

LES МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЕЙ КОНВЕКТИВНЫХ ОБЛАКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

А.А. Игнатьев, М.А. Затевахин, Т.Н. Корохов
ОАО «Санкт-Петербургский научно-исследовательский и проектно-
конструкторский институт «АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ»

191036, Санкт-Петербург, ул. 2-я Советская, дом 9/2а.

ignat2000@gmail.com

Аннотация

На основе трехмерных уравнений гидродинамики разработана численная LES модель полей конвективных облаков и параллельная компьютерная программа с использованием библиотеки MPI. В программе применен оригинальный параллельный метод решения уравнения Пуассона, не требующий формирования разреженных матриц. Проведено тестирование программы на примере расчета поля пассатных облаков и исследована статистика водности облачного поля.

Ключевые слова: параллельные вычисления, поля конвективных облаков, LES модель, водность, функция распределения.

LES SIMULATION OF CONVECTIVE CLOUDS FIELDS WITH USAGE OF PARALLEL COMPUTATION

A.A.Ignatyev

Abstract

Numerical LES model of convective clouds and MPI parallel code based on 3D hydrodynamics equations in Boussinesq approximation are developed. In code the original method for solving of Poisson equation without sparse matrix usage is applied. Some trade wind clouds tests and investigation of liquid water content in cloud fields are carried out.

Keywords: parallel computation, cumulus clouds fields, LES model, liquid water content, probability distribution function.

Поля кучевых облаков играют чрезвычайно важную роль в формировании погоды и климата всей Земли. Они существенно влияют на термический режим атмосферы и земной поверхности, поглощая и отражая солнечную радиацию. Задача численного моделирования полей облаков весьма сложна. Обычно в этих случаях применяют какую-либо численную модель отдельного облака совместно со статистическими характеристиками ансамблей облаков, полученных в результате прямых наблюдений. К сожалению, к настоящему времени в таких моделях достигнут лишь незначительный прогресс в силу недостатка надежной статистики. Подробные экспериментальные данные по статистике водности (функции распределения) практически отсутствуют в литературе в силу дороговизны самолетных наблюдений в атмосфере.

В настоящей работе предпринята попытка восполнить этот недостаток с помощью вычислительного эксперимента с использованием суперкомпьютеров и исследовать статистику водности в облачных полях. Для этого была разработана численная модель полей облаков на основе решения уравнений гидродинамики в приближении Буссинеска с привлечением модели больших вихрей для моделирования турбулентности (LES – Large Eddy Simulation) [1,2]. LES моделирование позволяет напрямую воспроизводить в решении турбулентные пульсации крупных и средних масштабов и, таким образом, почти полностью избегать применения полуэмпирических подходов, что повышает надежность получаемых результатов.

На основе построенной модели был разработан вычислительный алгоритм решения основных уравнений и параллельная программа с использованием библиотеки MPI. Как известно, для численного решения уравнений гидродинамики несжимаемой жидкости на каждом шаге по времени необходимо решать уравнение Пуассона. Для его решения был разработан простой и оригинальный параллельный метод [3], который не требовал формирования массивов разреженных матриц и привлечения сторонних параллельных библиотек (таких как PETSC и др.). Программа и модель были тщательно верифицированы на примере расчета полей облаков в пассатной зоне и показано удовлетворительное согласие с имеющимися в литературе данными наблюдений для вертикальных распределений турбулентных потоков тепла, влаги и импульса. Расчеты проводились на трех сетках, содержащих 100 тыс., 1.3 млн. и 10 млн. ячеек, соответственно. Даже для средней (и тем более для самой мелкой) сетки применение параллельных вычислений оказалось принципиально важным и позволило за разумное время проводить множественные расчеты.

Так как LES моделирование позволяет получать в решении всю неоднородную пространственно-временную структуру турбулентного потока, то это дает возможность набора статистики различных характеристик облачного поля во времени. Поэтому было проведено исследование статистики водности в облачном слое и получена новая функция распределения плотности вероятности водности. Было выявлено, что эта функция представляет собой убывающую экспоненту с одной характерной точкой на оси водности, где скорость убывания экспоненты изменяется скачком. Наличие этой характерной точки на оси водности обнаруживалось во всех расчетах, которые были проведены, как для пассатной зоны, так и для средних широт. Поэтому это значение водности может быть выбрано за некоторый характерный масштаб. Этот факт ранее не был замечен исследователями. На рисунке 1 показано поле изоповерхности водности (10^{-5} кг/кг) облачного поля, представляющие собой облака. Из рисунка хорошо виден уровень конденсации, совпадающий с нижней кромкой облаков (около 600 м). Верхушки облаков после двух-трех часов физического времени достигают высоты около 1500 м. Облака имеют вид наклонных башенок из-за сдвига ветра, характерных для пассатной облачности.

Расчеты были выполнены на параллельном кластере МГУ “Чебышев”.

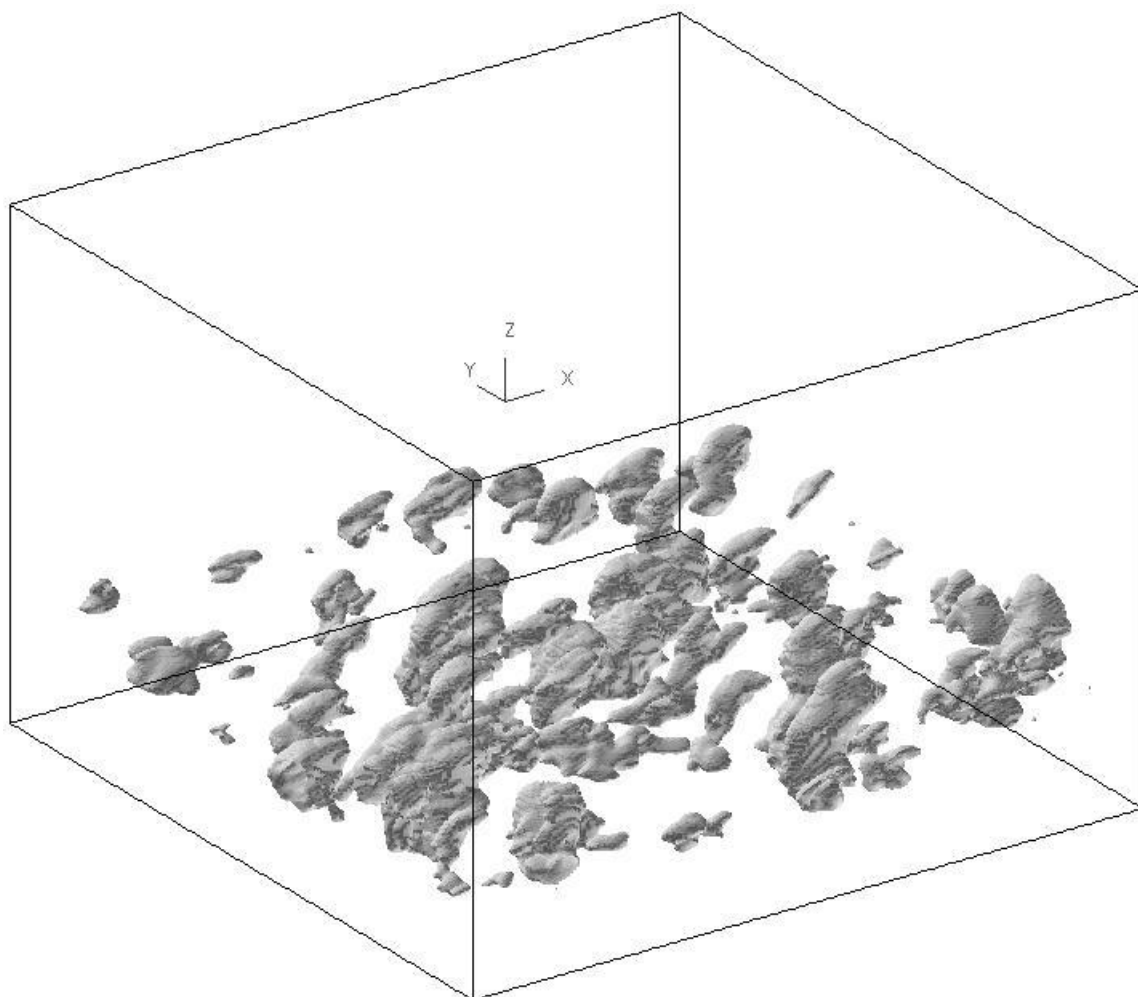


Рис. 1 Поле пассатных облаков. Показана расчетная изоповерхность
 влажности (10^{-5} кг/кг). Расчет на сетке 192x192x280 ячеек.

Литература

1. *Игнатьев А.А.* LES модель полей конвективных облаков. // Труды ГГО, Вып. 564, 2011, с. 104-125.
2. *Cuijpers, J.W.M., Duynkerke, P.G.*, Large eddy simulation of trade cumulus clouds // J. Atmos. Sci., v. 50, 1993, p. 3894-3908.
3. *А.А. Игнатьев, М.А. Затевахин.* Параллельный метод для решения уравнения Пуассона. Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2009): Труды международной научной конференции (Нижний Новгород, 30 марта - 3 апреля 2009 г.). - Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2009. стр. 491-495.