

О ПРИМЕНЕНИИ МНОГОПРОЦЕССОРНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕГИОНАЛЬНОГО ПЕРЕНОСА ПРИМЕСЕЙ В АТМОСФЕРЕ

В. Б. Киселев, М. М. Нестеров

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН,
199178 Санкт-Петербург, 14-ая линия В.О., д. 39
kisselev@epr.pu.ru

УДК 519.95+502.7(203)

В. Б. Киселев, М. М. Нестеров. **О применении многопроцессорных вычислительных комплексов для моделирования регионального переноса примесей в атмосфере** // Труды СПИИРАН. Вып. 1, т. 1. — СПб: СПИИРАН, 2002.

Аннотация. *Разработка эффективной стратегии снижения регионального загрязнения атмосферы требует выполнения быстрых оценок как существующего уровня загрязнения, так и достигаемого в результате проведения мероприятий по уменьшению промышленных выбросов. Для ускорения соответствующих расчетов эйлерово-лагранжева схема моделирования регионального переноса загрязнения была модифицирована для реализации на многопроцессорных комплексах. Созданная программа испытывалась на трех многопроцессорных системах с локальной памятью в различных программных средах. Полученные результаты показали перспективность применения высокопроизводительных вычислительных систем в задачах управления состоянием природной среды.* — Библ.12 назв.

UDC 519.95+502.7(203)

V. B. Kisselev, M. M. Nesterov. **On the application of multiprocessor computer systems for modelling of regional atmospheric pollutant transport** // SPIIRAS Proceeding. Issue 1, v. 1. — SPb.: SPIIRAS, 2002.

Abstract. *Development of an effective strategy of the reduction of air pollution in the regional scale requires fast estimation of both existing pollution level and that resulting from the different possible sets of measures affecting the pollutant emissions from industrial sources. In order to accelerate the necessary calculations the Euleran-Lagrangian scheme for regional air pollution modelling and the corresponding computer code were modified for multiprocessor systems. The code was tested on three systems with local memory and different software environment. The results demonstrated the effectiveness of high performance computing in the field of environmental management.* — Bibl. 12 items.

Снижение антропогенных воздействий на природные объекты является одной из основных задач системы управления средой обитания человека [1, 2]. Самый распространенный тип антропогенного воздействия — это выброс в окружающую среду различного рода промышленных отходов, оказывающих пагубное воздействие на растительный и животный мир. Выброшенные вещества включаются в естественный круговорот, претерпевают сложные химические трансформации и, удаляясь от породившего их источника, распространяются по всей окружающей среде. Наиболее интенсивно и многообразно эти процессы протекают в случае поступления веществ в атмосферу вследствие ее высокой пространственной мобильности.

Выбрасываемые в атмосферу промышленными предприятиями вещества или, другими словами, атмосферные примеси могут переноситься воздушными потоками на расстояния, достигающие сотен и даже тысяч километров. При этом они аккумулируются облаками, захватываются осадками и выпадают вместе с ними на подстилающую поверхность. Кроме того, частицы примеси оседают под воздействием силы тяжести, а также захватываются поверхностью

почвы вследствие протекающих при этом химических реакций. Накопление в почве поступивших из атмосферы вредных примесей может приводить к снижению ее плодородия, подавлению растительности, загрязнению выращиваемых пищевых культур и ряду других неблагоприятных эффектов. Если такие эффекты наблюдаются, то необходимость снижения промышленных выбросов очевидна. Вместе с тем, ясно, что при наличии на местности значительного количества источников желаемое доведение антропогенной нагрузки на природу до допустимого уровня может быть достигнуто снижением выбросов как из одной, так и из другой группы источников, и для рационального решения вопроса о том, выбросы каких именно предприятий нужно снижать с тем, чтобы для получения нужного результата требовалось наименьшее количество ресурсов, требуются предварительные исследования.

Разработку оптимального комплекса мероприятий по снижению промышленных выбросов в атмосферу наиболее естественно осуществлять на основе имитационного моделирования процессов распространения примесей. Это требует, однако, проведения большого количества расчетов вследствие необходимости, во-первых, охватить все возможные метеорологические условия и, во-вторых, рассмотреть большое количество сценариев снижения выбросов из различных источников с целью выбора из них наилучшего. Для того, чтобы выполнить перебор достаточного для обеспечения надежного результата количества вариантов за разумный промежуток времени, время расчета варианта должно быть достаточно малым. Снижения времени расчета можно достичь применением как эффективных разностных схем решения уравнения переноса примеси, так и быстродействующих компьютеров. Рассматриваемая в данной работе методология моделирования регионального переноса примесей использует оба указанных способа ускорения вычислений, что делает ее пригодной для практического применения при управлении состоянием окружающей среды.

Моделирование переноса примесей в атмосфере основывается на решении уравнения турбулентной диффузии [3]:

$$\frac{dq}{dt} = \frac{\partial q}{\partial t} + u \frac{\partial q}{\partial x} + v \frac{\partial q}{\partial y} + w \frac{\partial q}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} K_x \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} K_y \frac{\partial q}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} K_z \frac{\partial q}{\partial z} + Q, \quad (1)$$

где q — концентрация примеси, u, v, w — компоненты скорости ветра, K_x, K_y, K_z — компоненты тензора турбулентной диффузии, Q — мощность всех источников примеси, включающая как поступление примеси в атмосферу, так и ее образование непосредственно в атмосфере вследствие химических реакций, t — время, x, y, z — пространственные координаты неподвижной системы отсчета. Полная производная здесь обозначает производную по времени в системе координат, движущейся вместе с потоком атмосферного воздуха.

Существуют два основных подхода к решению уравнения (1). При использовании первого из них, называемого эйлеровым, используется неподвижная система координат. В численной его реализации производные тем или иным способом заменяются конечными разностями и задача тем самым сводится к решению системы алгебраических уравнений. Эйлеров подход достаточно универсален, но к его недостаткам относится возникновение при его использовании так называемой “численной диффузии”. Численная диффузия является следствием конечно-разностной аппроксимации производных и приводит к значительно более интенсивному, чем в действительности “размазыванию” приме-

си по пространству, которое происходит тем сильнее, чем крупнее шаг пространственной сетки, выбранный для дискретизации уравнения. Снижение влияния численной диффузии возможно путем уменьшения пространственного шага разностной схемы, но это вызывает при больших размерах рассматриваемой пространственной области существенное возрастание размерности возникающей алгебраической системы уравнений и резкое увеличение времени решения задачи.

От указанного недостатка свободен второй, называемый лагранжевым, подход к решению уравнения (1). В нем используется подвижная, связанная с потоком воздуха система координат. В численной реализации этого подхода пространственное распределение примеси представляется в виде суперпозиции концентраций примеси в дискретных клубах, порождаемых на каждом временном шаге расположенными на местности источниками. Клубы примеси перемещаются по рассматриваемой области со скоростью ветра, и их размер увеличивается, а концентрация примеси в них, соответственно, уменьшается, со скоростью, определяющейся значениями компонентов тензора турбулентной диффузии. Процессы переноса и расплывания клуба в лагранжевом подходе рассматриваются как не зависящие один от другого. Их разделение и позволяет избежать погрешностей, связанных с численной диффузией. Вместе с тем, лагранжева схема не позволяет правильно учесть трансформацию примеси, описываемую источником членом в уравнении диффузии, в случае, если в нем присутствуют нелинейные зависимости. Это является следствием того, что в лагранжевой схеме концентрации примеси в каждом из переносимых клубов рассчитываются независимо, а суммарная концентрация получается на последнем этапе как суперпозиция концентраций, создаваемых отдельными клубами. В то же время, для правильного вычисления скорости трансформации в нелинейные члены в каждый момент времени должна подставляться суммарная, создаваемая всеми клубами концентрация, а это не позволяет вести расчет независимо для каждого клуба, как это принято в лагранжевой схеме. Поскольку нелинейные зависимости типичны для химических реакций между различными загрязняющими веществами в атмосфере и их учет, как правило, необходим, чисто лагранжев подход в задачах расчета переноса атмосферных примесей также имеет существенные недостатки.

Исходя из вышесказанного, целесообразно для построения достаточно эффективной для практического применения модели переноса загрязняющих веществ в атмосферном воздухе в случае значительных размеров рассматриваемой пространственной области использовать комбинированную лагранжево-эйлерову расчетную схему [4]. В ней, как в лагранжевом подходе, примесь считается сосредоточенной в дискретных клубах, перемещающихся со скоростью атмосферных потоков. Одновременно, как в эйлеровом подходе, на местности строится регулярная пространственная сетка, и на каждом временном шаге все клубы, находящиеся в ячейке этой сетки “сливаются”, и скорость реакций вычисляется для суммарной концентрации в ячейке. Чередование лагранжевых и эйлеровых операций позволяет правильно учесть химические реакции в атмосфере, сохраняя в то же время возможность использования крупного пространственного шага.

На основе такой схемы была построена модель переноса примесей в атмосфере, ориентированная на расчет регионального и межрегионального переноса атмосферного загрязнения для применения получаемых из нее результатов в системах поддержки принятия решений (СППР) по управлению состоя-

нием окружающей природной среды [5, 6]. Ориентация на СППР, где, как отмечалось выше, требуется достаточно оперативное получение конечного результата, во многом определяет принятые в модели допущения. Учитывалось также, что решения по управлению окружающей средой носят, как правило, стратегический, долговременный характер, и, соответственно, получаемые из модели величины должны определять долговременные средние характеристики состояния среды, отвлекаясь от кратковременных и мелкомасштабных флуктуаций.

В построенной модели положение клубов примеси характеризуется значениями прямоугольных координат на полярной стереографической проекции северного полушария. Формулы преобразования географических координат в используемые прямоугольные имеют вид:

$$\begin{aligned} x &= Y_{\max} \frac{\cos \phi \sin(\psi - \psi_0)}{1 + \sin \phi} + X_0 \\ y &= -Y_{\max} \frac{\cos \phi \cos(\psi - \psi_0)}{1 + \sin \phi} + Y_0 \end{aligned} \quad (2)$$

где ϕ , ψ — географическая широта и долгота точки; ψ_0 — меридиан, параллельный оси y ; X_0 и Y_0 — координаты полюса в прямоугольной системе координат. Значения параметров сетки Y_{\max} , X_0 , Y_0 и ψ_0 определяются длиной единичного интервала прямоугольных координат в средних широтах.

Источники примеси считаются расположенными внутри квадратов регулярной в полярных стереографических координатах сетки. Клубы примеси генерируются источниками на каждом временном шаге. При этом если в момент генерации в результате предшествующего переноса в какой-либо ячейке сетки нет ни одного клуба, то в ней генерируется новый клуб, расположенный в случайной точке ячейки и содержащий примеси, выброшенные из всех источников в ячейке за временной шаг. Если же в ячейке уже имеется клуб, то количества выброшенных из данной ячейки за временной шаг примесей суммируются с содержащимися в этом клубе.

Модель является однослойной, то есть в ней принято фиксированное распределение примеси по вертикали, а горизонтальное распределение определяется наложением концентраций примесей в клубах, изменение координат которых за временной шаг определяется формулами:

$$\begin{aligned} \Delta x &= u(x, y, t) \Delta t \\ \Delta y &= v(x, y, t) \Delta t, \end{aligned} \quad (3)$$

где u и v — скорости ветра в полярных стереографических координатах.

В процессе переноса примесь поглощается почвой (этот процесс принято называть “сухим осаждением”) и вымывается осадками. При расчете сухого осаждения принимается линейный профиль концентраций примесей, который учитывает диффузионное сопротивление оседанию. Поток примеси на единицу подстилающей поверхности соответственно имеет вид:

$$P = u_d g c, \quad (4)$$

где u_d — скорость сухого осаждения; c — концентрация примеси; g — поправочный множитель, учитывающий диффузионное сопротивление и имеющий вид:

$$g = 1 / \left(1 + \frac{u_d h}{2K} \right), \quad (5)$$

где K — коэффициент вертикальной диффузии; h — высота слоя перемешивания примесей. Скорости сухого осаждения для конкретных веществ принимаются согласно [4].

Поток вымываемой осадками примеси на единицу подстилающей поверхности имеет вид:

$$P = \Lambda R c, \quad (6)$$

где Λ — эффективность захвата примеси, R — интенсивность осадков. Эффективности захвата примесей взяты из [7].

Процессы химической трансформации в модели зависят от конкретных примесей. Рассматриваемые ниже численные эксперименты выполнены с версией модели, ориентированной на расчет переноса наиболее распространенных веществ, таких как окислы серы и азота, аммиак и летучие органические соединения. В нее включены реакции перехода сернистого газа в сульфаты, реакции азотного цикла с участием углеводородных соединений и озона, образования соединений аммония. Путем исключения промежуточных продуктов схема химических трансформаций сводится к двенадцати реакциям, константы скоростей которых взяты из [4].

Как видно из уравнений (3)–(6), исходными данными для расчетов по модели являются временные ряды метеорологических переменных, а именно скорости ветра, полей осадков и облачности (последняя используется для определения интенсивности солнечной радиации при вычислении скоростей фотохимических реакций). Традиционный подход в моделировании переноса примесей на большие расстояния заключается в использовании в этом качестве результатов объективного анализа данных ежедневных натуральных наблюдений на метеорологической сети [4, 7]. Это требует организации поставки и хранения больших массивов информации, что, безусловно, затрудняет проведение расчетов. Вместе с тем, представляется естественным для моделей, предназначенных для расчета долгопериодных средних характеристик загрязнения (а рассматриваемая модель предназначена для расчета именно таких характеристик), в качестве входных данных использовать также только долгопериодные средние (климатологические) характеристики требуемых метеозаэlementов, существенно облегчив тем самым подготовку исходных данных. Однако непосредственное использование долгопериодных средних в выражениях (3)–(6) было бы некорректным, поскольку интенсивность описываемых вышеуказанными выражениями процессов зависит не от долговременных средних, а от мгновенных значений входящих в них метеорологических параметров. В связи с этим в модели использована следующая методология. Временная последовательность мгновенных значений метеорологических переменных (скорости ветра, облачности, интенсивности осадков и т.д.) генерируется специально разработанной стохастической метеорологической моделью. Совокупность случай-

ных процессов, образующих эту модель, строится таким образом, чтобы статистические характеристики (средние значения, дисперсии, коэффициенты корреляции) генерируемых величин совпадали с соответствующими климатологическими значениями. Таким образом, появляется возможность использовать в формулах (3)–(6) сгенерированные мгновенные значения метеоэлементов, основываясь на входной информации, состоящей исключительно из долгопериодных средних.

Скорость ветра в метеорологической модели генерируется уравнением авторегрессии вида:

$$\begin{aligned} u_x^{(i)} &= \alpha u_x^{(i-1)} + (1 - \alpha) u_a + \varepsilon_x^{(i)} \\ u_y^{(i)} &= \alpha u_y^{(i-1)} + \varepsilon_y^{(i-1)} \end{aligned} \quad (7)$$

где i — номер шага генерации; ε_x , ε_y — случайные числа из гауссового распределения с нулевым средним и дисперсиями $(1 - \alpha^2)\sigma_x^2$ и $(1 - \alpha^2)\sigma_y^2$, соответственно, $u_x^{(i)}$ и $u_y^{(i)}$ — компоненты скорости ветра на i -ом шаге вдоль и поперек направления среднего ветра, u_a — модуль среднего вектора скорости ветра, α — коэффициент корреляции скорости ветра на соседних временных шагах, дисперсии σ_x^2 и σ_y^2 выбираются такими, чтобы генерируемые процессом (7) средняя скорость ветра и роза ветров совпадали с их климатологическими значениями для исследуемой местности. Поле ветра полагается однородным для всей рассматриваемой области, что ограничивает применимость модели пространственными масштабами порядка 500 км.

Для обеспечения пространственной структуры облачности близкой к реальной ее генерация в модели осуществляется в виде полос фиксированной ширины и параллельных одной из осей координат. Принято, что положение полосы при ее возникновении является случайной величиной с равномерным распределением, а существование полосы облачности определяется марковским процессом с двумя состояниями (наличие и отсутствие полосы) и переходной матрицей:

$$P = \begin{pmatrix} p(l|l) & p(l|nl) \\ p(nl|l) & p(nl|nl) \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где $p(l|l)$ — вероятность сохранения полосы на временном шаге, $p(l|nl)$ — вероятность появления полосы при ее отсутствии, $p(nl|l)$ — вероятность исчезновения полосы, $p(nl|nl)$ — вероятность сохранения ясного неба. Вероятности в матрице P выбираются так, чтобы в каждой точке области вероятность наличия облачности и средняя продолжительность ее существования соответствовали климатологическим значениям. Вероятности балла облачности в полосе принимаются пропорциональными количеству дней с соответствующим баллом облачности.

Схема генерации осадков также основана на марковском процессе с двумя состояниями (наличие и отсутствие осадков) и переходной матрицей по структуре аналогичной (8). Осадки генерируются независимо в каждом квадрате при наличии в нем облачности выше четырех баллов, причем вероятность возникновения осадков зависит от балла облачности. Интенсивность осадков полагается случайным числом с логарифмически-нормальным распределением. Вероятности начала и прекращения осадков, а также параметры распределения

их интенсивности выбираются из соображений равенства порождаемых случайным процессом среднего количества осадков в году, средней продолжительности осадков и среднего количества в году дней с осадками их климатологическим значениям. При этом пятнистость поля осадков учитывается путем введения коэффициента заполнения осадками квадрата расчетной сетки.

Подробности схемы генерации метеоэлементов и формулы для вычисления параметров случайных процессов по климатологическим характеристикам приведены в [5, 6].

Поле температуры, используемое для вычисления интенсивности химических реакций, полагается однородным во всей пространственной области и изменяющимся во времени по периодическому закону, включающему суточный и годовой ход. Амплитуды периодических функций выбираются из условия их соответствия климатологическим дневным и ночным температурам в различные сезоны.

Программная реализация описанной модели на персональном компьютере успешно используется для практических расчетов переноса различных веществ в региональном масштабе [8–10]. При этом возможна оценка эффективности различных вариантов снижения выбросов, но поиск оптимального решения все же затруднен из-за сравнительно большого времени прогона одного варианта. В связи с этим была разработана версия программы, допускающая параллелизацию вычислений и предназначенная для многопроцессорных комплексов.

Распараллеливание предложенной вычислительной схемы наиболее естественно осуществляется на основе пространственной декомпозиции задачи. При таком подходе рассматриваемая двумерная область разбивается на приблизительно равные прямоугольники, и каждый из используемых процессоров выполняет операции с клубами находящимися в одном из прямоугольников. Здесь возможно использование вычислительных систем, как с общей, так и локальной памятью. Во втором случае перемещение клубов вызывает пересылку информации между отдельными областями памяти процессоров, и эффективность распараллеливания определяется, главным образом, отношением времени выполнения арифметических операций в каждой области к времени, затрачиваемому на межпроцессорный обмен. Поскольку в случае наличия химических реакций требуются большие затраты процессорного времени на вычисления количеств образующихся и распадающихся веществ на каждом временном шаге, применение систем с локальной памятью представляется целесообразным.

Многопроцессорные версии программы для решения задачи регионального переноса примесей разработаны для вычислительной системы PARSYTEC Института высокопроизводительных вычислений и баз данных (ИБВиБД) и многопроцессорного вычислительного кластера Санкт-Петербургского государственного университета (СПбГУ). В ИБВиБД расчеты проводились на суперкомпьютерах с разделенной памятью CC/16 с тактовой частотой процессоров 133 МГц и CSe/20 с тактовой частотой процессоров 300 МГц. В первой из систем межпроцессорный обмен организован на основе Ethernet-технологии (10 Мбит/с), во второй использован высокоскоростной межпроцессорный интерфейс обеспечивающий скорость передачи данных до 40 Мбайт/с. Кластер СПбГУ состоит из двухпроцессорных серверов Pentium III с тактовой частотой процессоров 600 МГц, а для межпроцессорного обмена использованы сетевые платы 3COM 905B-TX PCI 10/100 Base [11, 12]. Программная поддержка межпроцессорного обмена на компьютерах ИБВиБД осуществлялась средствами

системы PARIX, а на кластере СПбГУ — средствами библиотеки функций MPI (Message Passing Interface). Цель расчетов заключалась как в оценке эффективности параллельного алгоритма в целом, так и в сопоставлении возможностей его использования на различных вычислительных системах. Для этого было выполнено многократное решение типичной задачи регионального переноса, а именно расчет поступления в почву из атмосферы соединений серы и азота с учетом их химического взаимодействия с углеводородами на территории размером 450 км на 600 км по квадратам сетки со стороной около 25 км. Эффективность оценивалась на основе сведений о старт-стопном (астрономическом) времени решения задачи, поскольку именно астрономическое время, затрачиваемое на получение результата, в большинстве случаев наиболее интересно пользователю. Вместе с тем, прогоны осуществлялись при малой загрузке компьютера другими задачами, чтобы получить сведения, характеризующие исключительно рассматриваемую программу. Вследствие значительных различий тактовых частот процессоров использованных систем само старт-стопное время было существенно разным. Наивысшую скорость (в 2–4 раза больше других) обеспечивал, что вполне естественно, кластер СПбГУ. Данные, характеризующие соотношение затрат старт-стопного времени на этапах вычислений и межпроцессорного обмена, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики эффективности распараллеливания задачи регионального переноса атмосферных примесей.

Сетка процессоров	Число процессоров	CC/16		CCe/20		Кластер	
		Доля обмена	Ускорение	Доля обмена	Ускорение	Доля обмена	Ускорение
2x2	4	0,17	3,4	0,14	3,5	0,23	3,2
3x2	6	0,30	4,8	-	-	0,42	3,9
4x2	8	0,42	5,0	0,33	5,6	0,60	4,2
3x3	9	0,54	5,9	-	-	0,65	4,7
4x3	12	0,66	6,3	0,59	6,9	-	-

Как видно из приведенных данных, по критерию отношения затрат времени на обмен и вычисления для исследуемой задачи все три использованных системы обеспечивают близкие характеристики эффективности распараллеливания. Доля затрачиваемого на обмен данными времени составляет 15–20% при использовании четырех процессоров и достигает 60–70% для двенадцати процессоров. Соответственно, достигаемое ускорение расчетов, определяемое здесь как время решения задачи одним процессором к времени решения на многопроцессорной системе, возрастает медленнее, чем растет число процессоров, причем скорость роста примерно одинакова для всех систем. Из этого можно сделать вывод о том, что во всех трех системах такой показатель как отношение времени пересылки к времени выполнения арифметической операции имеет близкие значения. Несколько большую эффективность по критерию ускорения вычислений демонстрируют системы ИВВиБД, в особенности CCe/20.

Очевидно, что эффективность применения параллельных вычислений в конкретной задаче зависит от отношения количества арифметических операций на один процессор к объему межпроцессорных пересылок (также входящих на один процессор). Чем больше эта величина, тем эффективнее распараллеливание. Количество операций на один процессор при рациональной организации программы обратно пропорционально количеству процессоров, если пре-

небольшое количество обычно имеющимися подготовительными операциями по пересылке, как правило, занимающими незначительное время. В случае использования пространственной декомпозиции задачи можно приближенно считать, что количество пересылаемых данных пропорционально площади поверхности пространственной области, обрабатываемой одним процессором. Наибольшего значения при заданном числе процессоров эта величина и, соответственно, характеризующее эффективность вышеуказанное отношение, достигает при разбиении всей области вычислений на правильные подобласти (кубы, квадраты). Это правило подтверждается данными таблицы 1. Выбранная для тестовых расчетов пространственная область имеет приблизительно правильную форму, и, в соответствии с проведенными рассуждениями, наилучшим будет разбиение, при котором по каждой из пространственных переменных область делится на одинаковое количество частей. Как видно из таблицы, при переходе от разбиения на вытянутые прямоугольники (4 на 2) к более правильным прямоугольникам (3 на 3) вычисления резко ускоряются, несмотря на незначительность увеличения числа процессоров.

Если считать, что границей эффективного распараллеливания является такое число процессоров, при котором на обмен данными затрачивается столько же времени, сколько на вычисления, то для рассмотренной задачи можно признать целесообразным использование 6–8 процессоров. С увеличением геометрических размеров области расчетов, т.е. при рассмотрении переноса примесей на большие, чем в тестовом примере расстояния, это число будет возрастать.

Проведенные вычислительные эксперименты показывают, что многопроцессорные системы обеспечивают значительное ускорение расчетов, и поэтому их применение в задачах управления состоянием окружающей среды весьма перспективно. На основе таких систем становится возможным использование более детальных и, соответственно, более вычислительно сложных моделей природных явлений, например, учета внутренней структуры облачности и ее влияния на процессы осадкообразования в схемах влажного выпадения загрязняющих веществ на подстилающую поверхность.

Литература

- [1] *Yusupov R. M., Kisselev V. B.* An introduction to geophysical cybernetics. — Proc. International Conference on Informatics and Control, St. Petersburg, June 1997, vol. 2, 1997. — pp. 729–738
- [2] *Гаскаров Д. В., Киселев В. Б., Солдатенко С. А., Строгонов В. И., Юсупов Р. М.* Введение в геофизическую кибернетику и экологический мониторинг. — СПб., 1998. — 165 с.
- [3] *Берлянд М. Е.* Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. — Л., 1975. — 448 с.
- [4] Итоговый отчет за период сентябрь 1992 – август 1993 гг. ЕМЕП МСЦ-В. — М., 1993. — 159 с.
- [5] *Kuznetsov V. K., Kisselev V. B., Miljaev V. B.* A comparison of mesoscale pollution transport models with varying spatial resolution. — Air Pollution V, Modelling, monitoring and management, Computational mechanics publications, Southampton, 1997. — pp 129–142.
- [6] *Kuznetsov V. K., Kisselev V. B., Miljaev V. B.* A comparison of pollutant transport models. // Measuring and modelling investigation of environmental processes, vol. 2, Computational mechanics publications, WIT Press, Southampton, 1999. — pp 187–204.
- [7] *Sandnes H.* Calculated budgets for airborne acidifying components in Europe, 1985-1992 // EMEP MSC-W Technical Report no. 109, ISSN 0332-9879, Oslo, 1993. — 156 p.

- [8] *Романова Н. И., Кузнецов В. К., Киселев В. Б., Талалаев С. М., Морозова И. А., Шмидова Л. Б., Игнатьева Ю. С.* Межрегиональное атмосферное загрязнение территорий. Республика Карелия. — СПб., 1998. — 93 с.
- [9] *Алексеев Ф. Е., Бондаренко В. К., Кузнецов В. К., Киселёв В. Б., Морозова И. А., Шмидова Л. Б.* Межрегиональное атмосферное загрязнение территорий. Калининградская область. — СПб., 1997. — 108 с.
- [10] *В. Б. Киселев, С. М. Талалаев.* Оценка загрязнения тяжелыми металлами территории Ленинградской области // Проблемы охраны атмосферного воздуха. Научные труды Научно-исследовательского института охраны атмосферного воздуха. — СПб., 2000. — стр. 111–118.
- [11] *Троян В. Н., Сепман В. Ю., Эварестов Р. А., Ловчиков В. А., Золотарев В. И.* Развитие и использование комплекса высокопроизводительных вычислений СПбГУ // Материалы научно-технического совещания "Создание телекоммуникационной среды высокопроизводительных технологий в регионах России: состояние, проблемы", Уфимский государственный авиационный технический университет. — Уфа, 2000. — с. 74–78
- [12] *Золотарев В. И.* Реализация комплекса высокопроизводительных вычислений СПбГУ // Труды Всероссийской научной конференции "Высокопроизводительные вычисления и их приложения", г. Черноголовка, 30 октября–2 ноября 2000 года. — М., 2000. — с. 61–62.