

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.141>

ОПЫТ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЛОБАЛЬНОГО И РЕГИОНАЛЬНОГО КЛИМАТА

Научная статья

Пархоменко В.П.^{1,*}

¹ ORCID : 0000-0002-9963-0496;

¹ Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской Академии Наук, Москва, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (vparhom[at]yandex.ru)

Аннотация

Рассматривается опыт постановки численных экспериментов с совместными климатическими моделями общей циркуляции атмосферы и океана. Предусмотрена возможность проведения статистического анализа физических полей, полученных в результате моделирования. Сравнение этих результатов с данными наблюдений и модельными расчетами на различных моделях. Исследовано влияние загрязнения поверхности Тихого океана на тихоокеанскую термохалинную циркуляцию и региональный климат. Существует возможность получения прогнозов глобальной и региональной динамики биосферных процессов на основе математических моделей биогеохимических циклов, а также получение прогнозов глобального потепления, основанных на различных сценариях антропогенно-техногенной деятельности, включая ограничения Парижских соглашений, различные варианты ограниченной реализации соглашений, особенно при росте производства энергии и увеличении выбросов углекислого газа в атмосферу.

Ключевые слова: нестационарная глобальная трехмерная модель климата, численные эксперименты.

EXPERIENCE IN GLOBAL AND REGIONAL CLIMATE MODELLING

Research article

Parkhomenko V.P.^{1,*}

¹ ORCID : 0000-0002-9963-0496;

¹ Federal Research Center "Informatics and Management" of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

* Corresponding author (vparhom[at]yandex.ru)

Abstract

The experience of conducting numerical experiments with coupled climatic models of atmospheric and oceanic general circulation is examined. The possibility of statistical analysis of the physical fields obtained as a result of modelling is provided. Comparison of these results with observational data and model calculations on different models. The influence of the Pacific Ocean surface pollution on the Pacific thermohaline circulation and regional climate is studied. There is a possibility of obtaining forecasts of global and regional dynamics of biosphere processes based on mathematical models of biogeochemical cycles, as well as obtaining forecasts of global warming based on various scenarios of anthropogenic and technogenic activities, including the limitations of the Paris Agreements, various options for limited implementation of the agreements, especially with the growth of energy production and increasing carbon dioxide emissions into the atmosphere.

Keywords: non-stationary global three-dimensional climate model, numerical experiments.

Введение

Климатическая система Земли характеризуется сложным взаимодействием, обратной и прямой связью ее элементов [1]. Модели общей циркуляции атмосферы и океана являются одними из наиболее мощных инструментов изучения климатической системы и ее изменчивости.

Моделирование климатических и биосферных процессов проводится на основе математического моделирования процессов в окружающей среде, применения методов исследования систем дифференциальных уравнений, а также численных методов их решения и использования современных компьютерных и информационных технологий [2], [3]. Это направление развивается достаточно активно. В ведущих научных центрах разрабатываются и поддерживаются сложные и детальные глобальные климатические и биотические модели. Для этой работы используются самые мощные компьютеры в сочетании с персональными.

Численное моделирование, выполняемое с использованием таких моделей, требует значительных вычислительных затрат. Это связано с тем, что на каждом временном шаге необходимо определять огромное количество трехмерных физических полей в качестве решения систем нелинейных уравнений в частных производных, а также с тем, что для получения статистически значимых численных результатов требуется очень длительный период моделирования. Многопроцессорные компьютеры являются естественными инструментами моделирования климата. Параллельное выполнение вариантов модели климата показало, что эффективность параллельного кода на большом количестве процессоров снижается. Другими словами, программа «плохо масштабируется» с увеличением количества процессоров. Одной из целей работы является анализ компонентов алгоритма моделей и их параллельной производительности в зависимости от эффективности вычислений, нахождение узких мест, которые мешают эффективности параллельного алгоритма, и использование лучших алгоритмов и более эффективной параллельной стратегии выполнения, для увеличения скорости работы моделей на параллельных вычислительных системах [4], [5].

Современные глобальные климатические и биосферные модели также требуют чрезвычайно больших вычислительных мощностей и для адекватного описания соответствующих процессов с учетом роста числа блоков, представляющих элементы климатической системы, уменьшения размеров расчетной сетки, больших интервалов интегрирования уравнений. Предложенные методы совместного моделирования климата и биосферы способствуют новому пониманию сложных процессов, как глобальных, так и региональных [6].

Моделирование климата и прогнозирование климата на основе математического моделирования является важным вопросом [7]. Современный период в этой области характеризуется развитием математических основ моделирования, а именно переходом от моделей океана и атмосферы к моделям общей циркуляции, а также развитием вычислительных методов, основанных на алгоритмах параллельного программирования. Сложность численных экспериментов в совместной модели определяется во многом необходимостью их проведения на длительные периоды времени и с различными начальными условиями, что требует значительных вычислительных затрат и времени счета.

В методике моделирования глобального и регионального климата реализуется следующий план исследований:

- разработка совместной глобальной модели термохалинной циркуляции океана и модели общей циркуляции атмосферы;
- сбор и подготовка данных для численного моделирования для воспроизведения чувствительности климата с помощью модели глобального климата;
- планирование вычислительных экспериментов, исследования моделей для получения прогнозов процессов глобальной динамики, в том числе глобального потепления, на основе различных сценариев антропогенно-техногенной деятельности, в том числе Парижского соглашения и различных вариантов его неполной реализации, а также реализации новых сценариев;
- подготовка оценок стабильности биосферы и климата на основе возможных различных сценариев;
- исследование влияния загрязнения океана на климат и биосферные процессы;
- разработка и внедрение совместных моделей климата и биогеохимических циклов для интерактивных процессов транспорта и обмена CO₂ океан-атмосфера-наземные экосистемы.

Описание комплекса моделей и некоторые результаты

В ходе реализации плана исследований разработаны и внедрены новые версии глобальных климатических моделей. Модель океанского блока построена на основе пространственных термохалинных (описывающих циркуляцию, обусловленную распределением температуры и солёности) уравнений с добавлением в уравнения горизонтального импульса члена линейного трения [8], [9]. Температура и солёность удовлетворяют индивидуальным уравнениям адвекции-диффузии. Процедура также учитывает конвективное приспособление.

Для описания процессов в атмосфере в разных вариантах расчетов использована одна из двух моделей. Первая — это модель общей циркуляции атмосферы [4]. Вторая — двумерная энерго-влажно-балансовая модель. Прогностическими переменными в ней являются температура атмосферы и удельная влажность вблизи подстилающей поверхности. Динамические уравнения модели морского льда решаются относительно его сплоченности и средней толщины льда. Такая постановка задачи дает возможность проводить расчеты на тысячи лет с учетом эволюции глубокого океана [8].

Как вариант использования комплекса моделей изучено влияние загрязнения северных областей поверхности Тихого океана на термохалинную циркуляцию и региональный климат.

Из литературных источников следует [10], что из антропогенного мусора образуются целые континенты в океане — там, где существует круговая циркуляция течений. Полоса «мусорного супа» тянется от точки примерно в 500 морских милях от побережья Калифорнии через северную часть Тихого океана мимо Гавайев и едва не достигает отдаленной Японии (рис. 1).

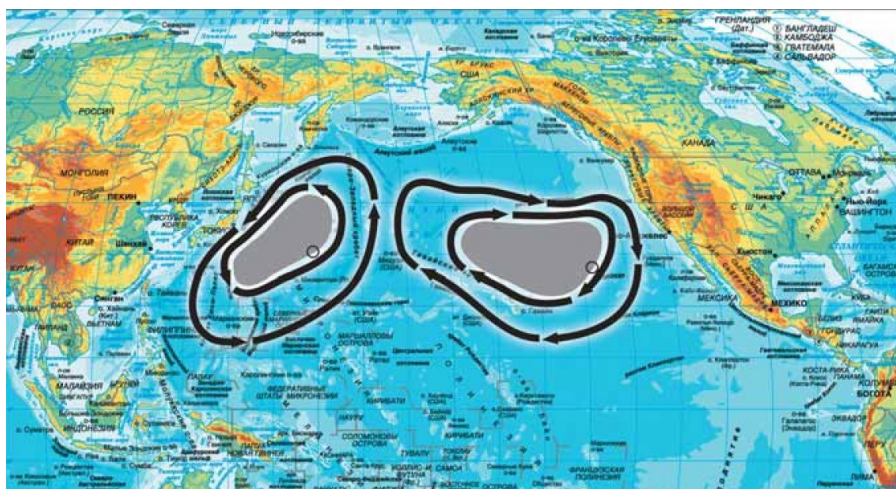


Рисунок 1 - Круговые течения в Тихом океане, ограничивающие «мусорное пятно»
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.141.1>

Гигантская площадь «мусорного супа» способна изменить альbedo поверхности океана. Но дело не только во вкладе мусорных континентов в альbedo планеты. Существует еще проблема испарения. Наличие мусора ведет к резкому перегреву поверхности океана. Мусор ограничивает путь излучения в воде сантиметрами, тогда как обычно излучение распределяется в слое, глубиной в несколько десятков метров. Такая концентрация энергии приведет к значительному увеличению испарения в областях мусорных островов.

Эта ситуация была исследована на климатической модели. Были изучены несколько вариантов описания этого эффекта. В численном эксперименте здесь предполагается, что температура поверхности океана увеличена на 10% в формуле, описывающей испарение с поверхности океана в области, соответствующей рисунку 1. Это привело к увеличению испарения с поверхности океана и понижению температуры поверхности в этой области в пределах 2°C (рис. 2). При этом несколько изменяется и вертикальная термохалинная циркуляция в северной области Тихого океана (рис. 3).

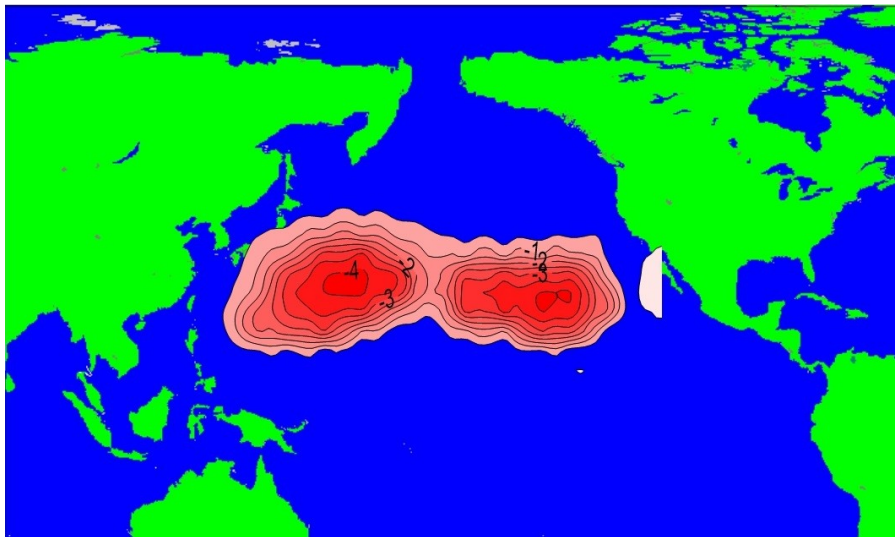


Рисунок 2 - Изменение вертикальной термохалинной циркуляции в северной области Тихого океана при наличии загрязнений

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.141.2>

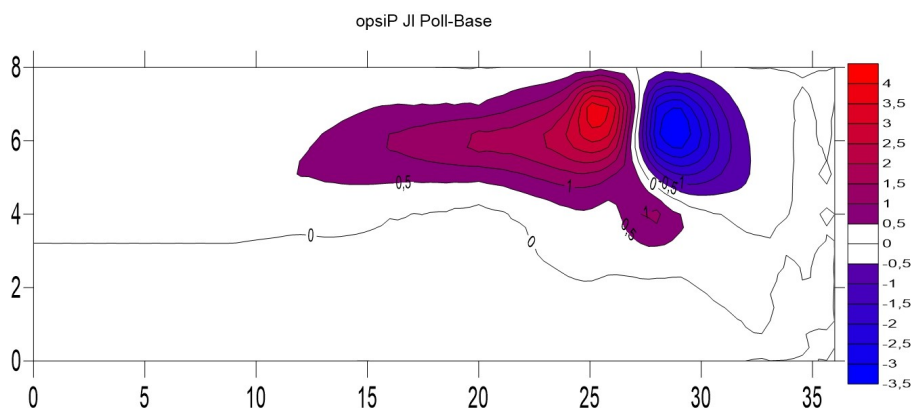


Рисунок 3 - Изменение температуры поверхности при наличии загрязнений океана

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.141.3>

Заключение

Разработанные модели предполагается также использовать для ансамбля расчетов по оптимизации параметров модели и исследования зависимости результатов от исходных данных [4]. Применена также модель переноса углекислого газа в атмосфере с использованием результатов климатической модели и пространственной модели производственного процесса наземных экосистем в сезонном режиме [6]. На основе применения системы глобальных моделей биогеохимических циклов имеется возможность получения прогнозов глобальной и региональной динамики биосферных процессов, а также прогнозов глобального потепления при различных сценариях антропогенно-техногенной деятельности, особенно при росте производства энергии и увеличении выбросов парниковых газов в атмосферу.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Сообщество рецензентов Международного научно-исследовательского журнала

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.141.4>**Conflict of Interest**

None declared.

Review

International Research Journal Reviewers Community

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.141.4>**Список литературы / References**

1. Монин А. С. Введение в теорию климата / А. С. Монин. — Ленинград : Гидрометеиздат, 1982. — 296 с.
2. Педлоски Дж. Геофизическая гидродинамика, том 1 / Дж. Педлоски. — Москва : Мир, 1984. — 398 с.
3. Толстых М. А. Модели глобальной атмосферы и мирового океана: алгоритмы и суперкомпьютерные технологии / М. А. Толстых, Р. А. Ибраев. — Москва : Изд-во МГУ, 2013. — 144 с.
4. Пархоменко В. П. Организация численных экспериментов на модели общей циркуляции атмосферы и глобальной модели океана / В. П. Пархоменко // Журнал вычислительной математики и математической физики. — 2021. — 10. — С. 1693–1703. DOI: 10.31857/S0044466921100148
5. Parkhomenko V. P. Improved Computing Performance and Load Balancing of Atmospheric General Circulation Model / V. P. Parkhomenko, T. Tran Van Lang // Journal of Computer Science and Cybernetics. — 2013. — 2. — P. 138–148.
6. Пархоменко В. П. Глобальная климатическая модель с учетом биогеохимического углеродного цикла растительности суши / В. П. Пархоменко // Математическое моделирование и численные методы. — 2021. — 2. — С. 38–53. DOI: 10.18698/2309-3684-2021-2-3853
7. Climate Change 2013 // The Physical Science Basis. — 2013. — URL: <http://www.climatechange2013.org/images/report> (accessed: 24.02.2024).
8. Parkhomenko V. P. Numerical 3-d Model Experiments on Global Climate Sensitivity to Solar Constant Variations / V. P. Parkhomenko // J. Phys.: Conf. Ser. — 2019. — 1391. DOI: 10.1088/1742-6596/1391/1/012082
9. Marsh R. Development of a Fast Climate Model (C-GOLDSTEIN) for Earth System Science / R. Marsh, N. R. Edwards, J. G. Shepherd // SOC. — 2002. — 83. — P. 1–54.
10. Кейси С. Океаны продолжают «утопать» в пластике / С. Кейси // Экология и жизнь. — 2008. — 77. — С. 54–59.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Monin A. S. Vvedenie v teoriju klimata [Climate Theory Introduction] / A. S. Monin. — Leningrad : Gidrometeoizdat, 1982. — 296 p. [in Russian]
2. Pedloski Dzh. Geofizicheskaja gidrodinamika, tom 1 [Geophysical Hydrodynamics, volume 1] / Dzh. Pedloski. — Moscow : Mir, 1984. — 398 p. [in Russian]
3. Tolstyh M. A. Modeli global'noj atmosfery i mirovogo okeana: algoritmy i superkomp'yuternye tehnologii [Global Atmosphere and Ocean Models: Algorithms and Supercomputing Technologies] / M. A. Tolstyh, R. A. Ibraev. — Moscow : Publishing House MSU, 2013. — 144 p. [in Russian]
4. Parhomenko V. P. Organizatsija chislennyh eksperimentov na modeli obschej tsirkuljatsii atmosfery i global'noj modeli okeana [Organization of Numerical Experiments with an Atmospheric General Circulation Model and an Ocean Global Model] / V. P. Parhomenko // Zhurnal vychislitel'noj matematiki i matematicheskoy fiziki [Computational Mathematics and Mathematical Physics]. — 2021. — 10. — P. 1693–1703. DOI: 10.31857/S0044466921100148 [in Russian]
5. Parkhomenko V. P. Improved Computing Performance and Load Balancing of Atmospheric General Circulation Model / V. P. Parkhomenko, T. Tran Van Lang // Journal of Computer Science and Cybernetics. — 2013. — 2. — P. 138–148.
6. Parhomenko V. P. Global'naja klimaticheskaja model' s uchetom biogeoхимического углеродного tsikla rastitel'nosti sushi [Global Climate Model Taking into Account the Biogeochemical Carbon Cycle of Terrestrial Vegetation] / V. P. Parhomenko // Matematicheskoe modelirovanie i chislennye metody [Mathematical Modeling and Computational Methods]. — 2021. — 2. — P. 38–53. DOI: 10.18698/2309-3684-2021-2-3853 [in Russian]
7. Climate Change 2013 // The Physical Science Basis. — 2013. — URL: <http://www.climatechange2013.org/images/report> (accessed: 24.02.2024).
8. Parkhomenko V. P. Numerical 3-d Model Experiments on Global Climate Sensitivity to Solar Constant Variations / V. P. Parkhomenko // J. Phys.: Conf. Ser. — 2019. — 1391. DOI: 10.1088/1742-6596/1391/1/012082
9. Marsh R. Development of a Fast Climate Model (C-GOLDSTEIN) for Earth System Science / R. Marsh, N. R. Edwards, J. G. Shepherd // SOC. — 2002. — 83. — P. 1–54.
10. Kejsi S. Okeany prodolzhat' «utopat'» v plastike [Oceans continue to "drown" in plastic] / S. Kejsi // JEKologija i zhizn' [Ecology and Life]. — 2008. — 77. — P. 54–59. [in Russian]