

Суперкомпьютерное моделирование климатических процессов



5 Суперкомпьютерное моделирование климатических процессов

В статье рассмотрены три математические модели, развиваемые для решения задач оценки будущих изменений климата и их последствий для окружающей среды: глобальная климатическая модель ИВМ РАН, региональная атмосферная модель НИВЦ МГУ и вихреразрешающая модель пограничного слоя ИВМ РАН. Кратко изложены фундаментальные основы построения этих моделей, их приложения и детали реализации на многопроцессорных вычислительных системах.

АВТОРЫ:

В.М. Степаненко — ст. научн. сотрудник НИВЦ МГУ, *e-mail: stepanen@srcc.msu.ru*

А.В. Глазунов — ст. научн. сотрудник ИВМ РАН, ст. научн. сотрудник НИВЦ МГУ,

e-mail: glazunov@inm.ras.ru

Д.Н. Микушин — мл. науч. сотрудник НИВЦ МГУ, *e-mail: mikushin@srcc.msu.ru*

В.Н. Лыкосов — главн. науч. сотрудник ИВМ РАН, зав. лабораторией НИВЦ МГУ, чл.-корр. РАН,

e-mail: lykossov@inm.ras.ru

Одна из важных проблем современной науки состоит в оценке будущих изменений климата и их последствий для окружающей среды. Наиболее перспективным средством получения таких оценок являются математические модели климатической системы, которые включают описание широкого круга физических, химических и биологических процессов, происходящих в атмосфере, гидросфере, криосфере и биосфере. В качестве основного математического аппарата в этих моделях используются уравнения гидромеханики и термодинамики сплошных и пористых сред при определенном уровне упрощающих предположений. По пространственному масштабу множество моделей, описывающих процессы в климатической системе, условно можно разбить на три класса: глобальные, региональные и локальные (вихреразрешающие) модели. Глобальные модели достигли в настоящее время высокого уровня в качестве воспроизведения современного климата. Для сравнения климатических моделей между собой и для определения путей их дальнейшего развития организованы международные проекты, в которых Россия представлена моделью Института вычислительной математики РАН [1]. С этой моделью проведены многочисленные расчеты изменений климата в XXI веке при различных сценариях антропогенной эмиссии парниковых газов в атмосферу (рис. 1). Важной особенностью данной модели является подробное описание процессов в деятельном слое суши в условиях вечной мерзлоты, что существенно при оценке ее отклика на происходящее потепление нижней атмосферы.

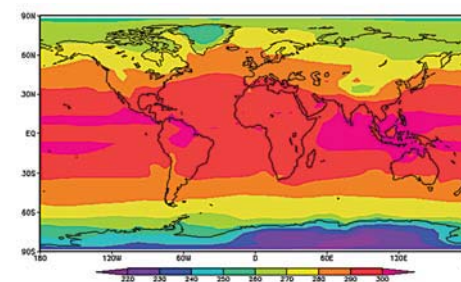


Рис. 1. Приземная температура воздуха (градусы К) за период 2050—2090 гг. при удвоении содержания углекислого газа в атмосфере по данным климатической модели ИВМ РАН

Наряду с глобальными климатическими характеристиками, значительный интерес представляют региональные климатические показатели, существенные при планировании социально-экономического развития регионов. В Научно-исследовательском вычислительном центре МГУ развивается региональная атмосферная модель, которая позволяет рассчитывать динамику атмосферы вплоть до масштабов отдельных мощных кучевых облаков. С ее помощью могут быть явно воспроизведены горно-долинные циркуляции, бризы [2], мезомасштабные вихри

в северных широтах и другие циркуляции среднего масштаба. Одной из актуальных задач, решаемых с привлечением этой модели, является оценка региональных потоков парниковых газов (метана, углекислого газа) с поверхности озер зоны вечной мерзлоты (рис. 2).

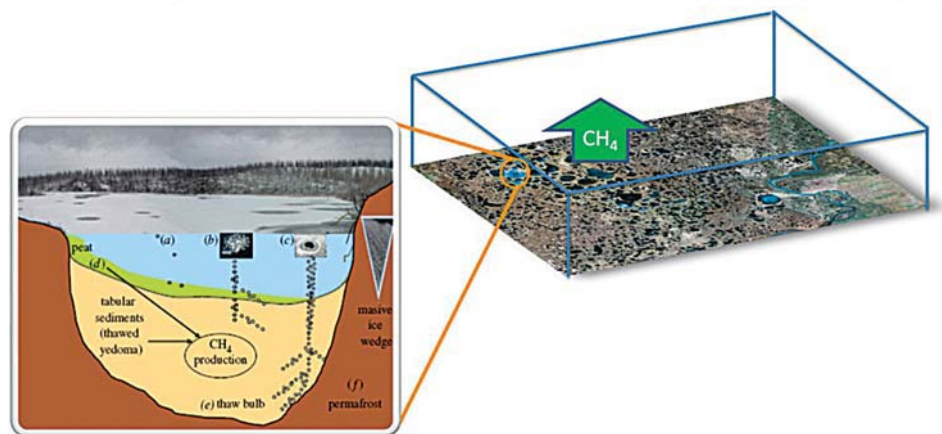


Рис. 2. Схема включения модели водоема с описанием эмиссии метана (слева, согласно [3]) в региональную атмосферную модель (область модели показана справа)

Глобальные и региональные модели в настоящее время не обладают достаточным пространственным разрешением для того, чтобы воспроизводить турбулентные вихри в пограничном слое атмосферы. В то же время эти вихри играют важную роль в ряде задач, например, при моделировании обтекания городской застройки. Не нужно быть экспертом в области аэродинамики, чтобы заметить, что расположенные определенным способом высотные здания могут существенно усиливать ветровые потоки, перераспределять их, приводить к увеличению порывистости ветра и изменчивости его направления. Помимо того, что сильный порывистый ветер между зданиями сам по себе снижает уровень комфорта проживающих в районе людей, он может причинять вред зеленым насаждениям, приводить к выветриванию почвенного покрова (особенно в условиях неблагоприятных изменений климата), к повышенной запыленности и к другим вредным для экосистемы последствиям. Части этих последствий можно избежать (или, по крайней мере, ослабить их), если еще на этапе проектирования застройки спрогнозировать наиболее вероятное поведение ветрового потока в предполагаемом районе. Такой прогноз можно осуществить на основе вихреразрешающей модели, развиваемой

в ИВМ РАН и НИВЦ МГУ [4]. Эта модель имеет пространственное разрешение, позволяющее явно воспроизводить наиболее энергонесущие атмосферные вихри пограничного слоя (рис. 3).

Табл.1. Основные вычислительные характеристики моделей

Характеристика модели	Климатическая модель	Региональная модель	Вихреразрешающая модель
Разрешение по пространству и времени, количество узлов сетки	100 – 200 км, 300 – 400 сек, ~ 10 ⁵ – 10 ⁶	1 – 10 км, 10 – 60 сек, ~ 10 ⁶ – 10 ⁷	1 – 10 м, 1 – 5 сек, ~ 10 ⁷ – 10 ⁸
Технологии распределения вычислений	MPI, OpenMP	MPI	MPI
Декомпозиция расчетной области	двумерная	двумерная	двумерная, трехмерная
Используемые в расчетах суперкомпьютеры	Кластер ИВМ РАН, СКИФ МГУ “Чебышев”	СКИФ МГУ “Чебышев”, IBM Blue Gene P	СКИФ МГУ “Чебышев”, MVS-50K
Суммарное процессорное время, модельное время	10 ³ – 10 ⁴ ч, 10 – 100 лет	10 ² – 10 ³ ч, 1 – 10 сут.	10 ² – 10 ³ ч, 10 ⁻¹ – 1 сут.

Реализация рассмотренных моделей на многопроцессорных вычислителях с распределенной памятью основана на геометрической декомпозиции расчетной области (таблица 1). Она заключается в том, что каждому вычислительному узлу ставится в соответствие конкретная подобласть. Полнота данных, используемых в шаблонах численных схем, обеспечивается при помощи обменов граничными значениями с узлами, обрабатывающими соседние подобласти (рис. 4). Использование процедуры декомпозиции позволяет достичь хорошей масштабируемости при различных размерах расчетной области и на большом количестве процессоров. В качестве примера на рис. 5 продемонстрирована эффективность использования параллельной вычислительной системы для вихреразрешающей модели.

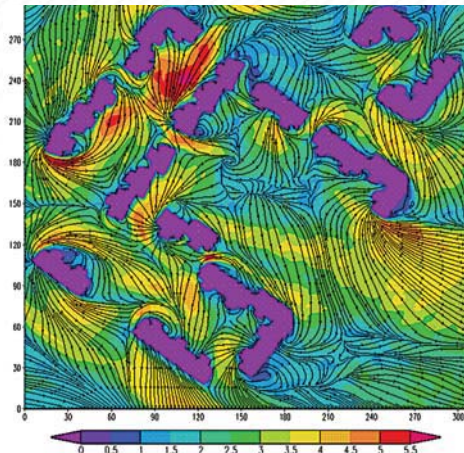


Рис. 3. Средняя скорость ветра (м/с) при обтекании городской застройки (вид сверху)

Как правило, возможности обменных сетей традиционных кластерных систем не позволяют эффективно реализовывать параллельные алгоритмы со значительной долей обменов данными. Например, использование быстрого преобразования Фурье в региональной модели приводит к «насыщению» ускорения модели на нескольких сотнях процессоров. По этой причине перспективность пета- и эксафлопных вычислений существенно зависит от возможности выбора численных алгоритмов с меньшей зависимостью по данным и суперкомпьютерных архитектур с большей плотностью вычислительных элементов в узле (многоядерность, сопроцессоры и ускорители, графические процессоры, Cell) и быстрой оперативной памятью.

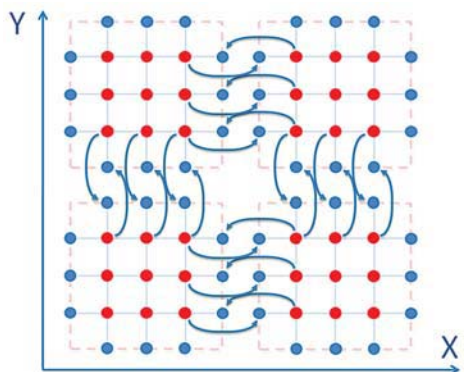


Рис. 4. Схема обмена данными между соседними подобластями при реализации атмосферных моделей на суперкомпьютерах с распределенной памятью

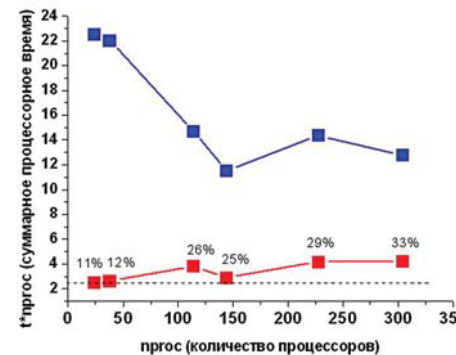


Рис. 5. Эффективность параллельных вычислений на суперкомпьютере СКИФ-МГУ «Чебышев» на примере вихреразрешающей атмосферной модели; размерность задачи 456x152x264 (18 298 368 узлов сетки)

В заключение следует заметить, что представленная выше иерархия моделей может быть использована для решения задач, связанных с пространственной детализацией характеристик изменения климата и оценкой его региональных последствий для природной среды.

Работа поддержана грантами РФФИ 07-05-00200-а, 09-05-00379-а, 09-05-13562-офи_ц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дымников В.П. и др. Моделирование климата и его изменений. Современные проблемы вычислительной математики и математического моделирования. Т. 2 «Математическое моделирование». М.: Наука. 2005. С. 38 – 175.
2. Степаненко В.М., Микушин Д.Н. Численное моделирование мезомасштабной динамики атмосферы и переноса примеси над гидрологически неоднородной поверхностью // Вычислительные технологии. 2008. Т. 13. Вып. 3. С. 104 – 110.
3. Walter. K.M., Smith L.C., and Chapin F.S. Methane bubbling from northern lakes: present and future contributions to the global methane budget. Phil. Trans. R. Soc. A. 2007. V. 365. P. 1657–1676.
4. Глазунов А.В. Вихреразрешающее моделирование турбулентности с использованием смешанного динамического локализованного замыкания. Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. С. 7 – 42.