

Математическое моделирование качества атмосферного воздуха и циркуляции воздушных масс над городами с использованием суперкомпьютеров



14 Математическое моделирование качества атмосферного воздуха и циркуляции воздушных масс над городами с использованием суперкомпьютеров

Исследования локальной погоды и химического состава воздуха в масштабе города имеют большое значение как для поддержания высокого качества жизни горожан, так и для административного регулирования выбросов вредных веществ в атмосферу. Особое значение такие исследования приобретают в связи с требованиями обеспечения экологической безопасности крупных мегаполисов. Озон является основным компонентом фотохимического смога, который часто образуется над городами с интенсивным движением автотранспорта в ясные дни. Особую опасность представляют повышенные приземные концентрации тропосферного озона — вещества первой категории опасности.

АВТОРЫ:

А.В. Старченко — зав. кафедрой, докт. физ.-мат. наук, профессор, Томский государственный университет, *e-mail: starcf@math.tsu.ru*

Д.А. Беликов — доцент, канд. физ.-мат. наук, Томский государственный университет

Р.Б. Нутерман — ст. научн. сотрудник, канд. физ.-мат. наук, Томский государственный университет

В настоящее время более половины населения планеты живут в городах, причем количество городов и их размеры постоянно увеличиваются. Такой быстрый и иногда хаотичный рост урбанизированной территории ведет к появлению целого ряда экологических проблем, часть из которых связана с загрязнением атмосферы, и для общества необходимо иметь средства для понимания и поиска путей решения таких проблем.

Исследования локальной погоды и связанного с ее изменением химического состава воздуха в масштабе города имеют большое значение для поддержания высокого качества жизни населения и служат во всем мире основой для административного регулирования выбросов вредных веществ в атмосферу. Особое значение такие исследования приобретают в связи с требованиями обеспечения экологической безопасности крупных мегаполисов, где формируется такое антропогенное атмосферное явление, как городской «остров тепла» [1] с разностью температур для города и пригорода в несколько градусов. Именно за счет такой разности температур при штилевых условиях в атмосферном пограничном слое формируется специфическая для города циркуляция воздушных масс, которая может привести к возникновению локальных неблагоприятных экологических условий в черте крупных городов или их окрестности.

Исследования погоды и состава атмосферного воздуха обычно проводятся наземными метеостанциями, передвижными пунктами измерения качества воздуха, реже — с использованием приборов зондирования вертикальной структуры приземного слоя атмосферы. Однако получаемые в результате выполненной измерительной кампании локальные результаты не дают полной картины загрязненности воздуха, поскольку предоставляют лишь значения концентраций отдельных компонентов состава воздуха при ограниченном числе наблюдений (как в пространстве, так и во времени). Кроме того, не всегда доступная при измерениях информация помогает установить правильную причинно-следственную связь между локальной метеорологической ситуацией и качеством приземного атмосферного воздуха в отдельных районах города или выбранных уличных каньонах, поэтому в сложившейся ситуации результаты действия городской администрации могут быть не в полной мере эффективны.

Другим способом получения количественных характеристик о состоянии приземного воздуха в городе являются методы математического моделирования. Суть этого подхода заключается в замене изучаемого явления или процесса математической моделью, которая, как правило, включает в себя законы сохранения массы, импульса и энергии и дополнительные условия, обеспечивающие нахождение единственного решения. При математическом моделировании распространения

газообразных примесей в воздухе получается система сложных дифференциальных и алгебраических уравнений для таких параметров атмосферы, как скорость движения воздуха, его влажность, температура, плотность, давление, турбулентность, концентрации малых составляющих атмосферного воздуха (все они зависят от времени и положения наблюдателя), которая на настоящем этапе развития методов математического анализа может быть решена только приближенно с использованием современной вычислительной техники (рис. 1).

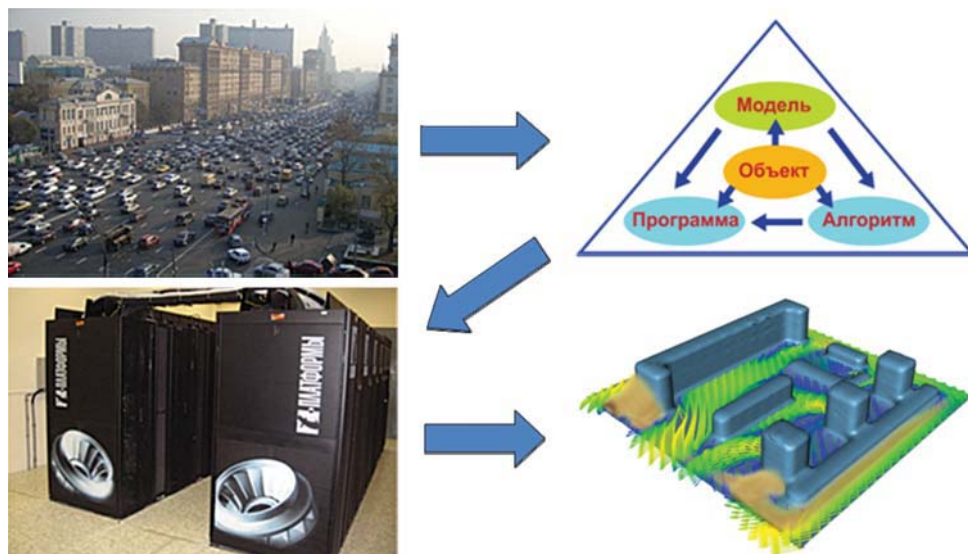


Рис. 1. Математическое моделирование движения воздушных масс и переноса примеси с использованием суперкомпьютеров

Численное решение рассматриваемой проблемы исследования качества атмосферного воздуха получается следующим образом. Вся область исследования (как правило, это параллелепипед $50 \times 50 \times 5$ км, в середине основания которого располагается город) разбивается на огромное количество (более миллиона) непесекающихся объемов с размером $0,5-1$ км по направлениям «запад—восток», «юг—север» и $10-50$ м по вертикальному направлению (рис. 2). Каждый такой объем характеризуется своими значениями рассчитываемых параметров атмосферы (скорости, влажности, осадков, температуры, турбулентности, концентрации и т.п.), которые изменяются с течением времени с некоторым заданным наперед ша-

гом. Эти значения определяются для каждого интересующего момента времени на основе решения больших систем линейных уравнений, получающихся в результате приближенного представления производных в дифференциальной задаче. В итоге рассматриваемая математическая модель распространения примеси в приземном слое воздуха сводится к многократному (для различных моментов времени) решению системы линейных уравнений, содержащей несколько миллионов неизвестных.

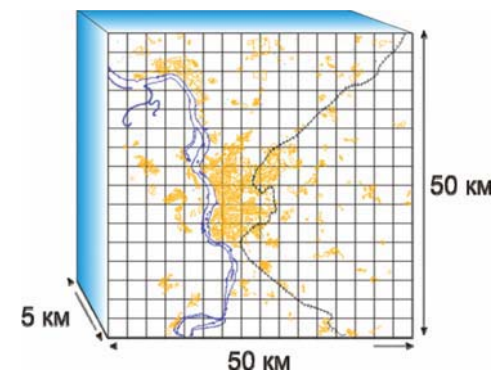


Рис. 2. Вычислительная сетка для области исследования

В вычислительном плане такая задача представляет определенную трудность для обычного персонального компьютера, поскольку получение интересующего результата может затянуться на несколько десятков часов вычислений, когда найденное решение может потерять свою актуальность. Очевидным является то, что применение суперкомпьютеров для решения подобной задачи охраны окружающей среды и прогнозирования «химической» погоды в населенных пунктах чрезвычайно актуально.

В настоящее время в крупных городах мира (например, Лондон, Оттава, Копенгаген, Париж, Филадельфия и др.) для мониторинга состояния загрязнения воздушного бассейна используются информационно-измерительные или информационно-вычислительные системы, которые на основе результатов мониторинга и математического моделирования в оперативном режиме через интернет предоставляют администрации и населению данные о состоянии окружающей среды.

В данной работе предлагается применить комплекс математических моделей городской метеорологии и переноса примеси не только для исследования, но и краткосрочного прогнозирования (до 12 часов) качества атмосферного воздуха в крупном населенном пункте с использованием суперкомпьютера. Способ создания параллельного приложения для многопроцессорной вычислительной системы с распределенной памятью опирается на применение принципа геометрической

декомпозиции, когда вся область исследования равномерно распределяется между имеющимися в распоряжении вычислительными устройствами. На рис.3 представлен пример двумерной декомпозиции для случая использования четырехпроцессорного вычислителя, причем каждый процессор проводит расчеты метеорологии и химического состава атмосферы в «своей» подобласти. Такой подход позволяет существенно, почти пропорционально числу используемых процессоров ускорить получение искомого результата.

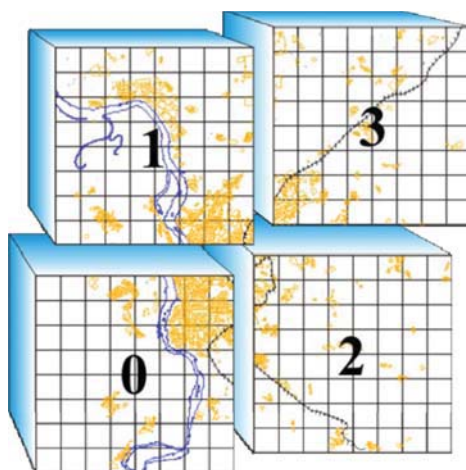


Рис. 3. Двумерная декомпозиция области исследования для четырехпроцессорного вычислительного устройства

На рис. 4 приведены результаты расчета на вычислительном кластере Томского государственного университета «СКИФ Cyberia» распределения над городом Томск приземной концентрации озона для двух моментов времени. Озон является основным компонентом фотохимического смога, который часто образуется над городами с интенсивным движением автотранспорта в ясные дни. Особую опасность представляют повышенные приземные концентрации тропосферного озона — вещества первой категории опасности. Из рисунка видно, что в утренние часы концентрация озона в городе снижается за счет его взаимодействия с поступающим с выбросами оксидом азота, причем за счет сноса примеси ветром на юго-востоке от города образуется след пониженной концентрации озона. Во второй половине дня, когда интенсивность фотохимических реакций близка к максимальной, ситуация меняется существенно: к юго-востоку от города на расстоянии 10—15 км концентрация озона становится максимальной.

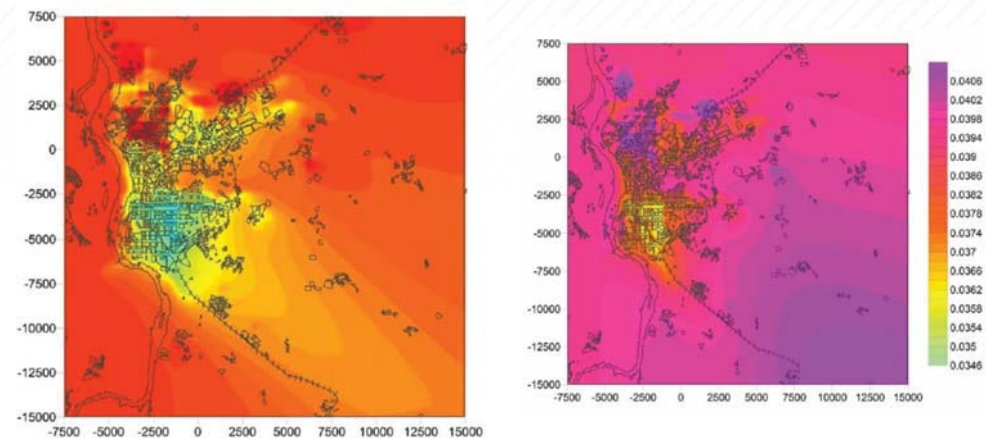


Рис. 4. Распределение концентрации озона (ppm) над городом и его окрестностями 27 мая 2004 г. в 10:00 и 16:00 часов соответственно

Применение в расчетах вычислительного кластера «СКИФ Cyberia» позволяет более чем в пятьдесят раз сократить время вычислений, доведя время проведения численного прогноза до нескольких минут.

Работа выполняется при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований и программы Союзного государства «СКИФ ГРИД».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матвеев Л. Т., Матвеев Ю. Л. Формирование и особенности острова тепла в большом городе // Доклады АН. 2000. Т. 370. № 2. С. 249-252.
2. Старченко А.В. Численное моделирование городской и региональной атмосферы и оценка ее влияния на перенос примеси // Вычислительные технологии. 2004. Т.9. Ч.2. С.98-107.
3. Беликов Д.А., Старченко А.В. Исследование образования вторичных загрязнителей (озона) в атмосфере города // Оптика атмосферы и океана. 2005. Т.18. №5-6. С.435-443.
4. Нутерман Р.Б., Старченко А.В. Пространственная модель для прогноза распространения выбросов автотранспорта в элементах городской застройки // Оптика атмосферы и океана. 2007. Т.20. №10. С.917-921.