



ЗАЛОЖНЕВА Лилия Леонидовна -
ведущий математик Института проблем
управления им. В.А.Трапезникова РАН
Адрес: 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, 65
e-mail: zalozhneva-l@yandex.ru



КРЮКОВА Лидия Николаевна -
научный сотрудник Института проблем
управления им. В.А.Трапезникова РАН
Адрес: 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, 65
e-mail: lidkryukova@yandex.ru



ШУРЕМОВ Евгений Леонидович -
доктор экономических наук, профессор
Финансового университета
при Правительстве Российской Федерации
Адрес: 125993, г. Москва,
Ленинградский проспект, 49
e-mail: shurem@mail.ru

**Использование распределенных
вычислительных ресурсов
для моделирования
крупномасштабных
экологических систем**

Компьютерный проект CPDN (Climateprediction.net) - это проект распределенных вычислений для моделирования климата [1]. Результаты моделирования позволяют оценить, как модели, описывающие глобальные изменения климата, зависят от небольших изменений в их параметрах. Проект основывается на добровольных вычислениях и реализуется на основе программной платформы BOINC (Berkeley Open Infrastructure for Network Computing) [2].

BOINC является системой с открытым исходным программным кодом для добровольных вычислений в режиме Grid Computing. Целью BOINC является использование свободной вычислительной мощности персональных компьютеров участников проекта. BOINC был разработан группой из Space Sciences Laboratory (SSL) Калифорнийского университета (Беркли) [3].

Распределенная вычислительная платформа BOINC в настоящее время имеет около 600000 активных компьютеров (хостов) по всему миру с производительностью в среднем в 9.2 петафлопс (9.2×10^{15} операций с плавающей запятой в секунду). BOINC финансируется Национальным научным фондом США (NSF) [4].

BOINC поддерживает работу с различными операционными системами, включая Microsoft Windows, Mac OS X, Android, Linux и FreeBSD. BOINC является свободным программным обеспечением, которое выпускается под условиями Lesser General Public License (LGPL) свободно распространяемой UNIX-подобной операционной системы GNU [5].

BOINC может использовать свободные циклы центрального (CPU) и графического (GPU) процессоров компьютера, для проведения научных вычислений. Компанией NVIDIA разработана платформа для параллельных вычислений CUDA [6], которая позволяет также использовать и графические процессоры для научных вычислений.

Начиная с октября 2009 года, BOINC также поддерживает линейки графических процессоров AMD. В последние версии добавлена поддержка для компьютеров с операционной системой Mac OS X с графическими картами AMD Radeon (через открытый язык параллельных вычислений OpenCL [7]).

Программным обеспечением BOINC можно управлять с помощью дистанционного вызова процедур (RPC - Remote Procedure Call) из командной строки, а также из BOINC Account Manager [8]. BOINC Manager в настоящее время имеет два представления или окна («views»): Advanced View [9] и Simple GUI (BOINC Simple GUI) [10]. Представление Simple GUI является настраиваемым пользовате-

лями. С его помощью они могут создавать и свои собственные проекты.

Серверная часть проекта BOINC состоит из HTTP-сервера с веб-сайтом проекта, базы данных MySQL и набора программ на C++, таких как генератор заданий, планировщик, валидатор формата, ассимилятор результатов [11]. Сервер работает под Debian Linux [12]. Web-сервер проекта представляет собой HTTP-сервер с поддержкой PHP-скриптов. Он используется организаторами для регистрации участников, распределения заданий для обработки, получения результатов, управления базами данных проекта. В базах данных хранится информация о пользователях, пароли, записи заданий, результаты, информация о хостах, программах проекта и др. Для пользователей платформа BOINC обычно воспринимается как BOINC-client - универсальный клиент (загружаемая компьютерная программа) для работы с различными проектами распределенных вычислений. BOINC-client [13] позволяет пользователю участвовать одновременно в нескольких проектах с помощью одной общей программы управления (boinc или boinc.exe).

Модельная часть проекта CPDN направлена на построение прогнозов изменений климата, связанных, в частности, с увеличением объемов выбросов углекислого газа в атмосферу и изменением кругооборота соединений серы в природе. Антропогенная деятельность оказывает существенное влияние на глобальный круговорот серы (sulphur cycle). Сжигание и переработка нефти, природного газа и других видов ископаемого топлива значительно увеличили количество серы в атмосфере и океане и способствовали уменьшению ее содержания в осадочных породах. В наиболее загрязненных районах имеет место многократное увеличение отложений сульфатов [14].

Кислотность среды, определяемая водородным показателем (pH), является величиной, характеризующей концентрацию ионов водорода в растворе, и равна десятичному логарифму этой концентрации, взятому со знаком минус: $pH = -\lg[H^+]$. Нейтральные растворы имеют $pH = 7$. Кислая среда характеризуется значениями кислотности меньше 7, а щелочная больше 7. Естественная, без примесей, дождевая вода имеет уровень $pH \approx 5.6$, поскольку диоксид углерода и водяной пар реагируют друг с другом с образованием угольной кислоты (H_2CO_3), которая является слабой и быстро разлагается.

Важным загрязнителем воздуха, влияющим на кислотность окружающей среды, является диоксид серы (SO_2), который в результате фотохимического окисления превращается в сернистый

ангидрид (SO_3), который, в свою очередь, реагируя с водяным паром в атмосфере, образует аэрозоли серной кислоты. После того, как кислота полностью диссоциирует в воде с образованием ионов водорода, кислотность среды может упасть, вызывая повреждение как техногенных, так и природных систем. Основная часть антропогенной эмиссии SO_2 связана с производством электроэнергии и работой транспорта. Неантропогенная эмиссия диоксида серы связана, прежде всего, с вулканической деятельностью.

Целью проекта CPDN является уменьшение неопределенностей в параметрах моделей прогнозирования климата, которое должно быть произведено при настройке моделей. При этом они запускаются на клиентских компьютерах с небольшими изменениями в различных физических параметрах, и в рамках проекта исследуется, как эти изменения параметров влияют на выходные характеристики модели.

Это позволяет оценивать, насколько чувствительны модели к небольшим изменениям таких параметров как, например, концентрация диоксида серы или углекислого газа в атмосфере. Компьютерные эксперименты должны способствовать уменьшению неопределенностей климатических прогнозов и сценариев, в том числе при прогнозировании, проводимом в соответствии с программой межправительственной группы экспертов по изменению климата (Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC) [15]. Эксперименты в рамках CPDN формируют научную основу для решения проблемы оценки возможного изменения климата на долгосрочную перспективу. Проект CPDN направлен на уменьшение неопределенности в параметрах моделей, а не на совершенствование и выбор правильного модельного сценария. Следует отметить, что примерно половина суммарного разброса результатов зависит от выбранного модельного сценария изменений климата, а не от неопределенности в определении параметров.

Математической основой проекта CPDN является объединенная модель HadCM3 (Hadley Centre Coupled Model, version 3) или модель атмосферно-океанической циркуляции (Coupled Atmosphere-Ocean General Circulation Model - AOGCM) [16]. Она состоит из двух моделей. Первая модель HadAM3 (Hadley Centre Atmospheric Model, version 3) - модель атмосферной циркуляции - сетевая модель, в которой расчеты производятся с разрешением 3.75×2.5 градуса по долготе и широте. Это дает 96×72 расчетных ячеек сетки для каждого земного полушария (южного и северного), которые характеризуются скалярными (давление, температура и влажность) и векторными

(скорость ветра) переменными. Расчет скалярных и векторных переменных производится со смещением друг относительно друга, равным 1/2 шага сетки (Arakawa b-grid) [17]. По вертикали модель имеет 19 уровней (слоев). Временной шаг модели HadAM3 составляет 30 минут.

При расчетах по данной модели для узлов около земных полюсов применяется Фурье-фильтрация для предотвращения неустойчивости, связанной с нарушением критерия Куранта-Фридрихса-Леви (Courant-Friedrichs-Lewy - CFL) - критерия устойчивости численного решения систем дифференциальных уравнений в частных производных.

Вторая модель - модель океанической циркуляции (HadOM3 - Hadley Centre Ocean Model, version 3) имеет разрешение 1.25×1.25 градуса по поверхности, 20 уровней по вертикали и временной шаг в один час. Таким образом, каждой ячейке сетки атмосферной модели соответствует шесть ячеек сетки океанической модели. Для объединения двух моделей океаническая береговая линия выровнена до границ соответствующих ячеек атмосферной сетки.

Термохалинная циркуляция (Thermohaline circulation - THC) [18] является частью циркуляции Мирового океана, которая управляется градиентами плотности, создаваемыми поверхностным теплом и потоками морской воды. Явление термохалинной циркуляции связано с температурой (thermo) и соленостью (haline - salinity) - факторами, которые определяют плотность морской воды.

Меридиональные поверхностные течения, такие, например, как Гольфстрим, двигаются по направлению к полюсу от экваториальной части океана, постепенно охлаждаются и тонут в высоких широтах, формируя встречные течения, такие, например, как North Atlantic Deep Water (NADW), которое движется в южном направлении. NADW представляет собой океанический водный поток, который зарождается в северной части Атлантического океана, в морях Лабрадор и Гренландском [19]. Далее NADW движется на глубинах от 2000 до 4000 метров вдоль побережья Канады и США, постепенно сдвигаясь на восток от побережья. Затем поток двигается на юг, огибая восточную оконечность Южной Америки, в Южную Атлантику, где он смешивается с циркумполярными водными массами (Circumpolar Deep Water).

Термохалинная циркуляция (Thermohaline circulation) играет важную роль в снабжении теплом полярных регионов и в регулировании объема морского льда в них, хотя в переносе тепла за пределами тропиков большую роль также играют и атмосферные потоки [20]. Термохалинная циркуляция оказывает существенное влияние

на уровень концентрации углекислого газа в атмосфере, связанное с зависимостью растворимости газов в воде от ее температуры. Также термохалинная циркуляция оказывает влияние на радиационный баланс Земли вследствие увеличения облачности, порождаемой теплыми океаническими потоками, в холодных умеренных и субарктических областях.

Установлено, что интенсивность северной ветви Гольфстрима снизилась примерно на 20% с 1985 по 2002 гг. [21]. Была также установлена связь опреснения Северной Атлантики с общим потеплением Земли [22]. Пополнение арктических морей большим количеством дополнительной пресной воды вследствие глобального потепления и таяния льда, в теории, может перенаправить воды Гольфстрима, которые движутся на север мимо Англии и Норвегии, и вынудить их вместо этого циркулировать на юг в сторону экватора [23]. Это, в свою очередь, может оказать существенное воздействие на климат в Европе.

При расчетах в рамках объединенной модели совместно с моделью HadAM3 также может использоваться более простая модель океана - модель «океанской плиты» (Slab Ocean Model - SOM) [24]. Эта модель требует меньше времени для расчетов и меньше оперативной памяти, но не учитывает обратных воздействий от океана, которые включены в полную модель.

Модель атмосферной циркуляции просчитывается для периода в одни сутки. Потоки (тепла, влаги) на границе атмосферы и океана интегрируются. Затем модель океанической циркуляции просчитывается для этого же временного интервала. Результаты расчетов по первой модели используются в качестве начальных условий для второй. Эта процедура повторяется на каждом шаге - (t , $t+1$) на всем времени модели. Результатами моделирования являются такие климатические характеристики, как распределение температур поверхности суши и океана, представленное в виде соответствующих изотерм, вероятности засухи, наводнений, температурных эксцессов.

С точки зрения временных масштабов модельная часть проекта CPDN состоит из пяти моделей. Первая модель - модель изменений климата за период с 1960 по 2010 гг., использующая реальные данные о температуре поверхности моря, площади, занимаемой морскими льдами, концентрации парниковых газов и аэрозолей в атмосфере. Вторая модель представляет собой климатический прогноз на 1960 - 2010 гг. при условии сохранения антропогенного воздействия на атмосферу на уровне 1960 г. Третья - прогноз изменений климата с 2010 до 2060 г. Четвертая модель позволяет построить климатиче-

ский прогноз на тот же период, что и третья, но при предположении, что среднемировая температура в 2010 г. была на несколько градусов выше той, что наблюдалась в реальности. Пятая модель представляет собой описание изменений климата в течение всей эпохи голоцена. В географическом разрезе модель описывает сурсизменение климата для следующих регионов: Европа, Запад США, Южная

Африка, Австралия, Юго-Западная Азия и остальная часть Африки.

Результаты моделирования в рамках рассмотренного компьютерного проекта имеют важное значение, поскольку могут быть использованы при принятии глобальных решений, направленных на снижение уровня антропогенного воздействия на окружающую среду.

Литература:

1. *Climateprediction.net* [Электронный ресурс]. - URL: <http://www.climateprediction.net>.
2. *BOINC. Open-source software for volunteer computing and grid computing* [Электронный ресурс]. - URL: <http://boinc.berkeley.edu>.
3. *Space Sciences Laboratory* [Электронный ресурс]. - URL: <http://www.ssl.berkeley.edu>.
4. *National Science Foundation* [Электронный ресурс]. - URL: <http://www.nsf.gov>.
5. *Операционная система GNU* [Электронный ресурс]. - URL: <http://www.gnu.org/home.ru.html>.
6. *NVIDIA. CUDA Zone* [Электронный ресурс]. - URL: <https://developer.nvidia.com/cuda-zone>.
7. *OpenCL - The open standard for parallel programming heterogeneous systems / KHRONOS Group Inc.* [Электронный ресурс]. - URL: <https://www.khronos.org/opensl>.
8. *Account managers - BOINC* [Электронный ресурс]. - URL: http://boinc.berkeley.edu/wiki/account_managers.
9. *Advanced view - BOINC* [Электронный ресурс]. - URL: http://boinc.berkeley.edu/wiki/advanced_view.
10. *BOINC Simple GUI - BOINC 5.7.1 testing starts / Rosetta@home* [Электронный ресурс]. - URL: http://boinc.bakerlab.org/forum_thread.php?id=2527.
11. *GitHub / GitHub, Inc. [US]* [Электронный ресурс]. - URL: <https://github.com/zonca/boinc/blob/master/sched/assimilator.cpp>.
12. *Debian GNU/Linux / DistroWatch.com.* [Электронный ресурс] - URL: <http://distrowatch.com/table.php?distribution=Debian>.
13. *Download BOINC client software / BOINC.* [Электронный ресурс]. - URL: http://boinc.berkeley.edu/download_all.php.
14. *Pham M., Boucher O., Hauglustaine D. Changes in atmospheric sulfur burdens and concentrations and resulting radiative forcing under IPCC SRES emission scenarios for 1990-2100 // Journal of Geophysical Research: Atmospheres / Willey Online Library* [Электронный ресурс]. - URL: <http://onlinelibrary.wiley.com/enhanced/doi/10.1029/2004JD005125>.
15. *IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change* [Электронный ресурс]. - URL: <http://www.ipcc.ch/organization/organization.shtml>.
16. *HadCM3/California Climate Commons* [Электронный ресурс]. - URL: <http://climate.calcommons.org/model/hadcm3>.
17. *Wyman B. A description of the finite differencing used by the B-grid dynamical core* [Электронный ресурс]. - URL: <http://math.nyu.edu/~gerber/pages/climod/bgrid.pdf>.
18. *Thermohaline Circulation: The Global Ocean Conveyor* [Электронный ресурс]. - URL: <http://www.windows2universe.org/earth/Water/circulation1.html>.
19. *Smethie W.M., Fine R.A., Putzka A.E., Jones P. Tracing the flow of North Atlantic Deep Water using chlorofluorocarbons // Journal of Geophysical Research: Oceans, Vol. 105, Issue C6, Pp. 14297-14323/ Willey Online Library* [Электронный ресурс]. - URL: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/1999JC900274/abstract>.
20. *Trenberth K.E., Caron J.M. Estimates of Meridional Atmosphere and Ocean Heat Transports // Journal of Climate. - 2001. - 14. - P. 3433-3443.*
21. *Marsh R., de Cuevas B.A., Coward A.C., Bryden H.L., Alvarez M. Thermohaline circulation at three key sections in the North Atlantic over 1985-2002 // Geophysical Research Letter, Vol. 32(10), May 2005 / Willey Online Library* [Электронный ресурс]. - URL: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2004GL022281/abstract>.
22. *Oppo D.W., Curry W.B. Deep Atlantic Circulation During the Last Glacial Maximum and Deglaciation // Nature Education Knowledge, 2012, 3(4):1* [Электронный ресурс]. - URL: <http://www.nature.com/scitable/knowledge/library/deep-atlantic-circulation-during-the-last-glacial-25858002>.
23. *Bryden H.L., Hannah R., Longworth H.R., Stuart A., Cunningham S.A. Slowing of the Atlantic meridional overturning circulation at 25°N / Nature 438. Pp. 655-657* [Электронный ресурс]. - URL: <http://www.nature.com/nature/journal/v438/n7068/full/nature04385.html>.
24. *SOM (Slab Ocean Model) / CESM / Community Earth System Model* [Электронный ресурс]. - URL: <http://www2.cesm.ucar.edu/working-groups/pwg/documentation/cesm1-paleo-toolkit/ocean/som>.