

УДК 551.51+519.6

## НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ РЕШЕНИЯ ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ ЗАДАЧ ЭКОЛОГИИ И КЛИМАТА

В. В. Пененко, Е. А. Цветова

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,  
630090 Новосибирск

Анализируется специфика взаимосвязанных задач экологии и климата. Предлагаемая методика решения данного класса задач демонстрируется на примере оценки качества атмосферы, мониторинга и прогноза экологических последствий антропогенных воздействий. Развивается подход, основанный на вариационных принципах в сочетании с методами расщепления и декомпозиции. Представлена структура алгоритмов, реализующих эйлеровы и лагранжевы постановки задач. Приведены примеры сценариев моделирования в конкретных ситуациях.

**Введение.** Решение взаимосвязанных задач экологии и климата в последние годы является предметом интеграционных исследований специалистов различных направлений. Это новый класс задач, и для его решения требуются новые подходы, модели и методы моделирования, а также специальные наблюдательные эксперименты комплексного характера. С позиций математического моделирования специфика этого класса задач состоит в следующем. Математические модели и данные наблюдений должны использоваться совместно в режиме прямых и обратных связей. Современные математические модели климатической системы, модели переноса и трансформации загрязняющих примесей в газовом и аэрозольном состояниях довольно сложны, поскольку в них должны быть учтены как естественные, так и антропогенные факторы, влияющие на изучаемые процессы. В базах данных уже накоплен и продолжает накапливаться большой объем информации по результатам контактных и дистанционных (как непосредственных, так и косвенных) наблюдений за характеристиками природной среды. Поэтому получение новых результатов требует серьезной методической, теоретической и практической работы.

В настоящей статье обсуждаются некоторые аспекты применения и развития методики моделирования, предложенной в работах [1–7] для исследования природных процессов и оценки масштабов взаимодействий в климатической системе. В частности, в [1] рассматриваются постановки задач и приводится описание математических моделей для изучения взаимодействий в системе озеро Байкал — атмосфера региона. Это сложный развиваемый комплекс, состоящий из базовых моделей гидротермодинамики и переноса загрязняющих примесей в атмосфере и воде, переноса и трансформации влаги в атмосфере, теплопроводности и влагообмена в почве, а также моделей взаимодействия сред на границах раздела вода — атмосфера, атмосфера — почва.

Будем рассматривать подобную постановку задачи, поскольку в ней присутствует типичный набор моделей для рассматриваемого класса задач. В нем выделяется три основных типа гидротермодинамических и физико-химических процессов: 1) процессы переноса

---

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 98-05-65318, 99-07-90422) и Программы перспективных информационных технологий Министерства науки и технологии России (грант № 0201.06.269/349).

и турбулентного обмена субстанций в атмосфере и воде; 2) процессы динамического согласования и взаимного приспособления полей давления, температуры и скоростей движения воздушных и водных масс; 3) процессы трансформации влаги в атмосфере (водяной пар, облачная и дождевая вода, снежные и ледовые кристаллы) и загрязняющих примесей в газовом и аэрозольном состояниях.

Дискретные аналоги моделей и их алгоритмы строятся на основе вариационного принципа в сочетании с методами расщепления и декомпозиции. В соответствии с такой методологией моделирования все эти процессы можно рассматривать формально независимо на отдельных этапах расщепления в пределах одного достаточно малого шага дискретизации задач по времени. Вариационный принцип обеспечивает согласование различных элементов комплекса, причем так, чтобы модели на всех этапах вычислений сохраняли смысл, заложенный в их исходных формулировках. Решение задач основано на принципах прямого и обратного моделирования.

В рамках одной статьи невозможно дать полное описание методики моделирования для всего комплекса моделей. Поэтому ее идеи и основные конструктивные элементы представим на примере моделей переноса и трансформации примесей. Эти модели включают описание процессов первого и второго типов и имеют относительно самостоятельное значение в составе комплекса. Предполагается, что гидротермодинамические характеристики климатической системы, описываемые другими элементами комплекса, известны и задаются для моделей переноса как входная информация. Обозначения в настоящей статье соответствуют использованным в [1].

**1. Постановка задач переноса и трансформации примесей.** Так же как в [1, 4], при построении численных схем и их алгоритмов для прямых, сопряженных и обратных задач используется двойственное описание моделей: 1) в виде систем дифференциальных уравнений переноса и трансформации многокомпонентных примесей; 2) в вариационной формулировке с помощью интегрального тождества.

Основная система уравнений модели записывается в виде

$$(\Delta\varphi)_i \equiv \frac{\partial\pi\varphi_i}{\partial t} + L(\pi\varphi_i) + (B(\varphi))_i = f_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad n \geq 1. \quad (1)$$

Здесь  $\varphi = \{\varphi_i(\mathbf{x}, t), i = \overline{1, n}\} \in Q(D_t)$  — вектор-функция состояния;  $\varphi_i$  — концентрация  $i$ -й примеси;  $n$  — число различных веществ;  $\mathbf{f} = \{f_i(\mathbf{x}, t), i = \overline{1, n}\}$  — функции источников;  $L(\pi\varphi_i) = \text{div}[\pi(\mathbf{u}\varphi_i - \mu \text{grad } \varphi_i)]$  — адвективно-диффузионный оператор;  $\mathbf{u} = (u_1, u_2, u_3)$  — вектор скорости;  $\mu = \{\mu_1, \mu_2, \mu_3\}$  — коэффициенты турбулентного обмена в направлении координат  $\mathbf{x} = \{x_i, i = \overline{1, 3}\}$ ;  $B(\varphi)$  — нелинейный матричный оператор алгебраического вида, описывающий процессы трансформации примесей;  $\pi$  — функция давления, вид которой зависит от выбранной системы координат;  $D_t = D \times [0, \bar{t}]$ ;  $D$  — область изменения пространственных координат  $\mathbf{x}$ ;  $[0, \bar{t}]$  — интервал изменения времени;  $Q(D_t)$  — пространство функций состояния, удовлетворяющих условиям на границе области  $D_t$ . Если в модели учитывается аэрозолеобразование, то в оператор  $B(\varphi)$  включается еще одна независимая переменная — размер частиц, и по этой переменной он становится интегро-дифференциальным. Оператор переноса симметризуется с помощью уравнения неразрывности [4].

Если в модели предполагается наличие ошибок, то описывающие их выражения формально включаются в состав функций источника как дополнительные слагаемые.

Описание операторов трансформации примесей осуществляется с помощью автоматизированной системы построения кинетических моделей атмосферной химии [3].

Вариационная формулировка модели имеет вид

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

где  $\varphi^* \in Q^*(D_t)$  — 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 их допустимых значений. Интегральный функционал тождества (2) строится с учетом краевых условий. Подынтегральное выражение в (2) приводится к симметризованному виду, что автоматически (т. е. без дополнительных операций дифференцирования и интегрирования) обеспечивает энергетическую сбалансированность функционала (2) при подстановке  $\varphi^* = \varphi$  [4].

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

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

где  $F_k(\varphi)$  — заданные функции на множестве функций состояния, дифференцируемые относительно  $\varphi$ ;  $\chi_k \geq 0$  — весовые функции;  $\chi_k dD dt$  — соответствующие им меры Радона или Дирака в  $D_t$ . С помощью функционала вида (3) при соответствующем выборе функций  $F_k(\varphi)$  и  $\chi_k$  можно представить обобщенные оценки поведения системы, экологические ограничения на качество природной среды, результаты наблюдений различных типов, целевые критерии управления, критерии качества моделей и др. [5, 6].

Область  $D$  рассматривается в трех вариантах: сфера, полусфера и ограниченная территория на сфере. Структура областей, выбор системы координат, основные обозначения, краевые и начальные условия, функции состояния и параметры, структура функционалов в зависимости от целей исследований, а также способ построения интегрального тождества описаны в [1, 4].

Для построения численных схем используется тождество (2). В рамках метода расщепления основной элемент дискретизации модели строится на базе соотношений вида [8]

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

где  $\varphi$  — компонента  $\varphi$ ;  $x$  — одна из пространственных координат;  $\Lambda_x$  — часть оператора  $\Lambda$  в терминах метода расщепления, действующая в направлении  $x$ ;  $[x_{\alpha-1}, x_{\alpha}]$  — ячейка сеточной области по  $x$ ;  $\alpha = \overline{1, M}$ ;  $\Lambda_x^*$  — оператор, сопряженный по отношению к  $\Lambda_x$ ;  $(A_x \varphi, \varphi^*)$  — соотношения на границах ячеек по  $x$ ; вид оператора  $A_x$  определяется структурой оператора  $\Lambda_x$ .

Способ дискретизации зависит от способа задания функций  $\varphi^*$  в (4). Выберем их таким образом, чтобы они были решениями локальных сопряженных задач

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

Применение этого способа приводит к численным схемам вариационно-разностного типа. Процедура построения обеспечивает свойства монотонности и транспортности дискретных аппроксимаций оператора переноса по пространственным переменным.

Для аппроксимации тождества (2) по времени используется метод слабой аппроксимации с дробными шагами по времени [4]. При этом операторы трансформации примеси учитываются на отдельном дробном шаге. В результате дискретизации получается сумматорный аналог интегрального тождества (2)

$$I^h(\varphi, \varphi^*, \mathbf{Y}) = 0, \quad \varphi \in Q^h(D_t^h), \quad \varphi^* \in Q^{*h}(D_t^h), \quad \mathbf{Y} \in R^h(D_t^h). \quad (6)$$

Здесь индекс  $h$  обозначает дискретный аналог соответствующих объектов. На сеточной области  $D_t^h$  строятся также дискретные аналоги  $\Phi_k^h(\varphi)$  функционалов (3).

Численные схемы и алгоритмы получаются из условий стационарности функционалов  $\tilde{\Phi}_k^h(\varphi) = \Phi_k^h(\varphi) + I^h(\varphi, \varphi^*, \mathbf{Y})$  к вариациям функций  $\varphi^*$ ,  $\varphi$  в узлах сеточной области  $D_t^h$ :  
— для прямой задачи

$$\frac{\partial I^h(\varphi, \varphi^*, \mathbf{Y})}{\partial \varphi^*} = 0, \quad \varphi^* \in Q^{*h}(D_t^h); \quad (7)$$

— для сопряженных задач

$$\frac{\partial I^h(\varphi, \varphi_k^*, \mathbf{Y})}{\partial \varphi} + \frac{\partial \Phi_k^h}{\partial \varphi} = 0, \quad \varphi \in Q^h(D_t^h), \quad \varphi_k^*(\mathbf{x}, \bar{t}) = 0, \quad k = \overline{1, K}. \quad (8)$$

Операции дифференцирования осуществляются по всем сеточным компонентам функции состояния и сопряженной функции.

Соотношения чувствительности для функционалов имеют вид

$$\delta \Phi_k^h(\varphi) \equiv (\text{grad}_{\mathbf{Y}} \Phi_k^h(\varphi), \delta \mathbf{Y}) = \left. \frac{\partial}{\partial \xi} I^h(\varphi, \varphi_k^*, \mathbf{Y} + \xi \delta \mathbf{Y}) \right|_{\xi=0}, \quad k = \overline{1, K}, \quad (9)$$

где символ  $\delta$  обозначает вариации соответствующих объектов;  $\xi$  — вещественный параметр;  $\delta \mathbf{Y} = \{\delta Y_i, i = \overline{1, N}\}$  — вектор вариаций параметров  $\mathbf{Y}$ ;  $\text{grad}_{\mathbf{Y}} \Phi_k^h(\varphi) \equiv \Gamma_k$  — функции чувствительности функционала с номером  $k$  к вариациям вектора параметров. Явная их форма получается с помощью операций дифференцирования выражения сумматорного функционала

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

для всех  $\mathbf{Y} \in R^h(D_t^h)$  при заданных  $\varphi$ ,  $\varphi_k^*$ .

Поскольку при аппроксимации тождества (2) используется метод слабой аппроксимации с дробными шагами и декомпозицией области  $D$  на подобласти, системы основных уравнений (7) и сопряженных (8) представляют собой схемы расщепления, записанные для подобластей. Построение этих схем с помощью (6) обеспечивает их взаимную согласованность. Их специфика такова, что процессы переноса осуществляются для каждой субстанции отдельно, но на всей области  $D_t^h$ . Процессы трансформации примесей описываются совокупностью “точечных” моделей химической кинетики для всего набора веществ в каждой точке сетки независимо от других точек [3].

Следует отметить, 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). Во-вторых, в глобальном как решения глобальных сопряженных задач (8), связывающих функционалы (3) с моделью (1). Эти функции используются также для получения соотношений чувствительности (9) и функций чувствительности (10).

Обратные задачи и методы обратного моделирования формулируются из условий минимизации функционалов типа (3) в пространстве параметров или из оценок чувствительности к вариациям этих параметров. Для этого строятся алгоритм обратного моделирования и его модификации [7]. В него включены алгоритмы решения задач (7)–(10) и реализации обратной связи от функционалов к параметрам, следующие из соотношений (9), (10):

$$\frac{dY_\alpha}{dt} = -\eta_\alpha \Gamma_{k\alpha}, \quad \alpha = \overline{1, N_\alpha}, \quad N_\alpha \leq N, \quad (11)$$

где  $\eta_\alpha$  — коэффициенты пропорциональности, которые находятся в процессе решения задачи;  $N_\alpha$  — число уточняемых параметров.

Таким образом, если определена структура основного интегрального тождества типа (2) для описания математических моделей, то с использованием вариационного принципа получаются все необходимые конструктивные элементы для дискретизации самих математических моделей и методов их алгоритмической реализации и практического использования. Иными словами, математическая модель с помощью интегрального тождества включается в разработанную нами технологию моделирования.

Прямые задачи используются для изучения процессов распространения возмущений от источников. Это так называемые задачи типа источник — детектор. Пространственно-временные области в  $D_t$ , где наблюдаются возмущения, играют роль зон-детекторов. С точки зрения экологической безопасности представляют интерес обратные задачи типа детектор — источник, позволяющие определить степень потенциальной опасности загрязнения зоны-детектора поступающими в нее примесями и идентифицировать источники, представляющие эту опасность. Решение подобных задач можно получить методами обратного моделирования с использованием сопряженных задач и функций чувствительности. Для заданных функционалов, представляющих собой оценки качества атмосферы зон-детекторов, схемы алгоритмов получаются из соотношений чувствительности.

При построении численных схем для модели переноса гидротермодинамические составляющие функции состояния атмосферы считаются известными и могут быть заданы различными способами. В частности, их можно рассчитать по моделям динамики атмосферы, которые интегрируются одновременно с моделями переноса. Для диагностических исследований, оценки информативности систем наблюдений и реализации сценариев экологической перспективы модели переноса могут использоваться совместно с моделями информационного типа, генерирующими характеристики атмосферной циркуляции по ретроспективной гидрометеорологической информации [9].

**2. Траектории в задачах типа источник — детектор и детектор — источник.** Рассмотренные выше методы моделирования основаны на эйлеровом описании адвективно-диффузионных процессов переноса субстанций. На практике часто возникает необходимость расчета распространения примеси в движущихся объемах воздушных масс с помощью лагранжева подхода. Оба этих подхода не являются альтернативными, они дополняют друг друга. Каждый из них имеет преимущества и недостатки и области применения. Опишем основные элементы алгоритма “бессеточного” моделирования траекторий движений частиц примесей в предположении, что поля гидрометеорологических параметров атмосферы заданы на некоторой сетке  $D_t^h$  в  $D_t$ . В соответствии с определением задач 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  $D_t^h$  на достаточно малых интервалах времени  $\Delta t$  выделим три этапа расщепления:

1) перенос по траекториям воздушных масс

$$\frac{d\varphi_i}{dt} = 0; \quad (12)$$

2) турбулентный обмен

$$\frac{\partial \pi \varphi_i}{\partial t} - \operatorname{div} (\mu \pi \operatorname{grad} \varphi_i) = 0; \quad (13)$$

3) трансформация примесей

$$\frac{\partial \pi \varphi_i}{\partial t} + (B(\varphi))_i = f_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad n \geq 1. \quad (14)$$

Заметим, что в эйлеровом подходе третий этап представляет собой решение системы нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений по времени в каждой точке пространственной сетки в пределах одного шага по времени. В лагранжевых схемах решение этой задачи сопряжено со значительными трудностями, так как при случайном характере турбулентного обмена в каждой точке траектории может оказаться случайный набор частиц различных компонентов примеси, а перестраивание оператора трансформации по таким наборам выведет задачу прогнозирования химической обстановки за пределы исходных формулировок. Поэтому лагранжевы схемы моделирования переноса будем применять только для консервативных примесей (трассеров) на первом и втором этапах расщепления [2].

При рассмотрении задачи типа источник — детектор решаются прямые задачи и моделируются траектории, исходящие из источников, в направлении возрастания времени либо до момента достижения ими зоны-детектора, либо до заданного момента времени. Для задач типа детектор — источник по аналогии с сопряженными задачами в эйлеровой формулировке (8) моделируются сопряженные траектории, исходящие из зон-детекторов в обратном направлении времени. Расщепление в лагранжевом подходе реализуется вдоль траекторий движения частиц. На первом этапе (12) решение состоит в интегрировании системы уравнений

$$\frac{dx_i}{dt} = u_i(\mathbf{x}, t), \quad i = \overline{1, 3}, \quad \mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3) \in D, \quad t_j \leq t \leq t_{j+1}, \quad (15)$$

где  $u_i(\mathbf{x}, t)$  — скорости переноса в направлении координат  $x_i$ ; в компоненте  $u_3$  учитывается скорость гравитационного осаждения частиц.

Для построения схемы моделирования на втором этапе (13) используется локальная аппроксимация оператора модели типа “замороженных” коэффициентов [10]. При таких предположениях каждая локальная задача допускает разделение переменных, и, следовательно, функцию Грина для нее можно представить как произведение функций Грина для одномерных уравнений по координатным направлениям. Эти функции идентичны плотности вероятности гауссовых случайных величин с нулевым средним значением и стандартным отклонением  $\sigma_i = \sqrt{2\Delta t \mu_i}$  ( $i = \overline{1, 3}$ ). Так же как в эйлеровом подходе (7), (8), для лагранжевого варианта будем использовать схемы второго порядка по времени.

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 рассчитать прямые и сопряженные траектории индивидуальных частиц.

Таким образом, алгоритм переноса представляет собой комбинацию детерминированного переноса по траекториям движения воздушных масс (см. (12)) и метода Монте-Карло для учета турбулентного обмена (см. (13)).

Опуская промежуточные выкладки, запишем схемы алгоритмов [2]:

— для прямых траекторий

$$\frac{\Delta x_\alpha^j}{\Delta t} = u_\alpha^j(\mathbf{x}, t) + 0,5 \sum_{k=1}^3 \frac{\partial u_\alpha^j}{\partial x_k} \Delta x_k^j, \quad \Delta x_\alpha^j = x_\alpha^{j+1/2} - x_\alpha^j, \quad \alpha = \overline{1, 3}; \quad (16)$$

$$x_\alpha^{j+1} = x_\alpha^{j+1/2} + \eta_\alpha^{j+1/2}, \quad j = \overline{1, J-1}; \quad (17)$$

— для сопряженных траекторий

$$x_\alpha^{*j+1/2} = x_\alpha^{*j+1} + \eta_\alpha^{*j+1}, \quad j = \overline{J-1, 1}; \quad (18)$$

$$\frac{\Delta x_\alpha^{*j}}{\Delta t} = u_\alpha^{*j+1}(\mathbf{x}, t) + 0,5 \sum_{k=1}^3 \frac{\partial u_\alpha^{*j+1}}{\partial x_k} \Delta x_k^{*j}, \quad \Delta x_\alpha^{*j} = x_\alpha^{*j} - x_\alpha^{*j+1/2}, \quad \alpha = \overline{1, 3}. \quad (19)$$

Здесь  $\eta_\alpha^{j+1/2}$ ,  $\eta_\alpha^{*j+1}$  — нормально распределенные случайные числа с нулевыми средними значениями и стандартными отклонениями  $\sigma_\alpha^{j+1/2}$  и  $\sigma_\alpha^{*j+1}$  в рамках метода локальных аппроксимаций для задачи (13) соответственно; индекс  $j$  обозначает шаг по времени;  $J$  — общее число временных шагов в диапазоне  $[0, \bar{t}]$ . Схемы (16), (19) аппроксимируют (15) со вторым порядком по времени. В окрестности границ формулы (16)–(19) строятся с учетом краевых условий.

Системы (16), (19) решаются относительно приращений координат методом исключения. Прямые траектории рассчитываются исходящими из области распределения частиц примесей в момент  $t = 0$  или из координат источников примесей.

Сопряженные траектории моделируются исходящими из интересующих исследователя (“охраняемых”) территорий или из координат размещения наблюдательных приборов при  $t = \bar{t}$  в направлении начального момента времени. Так же как решение сопряженных задач (8), сопряженные траектории в терминах теории чувствительности имеют информационный смысл. Их можно определить как лагранжев аналог сопряженных задач. Они дают информацию о предыстории примесей, поступающих на “охраняемую” территорию или в область размещения наблюдательных приборов.

**3. Два сценария моделирования для Сибирского региона.** Описанная выше методика моделирования предназначена для решения задач, связанных с оценками экологической перспективы и безопасности при различных вариантах антропогенных нагрузок на климатическую систему. Приведем два сценария обратного моделирования: 1) оценка информативности системы мониторинга и степени опасности загрязнения зоны-детектора; 2) расчет сопряженных траекторий для интерпретации результатов наблюдений за специфическими загрязнителями природной среды. В обоих случаях используются полусферные базовые модели переноса примесей в атмосфере в гибридной системе координат, описанной в [1]: изобарической в свободной атмосфере и следящей за рельефом в нижних слоях атмосферы. Первый сценарий выполняется в эйлеровой постановке, второй — в лагранжевой. Для повышения достоверности расчетов гидрометеорологические ситуации воссоздаются по фактической информации из базы данных Reanalysis NCEP/NCAR USA [11] с помощью системы, описанной в [9]. Детектором является локальная область, расположенная вблизи г. Новосибирска. Наблюдения в ней осуществляются с помощью самолета-лаборатории на нескольких горизонтах по высоте до уровня 7 км. Опорная точка для формирования функционала наблюдений в форме (3) имеет координаты ( $54^\circ 23'$  с. ш.,  $82^\circ 09'$  в. д., давление  $p = 700$  мбар). Продолжительность одного наблюдения около 30 мин.

Расчеты проводились на срок 30 сут с шагом 30 мин в обратном направлении времени от момента окончания наблюдений. Не поясняя физическую суть наблюдательных экспериментов, приведем два результата расчетов.

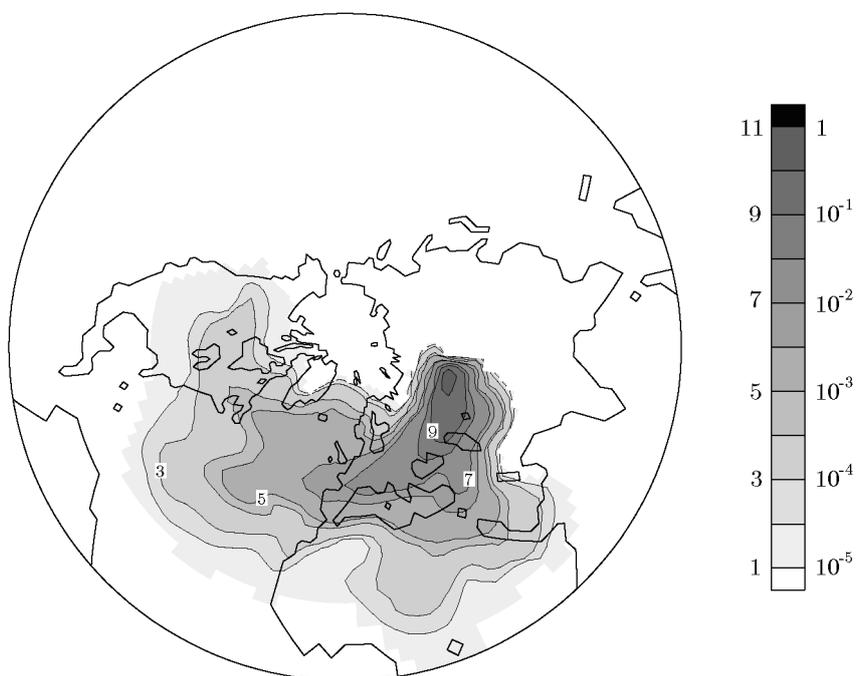


Рис. 1. Функция чувствительности (двумерный разрез на высоте рельефа поверхности Земли) функционала качества атмосферы зоны-детектора к вариациям источников выброса примесей, расположенных на поверхности Земли

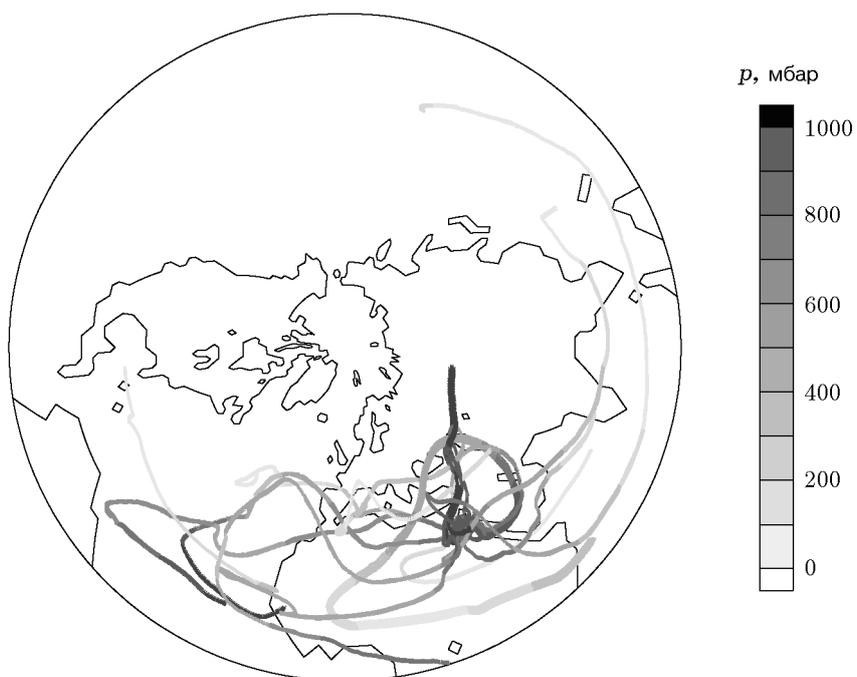


Рис. 2. Сопряженные траектории для изучения предыстории переноса воздушных масс и загрязняющих примесей в зону-детектор

На рис. 1 представлен фрагмент первого сценария. Здесь показан двумерный разрез на уровне поверхности Земли функции чувствительности функционала качества атмосферы (или функционала наблюдений) в зоне-детекторе к вариациям мощности источников примесей, расположенных на поверхности Земли. Степень чувствительности дана в относительных единицах в соответствии с приведенной на рис. 1 шкалой значений, которая показывает весовой вклад каждого источника, находящегося в данной области, в значения вариации функционала качества. С позиций мониторинга функция чувствительности характеризует наблюдаемость из зоны-детектора источников примесей с целью определения их мощности и расположения.

На рис. 2 представлен фрагмент второго сценария. На нем показаны 11 сопряженных траекторий, выходящих из зоны-детектора. Их поведение характеризует предысторию воздушных масс, приносящих загрязнения в исследуемую область. Шкала представляет высоты в изобарических координатах. Показанная на рис. 2 картина представляет собой сложную пространственно-временную структуру, в которой различные участки траекторий находятся на различных высотах согласно движению воздушных масс.

Анализ результатов расчетов обоих сценариев показывает, что в информационном плане они дополняют друг друга, с разных сторон характеризую результаты наблюдательных экспериментов и процесс формирования качества атмосферы в зоне-детекторе в зависимости от экологических и гидротермодинамических ситуаций в окружающей эту территорию среде. Это позволяет сделать более определенные выводы относительно того, откуда следует ожидать неблагоприятное воздействие и в каких масштабах. Фактически в сценариях отслеживаются процессы, развивающиеся в течение месяца до момента наблюдений, с точки зрения их потенциальной опасности для выбранной территории.

**Заключение.** Методология решения взаимосвязанных задач экологии и климата активно развивается, причем развитие идет в направлении обогащения как информационного и физического содержания базовых моделей, так и методов их конструктивной реализации и практического применения. Излагаемый в настоящей статье подход, основанный на принципах прямого и обратного моделирования, расширяет возможности создаваемого нами многофункционального комплекса моделей по диагностике и прогнозированию процессов в климатической системе и планированию и оценке информативности наблюдательных экспериментов. Выбранные способы построения дискретных аппроксимаций и алгоритмов учитывают различие пространственно-временных масштабов исследуемых явлений и обеспечивают оптимальное использование фактической информации.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Пененко В. В., Цветова Е. А. Математические модели для исследования взаимодействия в системе озеро Байкал — атмосфера региона // ПМТФ. 1999. Т. 40, № 2. С. 137–147.
2. Пененко В. В., Цветова Е. А. Моделирование процессов переноса примесей в прямых и обратных задачах климато-экологического мониторинга // Оптика атмосферы и океана. 1999. Т. 12, № 5. С. 463–465.
3. Пененко В. В., Цветова Е. А., Скубневская Г. И. и др. Численное моделирование химической кинетики и переноса загрязняющих примесей в атмосфере промышленных регионов // Химия в интересах устойчивого развития. 1997. Т. 5. С. 535–539.
4. Пененко В. В. Методы численного моделирования атмосферных процессов. Л.: Гидрометеоиздат, 1981.
5. Пененко В. В. Численные модели и методы для решения задач экологического прогнозирования и проектирования // Обозрение прикл. и пром. математики. 1994. Т. 1, вып. 6. С. 917–941.

6. **Пененко В. В.** Теоретические основы совместного использования данных наблюдений и моделей для исследования процессов гидротермодинамики и переноса примесей в атмосфере // Оптика атмосферы и океана. 1999. Т. 12, № 5. С. 458–462.
7. **Penenko V. V.** Adjoint problems for diagnostic research and estimation of stability and predictability of numerical models of atmospheric hydrodynamics // Proc. of the IV Bilateral conf. “Variability and predictability of atmospheric and oceanic circulations” / Ed. by E. V. Kazantsev. Moscow: MSU, 1999. P. 106–116.
8. **Пененко В. В.** Численные схемы для адвективно-диффузионных уравнений с использованием локальных сопряженных задач. Новосибирск, 1993. (Препр. / ВЦ СО РАН; № 984).
9. **Рождественский Б. Л., Яненко Н. Н.** Системы квазилинейных уравнений. М.: Наука, 1968.
10. **Пененко В. В., Цветова Е. А.** Подготовка данных для экологических исследований с использованием Reanalysis // Оптика атмосферы и океана. 1999. Т. 12, № 6. С. 482–487.
11. **Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., et al.** The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 1996. V. 77. P. 437–471.

*Поступила в редакцию 11/IV 2000 г.*

---