

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ АЛГОРИТМЫ РЕШЕНИЯ МНОГОМЕРНЫХ УРАВНЕНИЙ АЭРОДИНАМИКИ И ПЕРЕНОСА

А.В. Старченко

Проблема математического моделирования динамики атмосферы давно привлекает внимание ученых разных стран. Это вызвано тем, что исследование процессов, происходящих в атмосфере, тесно связано с решением задач теории климата и прогноза, имеющих большое практическое значение. В последние годы интерес к ней возрос в связи с проблемой взаимодействия человечества с окружающей средой. Учитывая сложность постановки натурных экспериментов в реальных условиях, наиболее естественный подход к изучению и оценке влияния деятельности людей на атмосферу состоит в создании математических моделей, позволяющих с помощью ЭВМ оценить возмущения основных параметров, характеризующих состояние среды.

Теоретической основой математических моделей динамики атмосферы являются законы сохранения массы, импульса, момента количества движения и энергии. Численная реализация моделей атмосферного пограничного слоя и переноса примеси в силу сложности рассматриваемых процессов и значительных размеров области исследования во все времена требовали и продолжают требовать максимально возможные вычислительные ресурсы. При этом, несмотря на бурное развитие вычислительной техники (и суперкомпьютеров, в частности), начавшееся в 60-е годы прошлого столетия, разработчики всё ещё существенно ограничены в своих исследованиях вследствие нехватки вычислительных ресурсов.

Современные тенденции в развитии моделей атмосферного пограничного слоя направлены на повышение пространственного разрешения, включения в рассмотрение параметризации более широкого спектра атмосферных явлений. В новейших моделях переноса примеси принято учитывать химические и фотохимические реакции между загрязнителями. Таким образом, можно предположить, что использование атмосферными моделями максимальных возможностей современных компьютеров будет сохраняться, по всей видимости, еще очень долго.

Эффективным способом сокращения времени расчета, активно осваиваемым в настоящее время, является применение вычислительных систем с параллельной архитектурой. Принцип работы таких ЭВМ основан на том, что некоторые части вычислительного алгоритма могут выполняться независимо друг от друга, то есть параллельно. В случае если доля независимых, т.е. распараллеливаемых частей алгоритма велика, отношение времени работы алгоритма ко времени работы распараллеленного алгоритма (то есть ускорение) может оказаться значительным.

При моделировании атмосферных процессов можно выделить два основных способа параллельной реализации алгоритмов: распараллеливание по физическим процессам и декомпозиция расчетной области. В первом случае параллельно выполняются вычислительные потоки (процессы) занятые реализацией принципиально разных задач: например, вычисление концентраций химических соединений, не связанных общими реакциями. При таком выборе метода распараллеливания неизбежно возникает проблема балансировки, то есть обеспечения равномерного распределения вычислительной нагрузки между параллельными процессами. Чем лучше выполнена балансировка, тем меньше времени будет выполняться задача в целом.

Более универсальным является подход, опирающийся на декомпозицию расчетной области. При этом область исследования разделяется на подобласти, число которых равно числу процессов, ведущих расчеты независимо друг от друга. В этом случае объемы вычислительной нагрузки на процессы напрямую определяются равномерностью декомпозиции расчетной области и должны быть, если не одинаковы, то, по крайней мере, очень близки между собой.

В данной работе построены схемы высокого порядка аппроксимации по пространству (до шестого порядка) и по времени (до третьего порядка) для численного решения уравнения переноса. Основными требованиями к получаемым приближенным решениям были монотонность. Для построенных явных разностных схем определены условия устойчивости и на известных тестовых задачах продемонстрированы искомые свойства разностных схем.

Для численного решения многомерных сеточных уравнений, возникающих в результате конечно-разностной аппроксимации нестационарных многомерных нелинейных задач, разработаны параллельные алгоритмы. Отдельно рассмотрены подходы для распараллеливания явных и неявных разностных схем. На примере явных разностных схем для трехмерного уравнения переноса проведен анализ и дано обоснование преимущества выбора неоднородной геометрической декомпозиции сеточной области при построении параллельных программ для многопроцессорных вычислительных систем с большим количеством вычислительных узлов. На вычислительном кластере ТГУ СКИФ Cyberia выполнены расчеты, подтверждающие выводы выполненного теоретического анализа эффективности созданных параллельных программ в зависимости от выбора схем декомпозиции области исследования.

Разработанные разностные схемы и параллельные алгоритмы их численной реализации были применены для исследования метеорологических ситуаций над территорией юга Западной Сибири. Вычисления проводились на кластере СКИФ Siberia и показали высокую эффективность разработанного специализированного программного обеспечения, не уступающего лучшим зарубежным образцам (мезомасштабные метеорологические модели MM5 и WRF). Также хорошее согласование имеется и по качеству воспроизведения реальных метеорологических ситуаций.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (№ 07-05-01126) и научно-технической программы «СКИФ-ГРИД».