

В.В. Пененко, Е.А. Цветова

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА ПРИМЕСЕЙ В ПРЯМЫХ И ОБРАТНЫХ ЗАДАЧАХ КЛИМАТОЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск*

Поступила в редакцию 3.03.99 г.

Принята к печати 30.03.99 г.

Представлена новая версия комплекса математических моделей для исследования переноса и трансформации примесей в атмосфере от естественных и антропогенных источников. Структура, методы дискретизации и алгоритмы реализации моделей строятся с ориентацией их применения в режимах прямого и обратного моделирования в задачах мониторинга, прогнозирования и экологического проектирования. С этой целью для построения численных схем используется вариационный принцип в сочетании с методами декомпозиции и расщепления. Описаны алгоритмы расчета прямых и сопряженных траекторий в системе «источник–детектор». Даны примеры решения прямых и сопряженных задач для оценки масштабов взаимодействий типа источник – охраняемая территория (оз. Байкал).

Процессы переноса и трансформации загрязняющих примесей от источников естественного и антропогенного происхождения становятся существенным фактором в климатической системе больших городов и промышленных регионов. Для их описания и прогнозирования требуются математические модели, адекватно отражающие гидрометеорологические и экологические ситуации в режиме реального времени и в плане долгосрочной перспективы.

До настоящего времени в практике атмосферноохранной деятельности в России и за рубежом еще широко используются модели, которые можно условно назвать моделями для «текущего» управления качеством атмосферы. Они представляют собой различные модификации моделей гауссовского типа и основаны на решениях стационарных уравнений переноса примесей в упрощенных постановках. В России модели такого типа сертифицированы на высоком административном уровне и рекомендованы в качестве официальных методик для использования при разработке природоохранных мероприятий и осуществлении государственного контроля охраны воздуха [1].

Основные преимущества моделей данного класса перед сложными численными моделями состоят в простоте и экономичности реализации при правдоподобном описании процесса распространения примеси в однородных стационарных условиях. Сейчас они адаптируются для реализации на ПЭВМ автономно и в составе локальных геоинформационных систем (ГИС) и активно распространяются по стране и в СНГ.

Следует иметь в виду, что во всех городах СНГ атмосфероохранные мероприятия разрабатывались с использованием официальных методик. Поэтому каждый действующий хозяйственный объект и каждый новый проект, связанные с воздействиями на природу, получали право на существование только после обоснования и согласования предельно допустимых выбросов (ПДВ) загрязняющих примесей на базе этих же официальных методик.

Анализ качества атмосферы городов СНГ за последние 20 лет показывает, что большинство из них находится в состоянии, которое по многим показателям далеко от экологического благополучия. Отсюда можно сделать вывод, что действующие официальные методики не справляются в полной мере с задачами прогнозирования качества атмосферы

в реальных условиях. Необходимо разрабатывать новые подходы к решению экологических задач и к оценке эффективности природоохранных мероприятий. В ближайшие годы такие разработки должны стать чрезвычайно актуальными по следующим обстоятельствам:

– в России идет глобальная ориентация на развитие сырьевых отраслей промышленности, и намечается тенденция на создание мощных энергетических объектов с целью производства энергии на экспорт;

– с другой стороны, в мировом сообществе принимаются решения о введении международных квот на объемы выбросов; для этого потребуются осуществление контроля над трансграничными переносами загрязняющих примесей;

– по прогнозам МЧС России, в ближайшем будущем в стране ожидается увеличение числа техногенных катастроф, и эти прогнозы согласуются с выводами Европейской экономической комиссии ООН [2];

– повышается риск проведения крупномасштабных военных операций типа «Бури в пустыне», последствия реализации которых через атмосферные переносы имеют глобальный характер.

В такой перспективе экология переходит в разряд стратегических и важнейших социально-экономических факторов.

1. Модели переноса и трансформации примесей

Для удобства построения численных схем и алгоритмов их реализации для прямых и сопряженных задач будет использовано двойственное описание моделей: 1) в виде систем дифференциальных уравнений переноса и трансформации многокомпонентных примесей и 2) в вариационной формулировке с помощью интегрального тождества.

Основная система уравнений модели записывается в виде

$$(\Delta \Phi)_i \equiv \frac{\partial \pi \Phi_i}{\partial t} + L(\pi \Phi_i) + B(\Phi)_i = f_i, \quad (1)$$

$$i = \overline{1, n}, \quad n \geq 1.$$

Здесь $\Phi = \{\varphi_i(\mathbf{x}, t), i = \overline{1, n}\} \in Q(D_t)$ – вектор-функция состояния; φ_i – концентрации i -й примеси; n – число различных веществ; $\mathbf{f} = \{f_i(\mathbf{x}, t), i = \overline{1, n}\}$ – функции источников; $L(\mathbf{x}, t)$ – адвективно-диффузионный оператор; $B(\Phi)$ – оператор трансформации примесей; π – функция от давления, ее вид зависит от выбора системы координат; $D_t = D \times [0, \bar{t}]$; D – область изменения пространственных координат \mathbf{x} , а $[0, \bar{t}]$ – интервал изменения времени; $Q(D_t)$ – пространство функций состояния, удовлетворяющих крайним условиям на границе области D_t . Если в модели предполагается наличие ошибок, то описывающие их выражения формально включаются в состав функций источника как дополнительные слагаемые.

Содержательное и конструктивное описание операторов трансформации примесей осуществляется с помощью автоматизированной системы построения кинетических моделей атмосферной химии [3, 4].

Вариационная формулировка модели имеет вид

$$I(\Phi, \Phi^*, \mathbf{Y}) \equiv \int_{D_t} (\Lambda\Phi - \mathbf{f})\Phi^* dDdt = 0, \quad (2)$$

где $\Phi^* \in Q^*(D_t)$ – функция с достаточно гладкими компонентами; $Q^*(D_t)$ – сопряженное по отношению к $Q(D_t)$ пространство функций; $\mathbf{Y} = \{Y_i, i = \overline{1, n}\} \in R(D_t)$ – вектор параметров модели; $R(D_t)$ – область допустимых значений.

Для задач мониторинга, прогнозирования, управления, проектирования и для организации алгоритмов обратного моделирования введем совокупность функционалов

$$\Phi_k(\Phi) = \int F_k(\Phi)\chi_k(\mathbf{x}, t)dDdt, k = \overline{1, K}, K \geq 1, \quad (3)$$

где $F_k(\Phi)$ – заданные функции на множестве функций состояния, дифференцируемые относительно Φ ; $\chi_k \geq 0$ – весовые функции; $\chi_k dDdt$ – меры Радона или Дирака в D_t .

Область D рассматривается в трех вариантах: сфера, полусфера и ограниченная территория на сфере. Структура областей, выбор системы координат, основные обозначения и их смысл, постановка краевых и начальных условий, содержание функций состояния и параметров, структура функционалов в зависимости от целей исследований и способ построения интегрального тождества описаны в [5–8].

Построение численных схем и алгоритмы реализации моделей осуществляются с помощью вариационного принципа в комбинации с методами расщепления и декомпозиции. Для этих целей используется тождество (2). В рамках метода расщепления основной элемент дискретизации модели строится на базе соотношений вида [9]:

$$\int_{x_{\alpha-1}}^{x_\alpha} (\Lambda_x \Phi - \mathbf{f})\Phi^* dx = \int_{x_{\alpha-1}}^{x_\alpha} \Lambda_x^* \Phi^* \Phi dx - (A_x \Phi, \Phi^*) \Big|_{x_{\alpha-1}}^{x_\alpha} - \int_{x_{\alpha-1}}^{x_\alpha} f \Phi^* dx, \quad (4)$$

где Φ – одна из компонент Φ ; x – одна из пространственных координат; Λ_x – часть оператора Λ , в терминах метода расщепления, действующая в направлении x ; $[x_{\alpha-1}, x_\alpha]$ – ячейка сеточной области по x ; $\alpha = \overline{1, M}$; Λ_x^* – оператор, сопряженный с Λ_x ; $(A_x \Phi, \Phi^*)$ – соотношения на границах ячеек по x , вид оператора A_x определяется структурой оператора Λ_x .

Способ дискретизации модели зависит от способа задания функции Φ^* в (4). Например, при $\Phi^* = \text{const}$ для адвективно-диффузионных задач получаются схемы интегроинтерполяционного метода баланса. Функции Φ^* будем выбирать так, чтобы они были решениями локальных сопряженных задач

$$\Lambda_x^* \Phi^* = 0, x_{\alpha-1} \leq x \leq x_\alpha, \alpha = \overline{1, M}. \quad (5)$$

Эти решения, при соответствующих предположениях об аппроксимации коэффициентов оператора Λ_x в пределах ячеек сетки, находятся аналитически и затем подставляются в (4). Подробно примеры использования этого способа дискретизация описаны в [9]. Окончательно его применение приводит к численным схемам вариационно-разностного типа.

Для аппроксимации тождества (2) по времени используется метод слабой аппроксимации с дробными шагами по времени [5]. При этом операторы трансформации примеси учитываются на отдельном дробном шаге. В результате дискретизации получается сумматорный аналог интегрального тождества

$$I^h(\Phi, \Phi^*, \mathbf{Y}) = 0, \quad (6)$$

$$\Phi \in Q^h(D_t^h), \Phi^* \in Q^{*h}(D_t^h), \mathbf{Y} \in R^h(D_t^h).$$

Здесь индекс h отмечает дискретный аналог соответствующих объектов. На сеточной области D_t^h строятся также дискретные аналоги $\Phi_k^h(\Phi)$ функционалов (3). При этом важно, чтобы дискретизация интегралов и функций состояния в тождестве (6) и в функционалах (3) осуществлялась на одной и той же сетке, чтобы не вводить дополнительных операций перехода с одной сетки на другую. При декомпозиции области D на подобласти это согласование должно сохраняться, хотя сетки в подобластях могут вводиться по-разному.

Численные схемы и алгоритмы получаются из следующих условий:

для прямой задачи

$$\frac{\partial I^h(\Phi, \Phi^*, \mathbf{Y})}{\partial \Phi^*} = 0, \text{ для всех } \Phi^* \in Q^{*h}(D_t^h), \quad (7)$$

для сопряженных задач

$$\frac{\partial I^h(\Phi, \Phi^*, \mathbf{Y})}{\partial \Phi} + \frac{\partial \Phi_k^h}{\partial \Phi} = 0, \text{ для всех } \Phi \in Q^h(D_t^h), \quad (8)$$

$$\Phi_k^*(\mathbf{x}, \bar{t}) = 0; k = \overline{1, K}.$$

Соотношения чувствительности для функционалов

$$\delta \Phi_k^h(\Phi) \equiv (\text{grad}_\Phi \Phi_k^h(\Phi), \delta \mathbf{Y}) = \frac{\partial I^h}{\partial \mathbf{X}}(\Phi, \Phi^*, \mathbf{Y} + \xi \delta \mathbf{Y}) \Big|_{\xi=0}, \quad (9)$$

$$k = \overline{1, K},$$

где символ δ обозначает вариации соответствующих объектов; ξ – вещественный параметр; $\delta \mathbf{Y} = \{\delta Y_i, i = \overline{1, n}\}$ – вектор вариаций параметров \mathbf{Y} ; $\text{grad}_\Phi \Phi_k^h(\Phi) \equiv \Gamma_k$ – функции чувствительности функционала с номером k к вариациям

вектора параметров. Явная их форма получается приравнованием коэффициентов левой и правой частей (9) при соответствующих компонентах вектора вариаций параметров или непосредственно с помощью операций дифференцирования выражения сумматорного функционала

$$\Gamma_{ki} = \frac{\partial}{\partial Y_i} I^h(\Phi, \Phi_k^*, Y), k = \overline{1, K}, i = \overline{1, N} \quad (10)$$

для всех $Y \in R^h(D_i)$ при заданных Φ и Φ_k^* .

Поскольку при аппроксимации тождества (2) используется метод слабой аппроксимации с дробными шагами и с декомпозицией области D на подобласти, то системы основных уравнений (7) и сопряженных (8) представляют собой схемы расщепления, декомпозированные по подобластям. Сам способ их построения с помощью (6) обеспечивает взаимную согласованность этих схем. Их специфика такова, что процессы переноса аппроксимируются для каждой субстанции отдельно, но на всей области D_i . Процессы трансформации примесей описываются совокупностью «точечных» моделей химической кинетики для всего набора веществ в каждой точке сетки независимо от других точек [4].

Следует отметить тот факт, что сопряженные функции в методике используются в двух аспектах. Во-первых, в локальном, как решения совокупностей локальных сопряженных задач (5), которые выбираются в качестве весовых функций при построении дискретных аналогов операторов в составе тождества (6). И во-вторых, в глобальном, как решения глобальных сопряженных задач (8), связывающих функционалы (3) с моделью (1). Они также используются и для получения соотношений чувствительности (9) и функций чувствительности (10).

Сделаем еще одно замечание относительно организации моделирования. В оптимизационных задачах экологического проектирования, когда приходится рассчитывать много сценариев, работать с нестационарными моделями переноса затруднительно: большое число внутренних степеней свободы требует соответствующего количества вычислений для выхода на установившиеся режимы. Поэтому в тех случаях, когда временная изменчивость процессов имеет большие характерные масштабы, имеет смысл рассматривать сценарии с уже установившимися условиями, т.е. решать стационарные задачи. Это может существенно сократить объем работы и дать хорошее первое приближение для дальнейших исследований.

При таких предположениях производные по времени в модели (1), (2) можно опустить. Процедура дискретизации с помощью (2) и структура алгоритмов остаются прежними, только в качестве «маршевой» переменной, по которой осуществляется расщепление задачи и реализуется динамика моделирования процессов, выступает та из пространственных координат, по которой заметно преобладающее движение потока воздушных масс.

При построении численных схем для модели переноса гидротермодинамические составляющие функции состояния атмосферы считаются известными. Они могут быть заданы различными способами. В частности, их можно рассчитать по моделям динамики атмосферы, работающим в едином комплексе с моделями переноса.

2. Алгоритмы расчета траекторий частиц

Рассмотренные выше методы моделирования были основаны на эйлеровом описании адвективно-диффузионных процессов переноса субстанций. На прак-

тике часто возникает потребность расчета распространения примеси в движущихся объемах воздушных масс, т.е. с помощью лагранжева подхода. Эти подходы не являются альтернативными, они дополняют друг друга. Каждый из них имеет свои достоинства и недостатки, и свои области применения [10].

Здесь мы опишем основные элементы алгоритма «сеточного» моделирования траекторий движений частиц примесей в предположении, что поля гидрометеорологических параметров атмосферы заданы на некоторой сетке D_i^h в D_i . В соответствии с определением прямого и обратного моделирования будем строить алгоритмы расчета прямых и сопряженных (обратных) траекторий.

Структуру численных схем построим исходя из метода расщепления по физическим процессам. В области D_i^h на достаточно малых интервалах времени длиной Δt возьмем два этапа расщепления:

1) перенос по траекториям воздушных масс

$$\frac{d\Phi}{dt} = 0; \quad (11)$$

2) турбулентный обмен

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} - \text{div} \mu \text{grad} \Phi = 0, \quad (12)$$

где $\mu = (\mu_1, \mu_2, \mu_3)$, $\mu_i (i = \overline{1, 3})$. Прямые траектории моделируются в направлении возрастания времени, а обратные – в обратном направлении времени.

В отличие от эйлерова подхода расщепление в лагранжевом подходе реализуется вдоль траекторий движения частиц. На первом этапе (11) решение состоит в интегрировании системы уравнений

$$\frac{dx_i}{dt} = u_i(x, t), i = \overline{1, 3},$$

$$x = (x_1, x_2, x_3) \in D, t_j \leq t \leq t_{j+1}, \quad (13)$$

где $u_i(x, t)$ – скорости переноса в направлении координат x_i , в u_3 учитывается скорость гравитационного осаждения частиц.

Для построения схемы моделирования на втором этапе (12) воспользуемся локальной аппроксимацией оператора модели типа «замороженных» коэффициентов [11]. В соответствии с этим подходом для каждой траектории движения частиц строится семейство локальных аппроксимаций задачи (12) с постоянными коэффициентами в области D_i , но параметрически зависящими от координат текущей точки траектории. Другими словами, постоянные коэффициенты локальной задачи равны значениям коэффициентов задачи (12) в рассматриваемой точке траектории.

При таких предположениях каждая локальная задача допускает разделение переменных, и, следовательно, функцию Грина для нее можно представить как произведение функции Грина для одномерных уравнений по координатным направлениям. Функция Грина для одномерных уравнений типа (12) идентична плотности вероятности гауссовых случайных величин с нулевым средним значением и стандартным отклонением $\sigma_i = \sqrt{2\Delta t \mu_i}$ ($i = \overline{1, 3}$).

Опуская промежуточные выкладки, запишем окончательно схемы алгоритмов:
для прямых траекторий

$$\frac{\Delta x_{\alpha}^j}{\Delta t} = u_{\alpha}^j(\mathbf{x}, t) + 0,5 \sum_{k=1}^3 \frac{\partial u_{\alpha}^j}{\partial x_k} \Delta x_k^j, \quad (14)$$

$$\Delta x_{\alpha}^j = x_{\alpha}^{j+1/2} - x_{\alpha}^j, \quad \alpha = \overline{1,3},$$

$$x_{\alpha}^{j+1} = x_{\alpha}^{j+1/2} + \eta_{\alpha}^{j+1/2}, \quad j = \overline{1, J-1}; \quad (15)$$

для сопряженных траекторий

$$x_{\alpha}^{*j+1/2} = x_{\alpha}^{*j+1} + \eta_{\alpha}^{*j+1}, \quad j = \overline{J-1, 1}, \quad (16)$$

$$\frac{\Delta x_{\alpha}^{*j}}{\Delta t} = u_{\alpha}^{*j}(\mathbf{x}, t) + 0,5 \sum_{k=1}^3 \frac{\partial u_{\alpha}^{*j}}{\partial x_k} \Delta x_k^{*j}, \quad (17)$$

$$\Delta x_{\alpha}^{*j} = x_{\alpha}^{*j} - x_{\alpha}^{*j+1/2}, \quad \alpha = \overline{1,3}.$$

Здесь $\eta_{\alpha}^{j+1/2}$, η_{α}^{*j+1} – нормально распределенные случайные числа с нулевыми средними значениями и стандартными отклонениями $\sigma_{\alpha}^{j+1/2}$ и σ_{α}^{*j+1} в рамках метода локальных аппроксимаций для задачи (12) соответственно; индекс j отмечает шаг по времени, J – общее число временных шагов в $[0, \bar{t}]$. Схемы (14), (17) аппроксимируют (13) со вторым порядком по времени.

Системы (14), (17) решаются относительно приращений координат методом исключения. Прямые траектории рассчитываются исходящими из области распределения частиц примесей в момент времени $t = 0$ или из координат источников примесей.

Сопряженные траектории моделируются исходящими из «охраняемой» территории или из координат размещения наблюдений в момент времени $t = \bar{t}$ в направлении начального момента времени. Так же, как и решение сопряженных задач, сопряженные траектории имеют только информационный смысл. Их можно определить как лагранжев аналог сопряженных задач в моделях переноса эйлерова типа. Они дают информацию о предыстории примесей, поступающих на охраняемую территорию или в область размещения наблюдательных приборов.

Введение случайных характеристик в расчетный алгоритм на этапе учета турбулентности предусматривает использование техники статистического моделирования на ансамблях частиц. Если турбулентный обмен не учитывать, то можно работать с индивидуальными частицами для расчета их прямых и сопряженных траекторий.

3. Сценарии моделирования типа «источник–детектор»

Комплекс моделей и базовых алгоритмов представляет собой открытую развиваемую систему моделирования. Это развитие постоянно стимулируется новыми постановками задач экологического мониторинга, прогнозирования и проектирования. Здесь мы приведем пример решения двух типичных задач, выбрав в качестве «источника» примесей Чернобыльскую АЭС, а в качестве зоны-детектора (охраняемой территории или области размещения наблюдений) – оз. Байкал. Задачи решались для Северного полушария, структура областей, гибридная система координат и сеточные области описаны в [8]. Основная цель численных экспериментов состояла в оценке масштабов взаимодействий типа «источник–детектор».

Чтобы обеспечить достоверность оценок, в расчетах использовалась ретроспективная фактическая информация об атмосферной циркуляции из базы данных Reanalysis NCEP/NCAR (США) [12] за апрель–май 1986 г. Эмиссия примеси из источника учитывалась в сценарии в интервале времени 26.04–5.05 1986 г., что соответствует периоду интенсивного выброса радионуклидов. Функционал наблюдений определен в интервале времени 3.05–13.05.1986 г.

Для организации сценариев моделирования по данным реанализа восстанавливалась детальная пространственно-временная структура функций состояния атмосферы в режимах прямого и обратного моделирования в выбранном интервале времени. Для этих целей использовалась информационная модель, основанная на методах усвоения и интерполяции данных с помощью базовой модели [13].

Первая задача реализуется методами прямого моделирования. Ее решение демонстрирует характер процессов распространения примесей от источников. Для второй задачи использованы методы обратного моделирования. Ее решение дает информацию о степени опасности для зоны детектора получить загрязнения от каждого источника, находящегося в пространственно-временной области влияния, и о масштабах этой области. Оно также показывает, какими путями эта опасность движется к детектору.

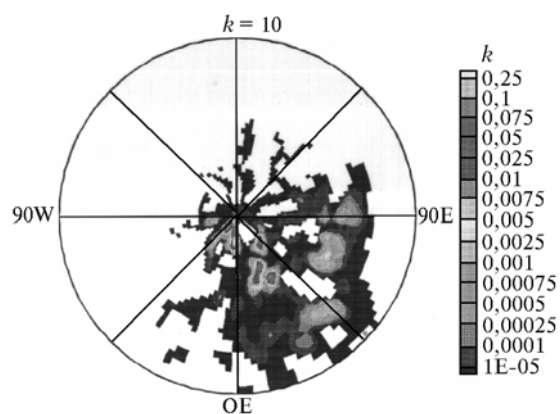


Рис. 1. Концентрация k примеси на поверхности Земли 13 мая 1986 г. OE обозначает Гринвичский меридиан

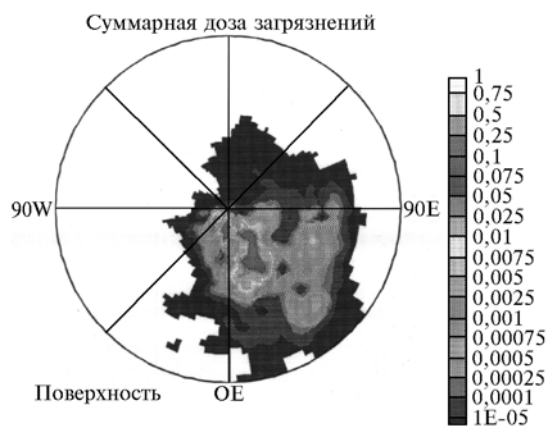


Рис. 2. Суммарная концентрация примеси на поверхности Земли за период 26.04–13.05.1986 г.

На рис. 1 и 2 представлены фрагменты сценария прямого моделирования. Рис. 1 показывает распределение концентрации примесей на поверхности Земли

13.05.1986 г. На рис. 2 дано суммарное значение концентраций примесей за период с 26.04 по 13.05.1986 г. Концентрации даны в относительных единицах для того, чтобы не обсуждать здесь вопросы интерпретации данных расчета на содержательном уровне в терминах реальных величин концентраций. Этот расчет рассматривается как «трассерный» сценарий.

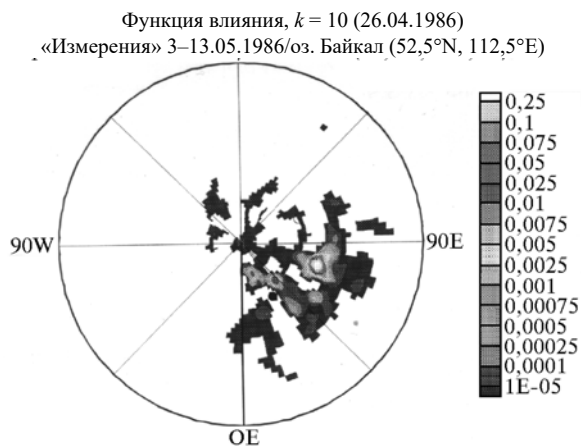


Рис. 3. Функция влияния для момента времени 01.00 местн.вр. 26.04.1986 г. на поверхности Земли для функционала измерений в интервале времени 3–13.05.1986 г.

Функция «опасности», $k = 10$, 26.04–5.05.1986
«Измерения» 3–13.05.1986/оз.Байкал (52,5N, 112,5E)

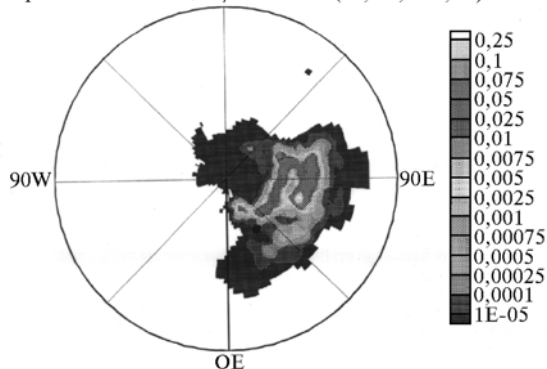


Рис. 4. Функция «опасности» для оз. Байкал за период 26.04–13.05.1986 г. на поверхности Земли. Функционал измерений в интервале времени 3–13.05.1986 г.

На рис. 3, 4 показаны фрагменты решения сопряженной задачи для функционала наблюдений. В соответствии с определением (3) этот функционал содержит $F_k(\varphi) \equiv \varphi$, а весовая функция χ_k отлична от нуля в узлах сеточной области, попадающих на акваторию оз. Байкал в интервале времени 3–13.05.1986 г. Функционал при таких условиях представляет собой оценку суммарного загрязнения, поступившего в выделенную область за выбранный промежуток времени. Решение сопряженной задачи в этом смысле является функцией чувствительности функционала к вариациям источников примесей или функцией влияния источников на величину оцениваемого функционала. На рис. 3 представлено мгновенное, в момент времени 01.00 местного времени 26.04.1986 г., значение функции влияния источников, расположенных на поверхности Земли в Северном полушарии, на величину функционала наблюдений. На рис. 4 показана интегральная функция опасности

загрязнения акватории Байкала примесями от источников Северного полушария, действовавшими 26.04–05.05.1986 г., т.е. в период интенсивного выброса от ЧАЭС.

Заметим, что функция опасности является двухпараметрической. Один параметр – интервал времени, когда включаются источники, а второй – интервал, когда проводятся измерения или оценивается функционал. Она характеризует вклад каждого источника, за период его действия в модели, в значение функционала за период наблюдений. Функции влияния и функции опасности позволяют обнаруживать самые опасные источники, и поэтому они являются наиболее существенными элементами при решении обратных задач по оценке мощностей источников загрязняющих примесей, воздействующих на зоны-детекторы.

Анализ результатов моделирования показывает глобальный характер процессов переноса загрязняющих примесей и глобальный характер функции опасности загрязнения для конкретного региона. Поэтому без оценок функций опасности и масштабов областей влияния источников невозможно корректно поставить задачу об изучении процессов мезорегионального масштаба. В частности, в рассматриваемом сценарии функция опасности загрязнения показывает, что в регион оз. Байкал загрязнения могут поступать как с территорий стран СНГ, так и с территорий Китая и Монголии. Это обусловлено теми обстоятельствами, что по отношению к данному региону в начале мая еще заметно преобладающее влияние западно-восточного переноса воздушных масс и в то же время начинает усиливаться влияние Саяно-Алтайского циклогенеза, которое становится преобладающим в летние месяцы.

Заключение

Методология исследования процессов переноса и трансформации примесей, построенная на принципах прямого и обратного моделирования с помощью вариационного подхода и оптимизации, позволяет в полной мере использовать многофункциональные возможности численных моделей. Прежде всего, это относится к организации замкнутого цикла обработки информации в системе «модель – наблюдение» посредством подходящего выбора критериев и функционалов. При этом обеспечивается согласованное описание процессов разных масштабов на уровне дискретных аппроксимаций и алгоритмов реализации моделей.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты 97-05-96511, 98-05-65318, и Программы интеграционных исследований СО РАН (ИГ СО РАН-97, N 30).

1. Сборник законодательных нормативных и методических документов для экспертизы воздухоохраных мероприятий. Л.: Гидрометеоздат, 1986. 319 с.
2. Хинтерэггер Г. Основные принципы достижения устойчивого промышленного развития в Европе. Новосибирск, 1993. 43 с. (Препринт/Изд-во СО РАН).
3. Кейко А.В. Пакет программ для кинетического анализа термодинамических процессов. Иркутск, 1996. 45 с. (Препринт/СЭИ СО РАН, N 7).
4. Пененко В.В., Цветова Е.А., Скубневская Г.И. и др. // Химия в интересах устойчивого развития. 1997. Т. 5. С. 535–539.
5. Пененко В.В. Методы численного моделирования атмосферных процессов. Л.: Гидрометеоздат, 1981. 351 с.
6. Пененко В.В. // Обозрение прикладной и промышленной математики. 1994. Т. 1. Вып. 6. С. 917–941.
7. Пененко В.В. // Оптика атмосферы и океана. 1997. Т. 10. N 6. С. 572–580.

8. Пененко В.В., Цветова Е.А. // Оптика атмосферы и океана. 1998. Т. 11. N 6. С. 586–593.
9. Пененко В.В. Численные схемы для адвективно-диффузионных уравнений с использованием локальных сопряженных задач. Новосибирск, 1993. 49 с. (Препринт/ВЦ СО РАН, N 984).
10. Pielke R.A., Lyons W.A., McNider R.T. et al. // Proceedings of the 18th NATO/COMS International Technical Meeting on Air Pollution Dispersion Modeling and its Application. 13–17 May, 1990, British Columbia, Canada. 30 p.
11. Рождественский Б.Л., Яненко Н.Н. Системы квазилинейных уравнений. М.: Наука, 1968. 592 с.
12. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R. et al. // Bull. Amer. Meteor. Soc. 1996. V. 77. P. 437–471.
13. Пененко В.В., Цветова Е.А. // Оптика атмосферы и океана. 1999. Т. 12. № 5. С. 463–465.

V.V. Penenko, E.A. Tsvetova. Simulation of Pollution Transfer in Direct and Inverse Problems of Ecological Monitoring and Forecasting.

New version of a system of mathematical models is presented intended for investigation of transfer and transformation of pollutants in the atmosphere from natural and anthropogenic sources. A structure, the methods of discretization, and the procedures for the models realization are created aiming their application to the problems of monitoring, forecasting and ecological projecting under conditions of direct and inverse simulation. Numerical schemes are constructed based on variational principle together with the methods of decomposition and splitting. The algorithms of calculation of direct and adjoint trajectories within the system «source-detector» are described. The examples of the direct and adjoint problems solution are presented for estimation of the interaction scale of the type «a source – the protected territory» (Lake Baikal).