

Рис. 4.
Изоповерхность концентрации примеси для участка городской застройки на фоне векторного поля осредненной по времени скорости

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и программы Союзного государства "СКИФ-ГРИД".

Мировой океан, изменения климата и суперкомпьютерное моделирование



7 Мировой океан, изменения климата и суперкомпьютерное моделирование

Океан играет фундаментальную роль в функционировании климатической системы Земли. Для воспроизведения климата в модели Мирового океана требуется явно описать ряд динамических процессов и процессов преобразования энергии. Разработана технология решения системы уравнений модели океана на сетках больших размеров. Результаты показывают хорошую масштабируемость параллельной версии модели Мирового океана на многопроцессорном компьютере с распределенной памятью.

АВТОРЫ:

Р.А. Ибраев – докт. физ.-мат. наук, чл.-корр. РАН, гл. науч. сотрудник ИВМ РАН;
e-mail: ibrayev@mail.ru

В.В. Калмыков – аспирант ВМК МГУ;
e-mail: vvk88@mail.ru

К.В. Ушаков – канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник ИО РАН;
e-mail: ushakovkv@mail.ru

Мировой океан и климат Земли

Океан играет фундаментальную роль в функционировании климатической системы Земли. Эта роль определяется тем, что плотность воды почти в 800 раз больше плотности воздуха, а масса океана в 270 раз больше массы атмосферы. Слой воды толщиной всего лишь 10 метров имеет тот же вес, что и весь воздушный столб. Теплоемкость единицы массы воды в четыре раза больше теплоемкости единицы массы воздуха, так что 2,5-метровый слой воды имеет ту же теплоемкость на единицу площади, что и весь слой атмосферы единичной площади. Другими словами, тепло, необходимое на нагревание атмосферы на 1°C, можно получить, изменив температуру слоя воды 2,5 м на ту же величину, или 25 м на 0,1°C, или 250 м на 0,01°C [1]. Океан способен поглотить или отдать огромное количество тепла, тем самым вынужденные или собственные изменения состояния океана способны существенно влиять на климат Земли.

Один из ключевых процессов в Земной системе — это перенос тепла. Общий перенос тепла от экватора к полюсам оценивается в $5,5 \cdot 10^{15}$ Вт, при этом роли атмосферных и океанических процессов примерно равны. Океанический перенос тепла влияет на количество льда в высоких широтах. Лед в свою очередь оказывает существенное влияние на количество солнечной энергии, поглощаемой Земной системой.

Какая модель Мирового океана нужна?

Моделирование климата выделилось из задачи предсказания атмосферной погоды несколько десятилетий назад. Вначале климатические модели были фактически моделями прогноза погоды с фиксированной температурой поверхности океана. В дальнейшем климатические модели развивались в направлении большего усложнения, в них включались модели океана, почвы, криосферы и т.д., в отличие от моделей погоды, которые непрерывно развивались в направлении увеличения разрешения. Как следствие, современные модели климата работают на сетках, которые не в состоянии разрешить многие синоптические и тем более мезомасштабные явления в океане. Например, среднее пространственное разрешение океанической компоненты климатических моделей, представленных в AR4 IPCC 2007 (Forth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change), составляет 30–300 км.

В то же время воспроизведение существующего климата в модели Мирового океана требует описания ряда динамических процессов, процессов преоб-

разования энергии, взаимодействия океан–атмосфера, таких, как мезомасштабные вихри, струйные пограничные течения, орографические эффекты, особенно на склоне континентального шельфа, глубокая конвекция, приливы. Масштабы этих процессов, за исключением глубокой конвекции, лежат в диапазоне 103–104 метров по горизонтали, 101–103 метров по вертикали и 100–102 часов по времени. Некоторые из них с определенной точностью воспроизводятся в современных моделях Мирового океана, но при этом значительную роль играют параметризации, которые неизбежно ограничивают достоверность воспроизводимых процессов. Решение проблемы состоит в улучшении пространственно-временного разрешения, в прямом моделировании широкого спектра процессов, с тем, чтобы свести к минимуму роль параметризаций в моделях, в снятии традиционных для крупномасштабных моделей приближений гидростатики, Буссинеска, «твердой крышки». Так, например, исследования динамики Атлантического океана показали, что моделирование с шагом сетки не более $0,1^\circ$ является критичным для воспроизведения пространственно-временных характеристик течения Гольфстрим [3]. Размеры трехмерных расчетных сеток для Мирового океана, соответствующие указанным масштабам, лежат в диапазоне 109–1011 точек.

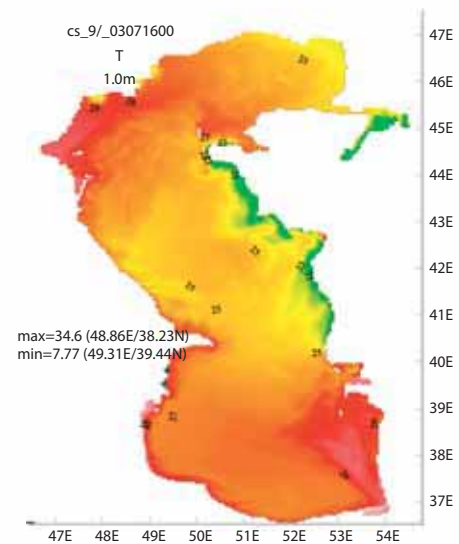


Рис. 1. Температура на поверхности Каспийского моря в июле, полученная в модели с горизонтальным разрешением около 4 км.

Модели термогидродинамических процессов океана

В Институте вычислительной математики (ИВМ РАН) и Институте океанологии им. П.П. Ширшова (ИО РАН) разработана математическая модель динамики океана, в которой явно разрешается ряд процессов, являющихся ключевыми для воспроизведения климата Мирового океана. Модель была применена, в частности, для исследования внутригодовой изменчивости циркуляции вод и уровня Каспийского моря. Исследования с применением модели мезомасштабных процессов моря показали высокую реалистичность полученного решения, рис. 1. Более того, с применением модели стало возможным

доказать существование подповерхностных струйных течений вдоль восточного берега Среднего Каспия и правильно интерпретировать данные наблюдений [2].

Вычислительные технологии решения модели Мирового океана

В ИВМ РАН и ИО РАН при участии студентов и аспирантов МГУ и МФТИ разрабатываются вычислительные технологии для решения модели динамики и химико-биологических процессов Мирового океана. Задача состоит в создании модели Мирового океана с пространственным разрешением, лучшим, чем было использовано в модели Каспийского моря.

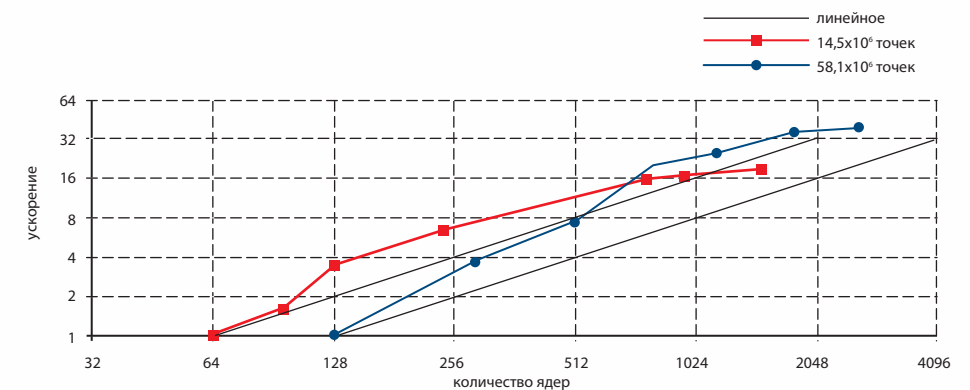


Рис. 2. Ускорение в модели Мирового океана в зависимости от числа используемых вычислительных ядер. Показаны графики для модели с разрешением $0,25^\circ$ ($14,5 \times 10^6$ точек) и $0,125^\circ$ ($58,1 \times 10^6$ точек).

Созданы алгоритмы решения системы трехмерных уравнений термогидродинамических процессов в многосвязной области на сферической поверхности Земли. Разработана технология решения системы уравнений модели на сетках больших размеров с применением метода двумерной декомпозиции области. Результаты показывают хорошую масштабируемость параллельной версии модели Мирового океана на многопроцессорном компьютере с распределенной памятью, рис. 2. В модели с разрешением $0,125^\circ$ максимальное количество использованных вычислительных ядер равнялось 2592. Ожидается, что разработанная технология позволит в скором времени реализовать модель Мирового океана с разрешением $0,1-0,02^\circ$ на 10–20 тысячах ядер.

Проведенные численные эксперименты с моделью Мирового океана

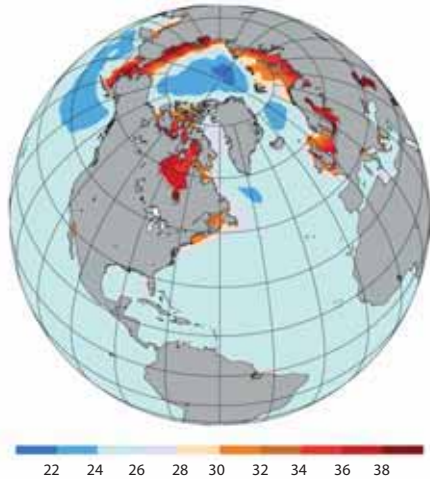


Рис. 3.
Модель Мирового океана с разрешением $0,25^\circ$.
Температура поверхности океана через 1 год
модельного времени

показывают способность модели воспроизводить термогидродинамические процессы, достижимые только при высоком пространственном разрешении. Например, был проведен модельный эксперимент по оценке реакции океана на термодинамически неустойчивое начальное состояние: температура на поверхности была задана равной 40°C , на дне 14°C , течения нулевые. На рис. 3 показана температура поверхности океана в данном эксперименте через год модельного времени. Первичным фактором, нарушающим равновесное состояние океана, является вертикальная диффузия тепла. На шельфе, вследствие меньшего столба воды относительно глубоководных районов, перемешива-

ние приводит к формированию относительно более теплых вод и повышению уровня океана. Это, в свою очередь, приводит к возникновению градиентов плотности и уровня между шельфом и глубоководными районами и, как следствие, — к генерации течений.

Расчеты проводились на вычислительной системе МВС100к Межведомственного суперкомпьютерного центра РАН. Исследования выполнялись при поддержке грантов РФФИ 08-05-01055а, 09-05-12054-офи_м, 10-05-00782а и по проекту Программы фундаментальных исследований Президиума РАН "Фундаментальные проблемы океанологии: физика, геология, биология, экология".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gill, A.E., 1982. Atmosphere–Ocean Dynamics, Academic press.
2. Ibrayev R.A., E. Ozsoy, C. Schrum, H.I. Sur, 2010. Seasonal variability of the Caspian Sea three-dimensional circulation, sea level and air-sea interaction. Ocean Sci., 6, 311-329.
3. Smith R. D., M. E. Maltrud, F. O. Bryan and M. W. Hecht, 2000. Numerical simulation of the North Atlantic Ocean at $1/10^\circ$. J. Phys. Oceanogr. V. 30, 1532-1561.

Моделирование полупроводниковых квантовых наноустройств

