные методы*, 2015, № 4, с. 75–91.

[4] Dimitrienko Yu.I., Koryakov M.N., Zakharov A.A. Application of Finite Difference TVD Methods in Hypersonic Aerodynamics. *Finite Difference Methods, Theory and Applications. Lecture Notes in Computer Science*, 2015, vol. 9045, pp. 161–168. DOI 10.1007/978-3-319-20239-6_15

[5] Димитриенко Ю.И., Захаров А.А., Коряков М.Н., Сыздыков Е.К. Моделирование сопряженных процессов аэрогазодинамики и теплообмена на по-

верхности теплозащиты перспективных гиперзвуковых летательных аппаратов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2014, № 3, с. 23–34.

[6] Пархоменко В.П. Применение глобальных климатических моделей для исследования климата Земли. *Труды Института системного анализа Российской академии наук*, 2018, т. 68, вып. 2, с. 38–41.

[7] Пархоменко В.П. Применение квазислучайного подхода и ансамблевых вычислений для определения оптимальных наборов значений параметров климатической модели. *Информатика и ее применения*, 2017, т. 11, вып. 2, с. 65–74.

[8] Parkhomenko V.P., Lang T.V. Improved computing performance and load balancing of atmospheric general circulation model. *Journal of Computer Science and Cybernetics*, 2013, vol. 29, no. 2, pp. 138–148.

[9] Пархоменко В.П. Алгоритм увеличения вычислительной производительности и баланса загрузки процессоров для моделирования общей циркуляции атмосферы. *Математическое моделирование и численные методы*, 2016, № 3, с. 115–126.

[10] Пархоменко В.П. Организация совместных расчетов по модели общей циркуляции атмосферы и модели океана. *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2015, № 4, с. 41–57.

[11] Пархоменко В.П. Глобальная модель климата с описанием термохалинной циркуляции Мирового океана. *Математическое моделирование и численные методы*, 2015, № 1, с. 94–108.

[12] Белов П.Н., Борисенков Е.П., Панин Б.Д. *Численные методы прогноза погоды*. Ленинград, Гидрометеоиздат, 1989, 375 с.

[13] Пархоменко В.П. Анализ оптимальной по Парето эффективности предотвращения глобального потепления методами геоинженерии. *Компьютерные исследования и моделирование*, 2015, т. 7, № 5, с. 1097–1109.

[14] Caldeira K., Keith D. The Need for Climate Engineering Research. *Issues in Science and Technology Studies*, 2010, vol. 27, no. 1, pp. 52–57.

[15] Lin A.C. Balancing the Risks: Managing Technology and Dangerous Climate Change. *Issues In Legal Scholarship*, 2009, vol. 8, no. 3, art. 2.

[16] Budyko M.I. *Climate changes*. Washington D.C., American Geophysical Union, 1977, 244 p.

[17] Eliseev A.V., Mokhov I.I., Karpenko A.A. Global warming mitigation by means of controlled aerosol emissions of sulphate aerosols into the stratosphere: global and regional peculiarities of temperature response as estimated in IAP RAS CM simulations. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2009, no. 22, pp. 388–395.

Статья поступила в редакцию 11.05.2018

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Пархоменко В.П. Моделирование пространственного и временного глобального распределения стратосферного аэрозоля искусственного происхождения для стабилизации климата. *Математическое моделирование и численные методы*, 2018, № 4, с. 107–119.

Пархоменко Валерий Павлович — канд. физ.-мат. наук, заведующий сектором моделирования климатических и биосферных процессов Вычислительного центра им. А.А. Дородницына РАН Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» РАН, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 120 науч-

ных публикаций. Область научных интересов: нестационарная газовая динамика, численные методы динамики сплошных сред, математическое моделирование климата. e-mail: vparhom@yandex.ru

Modeling the spatial and temporal global distribution of artificial stratospheric aerosol for climate stabilization

© V.P. Parkhomenko[1,2]

[1]Institution of Russian Academy of Sciences Dorodnicyn Computing Centre of RAS, Moscow, 119333, Russia
[2]Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The purpose of the study was to estimate the possibility of climate stabilization at the present level by controlled sulfate aerosols emissions into the stratosphere, which reflect part of the incoming solar radiation, i.e. geoengineering. The study is based on a three-dimensional hydrodynamic model of the global climate, including an ocean model with a real configuration of depths and continents, as well as a model of sea ice evolution, and a model of general atmospheric circulation. We studied the possibility of obtaining the predetermined spatial and temporal global distribution of the stratospheric aerosol under conditions when there is a limited number of aerosol sources. Wind transport and aerosol deposition were taken into account.

Keywords: *global climate modeling, climate warming, aerosol emissions*

REFERENCES

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

[2] Dimitrienko Yu.I., Koryakov M.N., Zakharov A.A. Computational Modeling of Conjugated Aerodynamic and Thermomechanical Processes in Composite Structures of High-speed Aircraft. *Applied Mathematical Sciences*, 2015, vol. 9, no. 98, pp. 4873–4880. http://dx.doi.org/10.12988/ams.2015.55405

[3] Dimitrienko Yu.I., Koryakov M.N., Zakharov A.A. *Matematicheskoe modelirovanie i chislennye metody — Mathematical Modeling and Computational Methods*, 2015, no. 4, pp. 75–91.

[4] Dimitrienko Yu.I., Koryakov M.N., Zakharov A.A. *Finite Difference Methods, Theory and Applications. Lecture Notes in Computer Science*, 2015, vol. 9045, pp. 161–168. DOI 10.1007/978-3-319-20239-6_15

[5] Dimitrienko Yu.I., Zakharov A.A., Koryakov M.N., Syzdykov E.K. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie — Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2014, no. 3, pp. 23–34.

[6] Parkhomenko V.P. *Trudy Instituta sistemnogo analiza Rossiyskoy akademii nauk (Proceedings of the Institute for Systems Analysis of the Russian Academy of Science),* 2018, vol. 68, no. 2, pp. 38–41.

[7] Parkhomenko V.P. *Informatika i ee primeneniya – Informatics and Applications*, 2017, vol. 11, no. 2, pp. 65–74.

[8] Parkhomenko V.P., Lang T.V. Improved computing performance and load balancing of atmospheric general circulation model. *Journal of Computer Science and Cybernetics*, 2013, vol. 29, no. 2, pp. 138–148.

[9] Parkhomenko V.P. *Matematicheskoe modelirovanie i chislennye metody — Mathematical Modeling and Computational Methods*, 2016, no. 3, pp. 115–126.

[10] Parkhomenko V.P. *Nauka i obrazovanie – Science & education*, 2015, no. 4, pp. 41–57.

[11] Parkhomenko V.P. *Matematicheskoe modelirovanie i chislennye metody — Mathematical Modeling and Computational Methods*, 2015, no. 1, pp. 94–108.

[12] Belov P.N., Borisenkov E.P., Panin B.D. *Chislennye metody prognoza pogody* [Numerical methods of weather forecast]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1989, 375 p.

[13] Parkhomenko V.P. *Kompyuternye issledovaniya i modelirovanie — Computer Research and Modeling*, 2015, vol. 7, no. 5, pp. 1097–1109.

[14] Caldeira K., Keith D. The Need for Climate Engineering Research. *Issues in Science and Technology Studies*, 2010, vol. 27, no. 1, pp. 52–57.

[15] Lin A.C. Balancing the Risks: Managing Technology and Dangerous Climate Change. *Issues In Legal Scholarship*, 2009, vol. 8, no. 3, art. 2.

[16] Budyko M.I. *Climate changes*. Washington D.C., American Geophysical Union, 1977, 244 p.

[17] Eliseev A.V., Mokhov I.I., Karpenko A.A. Global warming mitigation by means of controlled aerosol emissions of sulphate aerosols into the stratosphere: global and regional peculiarities of temperature response as estimated in IAP RAS CM simulations. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2009, no. 22, pp. 388–395.

Parkhomenko V.P., Cand. Sc. (Phys.-Math.), Head of Division for Modeling of Climatic and Biosphere Processes, Institution of Russian Academy of Sciences Dorodnicyn Computing Centre of RAS, Assoc. Professor, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 120 research publications. Research interests: nonstationary gas dynamics, numerical methods for continuous media dynamics, mathematical modeling of climate. e-mail: vparhom@yandex.ru