

# Применение глобальных климатических моделей для исследования климата Земли\*

В.П. ПАРХОМЕНКО<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Вычислительный центр им. А.А. Дородницына Федерального государственного учреждения Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, г. Москва, Россия

<sup>2</sup> Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

**Аннотация.** Представлен и обсуждается комплекс моделей глобального климата, в том числе модель общей циркуляции атмосферы, гидротермодинамическая модель океана, модель эволюции морского льда. Комплекс моделей ВЦ РАН активно используется для расчетов климатических процессов на Земле. Проведены расчеты по воспроизведению современного климата, многочисленные эксперименты по оценке антропогенных и естественных изменений климата.

**Ключевые слова:** моделирование климата, численные эксперименты.

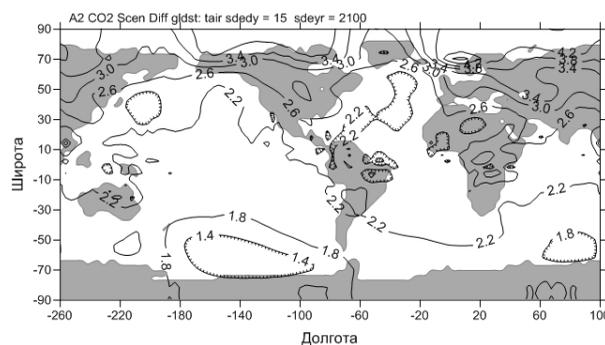
**DOI:** 10.14357/20790279180209

К настоящему времени в ВЦ РАН ФИЦ ИУ РАН разработана система математических моделей биосферных процессов, включающая ряд моделей глобального климата и модель продукционного процесса наземной растительности.

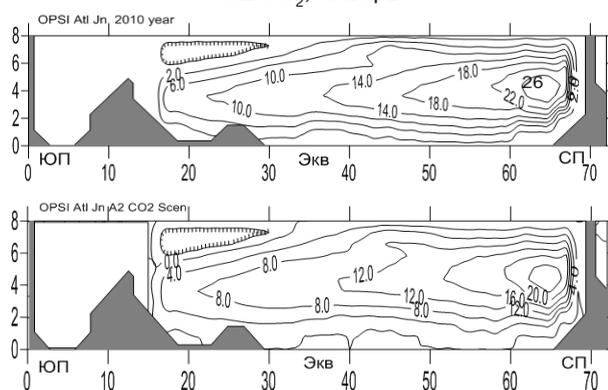
Для повышения эффективности расчетов реализованы варианты параллельного алгоритма для различных способов разбиения расчетной области с оптимальными коммуникационными процедурами обмена данными между процессорами в параллельном варианте гидродинамической трехмерной модели климата. Проведен анализ существенных факторов, влияющих на выполнение параллельной реализации модели на многопроцессорной ЭВМ кластерного типа, в частности, обсуждаются варианты модификации первоначального параллельного кода модели, направленные на улучшение его вычислительной эффективности и баланса загрузки процессоров. Разработан метод распараллеливания с одновременным расчетом вклада физических и динамических процессов соответственно на двух группах процессоров с одинаковыми входными данными [1].

С применением гидродинамической трехмерной модели климата проведены численные эксперименты по прогнозированию изменения климата в XXI веке при увеличении концентрации углекислого газа в атмосфере, вызванного антропогенными факторами. Для сценария роста концентрации углекислого газа, предложенного Межправительственной группой экспертов по изменению

климата (МГЭИК), средне глобальная температура атмосферы к 2100 году вырастет на 2.7 °С, влажность атмосферы – на 11.5 %, уменьшение толщины морского льда – на 25%. Повышение приземной температуры атмосферы больше над материками, в средних и высоких широтах, дости-



**Рис. 1.** Изменения температуры воздуха, сценарий A2 CO<sub>2</sub>, Январь



**Рис. 2.** Средний меридиональный поток воды в Атлантическом океане

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ гранты № 17-01-00693, №16-01-0466.

гая величины  $5.2^{\circ}\text{C}$  в северных областях Евразии (рис. 1). В южном полушарии потепление не превышает  $2^{\circ}\text{C}$ .

К концу века согласно расчетам прогнозируется существенное уменьшение мощности меридионального потока воды в Атлантическом океане при реализации рассматриваемого сценария роста концентрации  $\text{CO}_2$ . На рис.2 показана вертикальная структура среднего меридионального потока в Атлантическом океане для современного климата (верхний рисунок) и прогноз для 2100 года при реализации сценария роста  $\text{CO}_2$  (нижний рисунок). Выявлено значительное уменьшение потока максимально на 27%, что означает уменьшение потока теплых масс воды из зоны экватора в северные области Атлантики.

Изменение климата привлекает все более серьезное внимание [2] к роли геоинженерии, как потенциального средства для предотвращения «чрезвычайных климатических ситуаций», таких как быстрое таяние ледового покрова Гренландии и Антарктики, или в качестве временной меры, чтобы выиграть время для эффективного выбора методов по смягчению последствий потепления. Наиболее широко обсуждаемым вариантом геоинженерии климата является повышение планетарного альбедо с помощью выбросов стратосферных сульфатных аэрозолей. В основе этого подхода было предложение М.И. Будыко в 1974 году.

По этой модели на первом этапе проведены расчеты прогнозирования климата до 2100 года с использованием сценариев роста  $\text{CO}_2$  под названием РТК8.5 (концентрация 860 ppm в 2100 г.) и РТК4.5 (концентрация 560 ppm в 2100 г.), предложенных МГЭИК и отличающихся прогнозами развития мировой энергетики. Они дают увеличение среднегодовой глобальной поверхностной температуры атмосферы на  $2.2^{\circ}\text{C}$  для РТК8.5 и  $1.3^{\circ}\text{C}$  для РТК4.5 [2]. Далее для этих сценариев проведены серии расчетов для оценки возможности стабилизации климата на уровне 2010 года путем управления выбросами в стратосферу аэрозоля, отражающе-часть приходящего солнечного излучения.

Предполагается, что оптическая толщина рассеяния стратосферных аэрозолей в модели линейно зависит от их коэффициента экстинкции и массы аэрозоля на единицу площади. В свою очередь мгновенное радиационное воздействие в верхней части атмосферы пропорционально оптической толщине с коэффициентом, основанном на измерениях, выполненных после извержения вулкана Пинатубо в 1991 г.

В численных экспериментах глобальная масса стратосферных аэрозолей моделируется через

баланс выбросов серы в стратосферу и выпадения за год. Время пребывания в стратосфере сульфатов варьируется от 2 до 3 лет. Основываясь на быстром перемешивании облаков вулканического аэрозоля в зональном направлении, распределение стратосферных сульфатов предполагается однородным. Концентрация аэрозоля от 2010 до 2100 года рассчитывается как управляющий параметр для стабилизации среднегодовой температуры воздуха у поверхности земли.

Вычислены изменения концентрации аэрозоля во времени с 2010 до 2100 года, позволяющие стабилизировать средне годовую температуру приземного слоя атмосферы. Установлено, что таким путем нельзя добиться равномерной близости климата к современному, хотя можно значительно ослабить эффект парникового потепления климата. При условии однородного по пространству распределения стратосферного аэрозоля можно стабилизировать среднюю глобальную температуру атмосферы, но при этом в средних и низких широтах климат будет холоднее на  $0.1 - 0.2^{\circ}\text{C}$ , а в высоких широтах – теплее на  $0.2 - 1.2^{\circ}\text{C}$  [2]. Кроме того, эти отличия имеют сильно выраженный сезонный ход – в зимний период они увеличиваются. Ситуацию несколько улучшает постановка задачи, при которой допускается широтная зависимость концентрации аэрозоля.

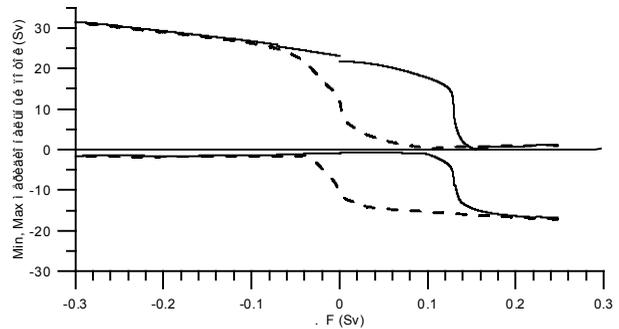
Граница Парето, определяющая диапазон оптимальных масс аэрозоля в стратосфере, исследована и визуализирована для двух параметров – СКО атмосферной температуры для зимнего и летнего сезонов. Из анализа следует [2], что Парето оптимальное количество выбросов серы должно быть между 19.2 и 21.9 Тг серы в год (сценарий РТК8.5) для Северного полушария в 2100 году. Аналогичные расчеты для Южного полушария дали следующий лучший диапазон значений: 19.2 -19.9 Тг серы в год и, соответственно, для всего земного шара: 19.9 – 20.9 Тг серы в год.

Таким образом, согласованное оптимальное количество серы в стратосфере в 2100 году будет около 19.9 Тг для РТК8.5 и 10.01 Тг для РТК4.5. При этом средняя влажность уменьшится на 8.2%, толщина морского льда – на 4.1%, выбросы серы составят 9.97 ТгS/год для РТК8.5. Упомянутые величины для РТК4.5: 4.5%, 2.0% и 4.98 ТгS/год, соответственно. Если геоинженерные выбросы аэрозоля останавливаются после нескольких десятилетий их осуществления, то их климатический эффект исчезает в течение нескольких десятилетий. В этот период приземная температура воздуха мо-

жет расти со скоростью несколько градусов за десятилетие.

Что ждет биосферу? Если сложная система теряет стабильность, то начинается необратимый процесс перехода в новое квазистабильное состояние. Эту проблему обсуждал Н.Н.Моисеев в [3]. По отношению к климатической системе это утверждение подтверждают результаты численных расчетов по определению возможного гистерезиса блокировки Атлантической термохалинной циркуляции, при котором поток пресной воды в Атлантику, в диапазоне 50-70°с.ш. постепенно растет, а затем уменьшается с заданной медленной скоростью 0,05 Св за 1000 лет. Поток пресной воды из Атлантики в Тихий океан фиксирован на уровне 75% его значения по умолчанию. Это определяет как раз бистабильный режим циркуляции, но вблизи состояния моностабильного режима развитой термохалинной циркуляции. На рис. 3 две верхние кривые показывают гистерезис максимума среднего меридионального потока в Атлантическом океане (характеристика термохалинной циркуляции). Две нижние – тоже самое для минимума потока. Сплошные ветви кривых соответствуют увеличению потока пресной воды (ось абсцисс), а пунктирные – его уменьшению. Результаты численных экспериментов показывают наличие гистерезиса этой циркуляции, подтверждая также существование точки бифуркации. Практически полное прекращение термохалинной циркуляции наступает, когда поток пресной воды достигает величины примерно 0.12 Св и далее сохраняется. При обратном уменьшении потока, термохалинная циркуляция не включается, пока он не достигнет значения примерно -0.02 Св. Полное время счета составляет около 24 тыс. лет.

**Пархоменко Валерий Павлович.** Вычислительный центр им. А.А. Дородницына ФИЦ ИУ РАН, г. Москва, Россия. Ведущий научный сотрудник. Кандидат физико-математических наук. Количество печатных работ: 132. Область научных интересов: моделирование климата, численные методы. E-mail: parhom@ccas.ru



**Рис. 3.** Зависимость среднего меридионального потока в Атлантическом океане от потока пресной воды

Таким образом, в диапазоне двух пороговых значений потока пресной воды присутствует возможность существования двух различных состояний климатической системы – с развитой термохалинной циркуляцией и подавленной, что влияет и на температурный режим атмосферы.

## Литература

1. *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.
2. *Пархоменко В.П.* Анализ оптимальной по Парето эффективности предотвращения глобального потепления методами геоинженерии // Компьютерные исследования и моделирование. 2015, Т. 7, № 5. С. 1097 – 1109.
3. *Моисеев Н.Н.* Современный рационализм. М.: Изд-во МГВЦ КОКС, 1995. 376 с.

## The application of global climate models for the Earth climate study

*V.P. Parkhomenko*<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Computing Center A.A. Dorodnitsyn Federal Research Center “Computer Science and Control” of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

**Abstract.** A set of global climate models, including a general atmospheric circulation model, a hydrothermodynamic ocean model, and a sea-ice evolution model are presented and discussed. A complex of models of the Computing Center of the Russian Academy of Sciences is actively used for calculating climatic processes on the Earth. Calculations have been made to reproduce the modern climate, numerous experiments to assess the anthropogenic and natural climate changes.

**Keywords:** *climate modeling, numerical experiments.*

**DOI:** 10.14357/20790279180209

### References

1. *Parkhomenko V.P.* 2016, Algorithm for computing performance increasing and processors load balancing for modeling the atmosphere general circulation. *Matematicheskoye modelirovaniye i chislennyye metody* [Mathematical modeling and numerical methods], 3: 115–126.
2. *Parkhomenko V.P.* 2015, Analysis of the Pareto optimal efficiency of preventing global warming by geoengineering methods. *Komp'yuternyye issledovaniya i modelirovaniye*. [Computer studies and modeling], 7(5): 1097 – 1109.
3. *Moiseyev N.N.* 1995. *Sovremennyy ratsionalizm* [Modern rationalism]. Moscow: MGVP KOKS Pubs. 376 p.

**Parkhomenko V.P.** PhD, Computing Center A.A. Dorodnitsyn Federal Research Center “Computer Science and Control” of Russian Academy of Sciences, 119333, 44/2 Vavilova str., Moscow, Russia, E-mail: parhom@ccas.ru