

ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ С УЧЕТОМ КЛИМАТИЧЕСКИ ОБУСЛОВЛЕННЫХ РИСКОВ*

В. В. ПЕНЕНКО, Е. А. ЦВЕТОВА

Институт вычислительной математики

и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия

e-mail: Penenko@sscc.ru, E.Tsvetova@ommgrp.sssc.ru

Efficient methods of the analysis and accounting for the climatic information for the purposes of ecological forecasting are proposed. A variational formulation of multipurpose databases and methods of their orthogonal decomposition coordinated with the variational structure of the system for processes modelling is given. An example showing application of the technique to the analysis of the climatic regime of the Sayan-Altay region is presented.

Введение

Основной целью природоохранного прогнозирования является оценка возможных изменений качества атмосферы за счет воздействия естественных и антропогенных факторов, связанных с выбросами загрязняющих примесей из действующих и проектируемых источников, а также за счет изменений характеристик поверхности земли, приводящих, в свою очередь, к изменениям гидротермодинамического режима атмосферы и таким образом влияющих на процессы переноса и осаждения примесей.

Использование методов математического моделирования для этих целей позволяет дать **количественные** оценки эволюции окружающей среды, определить степень экологических рисков. Большое значение для обеспечения адекватности прогнозирования имеет достоверность результатов, полученных с помощью расчетов на базе моделей процессов. Известно, что пределы предсказуемости современных моделей весьма ограничены. Вместе с тем природоохранное прогнозирование требует оперирования сроками порядка сотни лет. Поэтому методика, развиваемая нами в последние годы [1, 2], базируется на совместном использовании фактической информации и математических моделей. Причем фактическая информация за длительные климатически значимые сроки (более 30 лет) включается в систему моделирования при помощи специальной технологии.

Идея развиваемого нами подхода состоит в том, чтобы построить такой математический аппарат, который позволит разделить информацию об эволюции переменных состояния системы в целом и ее подсистем по масштабам возмущений, выделяя при этом по

*Работа выполняется при финансовой поддержке Программ фундаментальных исследований Президиума РАН (№ 16) и ОМН РАН (№ 1.3), Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 04-05-64562).

© Институт вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук, 2006.

заданным критериям информативности климатически значимые процессы и возмущения типа погодных шумов. Можно также разделить пространственно-временные масштабы на глобальные, региональные и локальные. В дополнение к этому применение методов теории чувствительности позволяет оценивать тенденции поведения системы при различных возмущениях в начальном состоянии, в параметрах моделей и в источниках возмущений. Эти методы в совокупности дают возможность распространять информацию от вариаций обобщенных характеристик посредством функций чувствительности в режиме обратного моделирования ко всем параметрам системы в пространственно-временном представлении, что позволяет организовать обратные связи для целей контроля и экологического проектирования.

1. Постановка задач природоохранного прогнозирования

Под климатически обусловленными рисками мы понимаем возможность возникновения экологически неблагоприятных ситуаций за счет специфики атмосферной циркуляции, которая формируется климатической системой. Идентификация специфических особенностей, характерных для определенных регионов, в режиме сезонной и межгодовой изменчивости производится с помощью методов ортогональной декомпозиции климатических данных и результатов моделирования.

Для климато-экологических исследований используются модели динамики атмосферы, объединенные с моделями переноса и трансформации тепла, влаги, оптически и химически активных субстанций в атмосфере. Структуру этих моделей можно записать в виде

$$L(\varphi) \equiv B \frac{\partial \varphi}{\partial t} + G(\varphi, \mathbf{Y}) - \mathbf{f} - \mathbf{r} = 0. \quad (1)$$

Начальные условия при $t = 0$ и параметры модели можно записать как

$$\varphi^0 = \varphi_a^0 + \xi(\mathbf{x}), \mathbf{Y} = \mathbf{Y}_a + \zeta(x, t). \quad (2)$$

Граничные условия для замыкания моделей задаются в зависимости от постановки задачи и специфики области интегрирования. Они включаются в определение класса функций состояния $Q(D_t)$. Здесь $\varphi \in Q(D_t)$ — вещественное пространство вектор-функций состояния; B — блочная диагональная матрица; $G(\varphi, \mathbf{Y})$ — нелинейный матричный дифференциальный оператор; основные элементы в нем — адвективно-диффузионные операторы, действующие на различные компоненты функции состояния; \mathbf{f} — функции источников; \mathbf{r} , ξ , ζ — функции, описывающие ошибки и неопределенности моделей, начальных данных и параметров; \mathbf{Y} — вектор параметров модели, принадлежащий области допустимых значений $R(D_t)$; φ^0 — начальное состояние; φ_a^0 , \mathbf{Y}_a — априорные оценки соответствующих объектов; $D_t = D \times [0, t]$, D — область изменения пространственных координат \mathbf{x} ; $t \in [0, t]$ — интервал изменения времени. Область D может быть глобальной на сферической Земле либо ограниченной частью глобальной системы.

В составе (1) имеются модели динамики атмосферы, предназначенные для формирования гидродинамического фона несущей среды различных пространственно-временных масштабов, от локального до глобального. Для воспроизведения экологических ситуаций используются модели, описывающие процессы переноса и трансформации различных субстанций:

$$L\varphi \equiv \frac{\partial \pi c_i}{\partial t} + \text{div} \pi (c_i \mathbf{u} - \mu_i \text{grad} c_i) + \pi (S\varphi)_i - \pi (f_i(\mathbf{x}, t) + r_i) = 0, \quad (3)$$

где $\varphi = \{c_i(x, t), i = \overline{1, n}\} \in Q(D_t)$ — часть вектор-функции состояния в (1). Ее компоненты c_i представляют температуру, отношения смеси вода — воздух для характеристик влажности в атмосфере (водяной пар, облачная вода, дождевая вода, снег и ледовые кристаллы), концентрации загрязняющих примесей в газовом и аэрозольном состоянии; $\mathbf{f} = \{f_i(\mathbf{x}, t), i = \overline{1, n}\}$ — функции источников тепла, влаги и примесей; $\mathbf{r} = \{r_i(x, t), i = \overline{1, n}\}$ — функции, описывающие неопределенности и ошибки моделей; $(S\varphi)_i$ — нелинейные матричные операторы, которые описывают локальные процессы трансформации соответствующих субстанций. Они не содержат производных от функций состояния по \mathbf{x} и t . Если в модели учитываются процессы образования аэрозолей и их трансформации, то в этом случае участвует еще одна переменная — размер частиц и оператор трансформации имеет по этой переменной интегродифференциальную структуру. В уравнениях (3) участвуют функции, представляющие некоторые характеристики гидродинамического фона: $\mathbf{u} = (u_1, u_2, u_3)$ — вектор скорости; $\mu_i = (\mu_1, \mu_2, \mu_3)_i$ — коэффициенты турбулентного обмена для субстанции c_i в направлении координат $\mathbf{x} = \{x_i\}$, $i = \overline{1, 3}$; π — функция, определяемая через метеоэлементы в соответствии со структурой вертикальной координаты в области D_t . Функции u, μ_i, π рассчитываются в рамках моделей (1), но по отношению к моделям (3) они являются входными параметрами и вместе с источниками, начальными и краевыми условиями для (3) включаются в совокупность компонент вектора параметров $\mathbf{Y} \in R(D_t)$. Здесь используются структура областей и системы координат, подробно описанные в [3].

Задачи диагностики состояния окружающей среды и природоохранного прогнозирования имеют многоцелевой характер. Поэтому для их решения требуется технология моделирования, адаптируемая к различным постановкам и критериям. Чтобы это обеспечить, в систему кроме математических моделей вводится набор обобщенных характеристик $\Phi_k(\varphi)$, $k = 1, \dots, K_f$, описывающих целевые критерии и различные ограничения, например, обусловленные стандартами качества окружающей среды и качества жизни человека. Такие характеристики для количественных оценок удобно задавать в виде набора функционалов, определенных на множестве переменных состояния и параметров:

$$\Phi_k(\varphi) = \int_{D_t} F_k(\varphi, \mathbf{Y}) \chi_k(\mathbf{x}, t) dDdt \equiv (\mathbf{F}_k, \boldsymbol{\chi}_k), \quad \chi_k \subset Q^*(D_t), k = \overline{1, K_f}. \quad (4)$$

Здесь F_k — заданные функции, ограниченные и дифференцируемые относительно $\varphi \in Q(D_t)$; $\mathbf{Y} \in R(D_t)$; $\chi_k(\mathbf{x}, t) \geq 0$ — неотрицательные весовые функции; $\chi_k(\mathbf{x}, t) dDdt$ — соответствующие им меры Радона (в случае распределенных по пространству значений функций F_k) или Дирака (если F_k определено на совокупности дискретных в D_t точек); $Q^*(D_t)$ — пространство сопряженных функций. Носители весовых функций, т. е. области их ненулевых значений, в частности, можно интерпретировать как области-рецепторы в D_t . Их конфигурации задаются как входные параметры.

Требуемые оценки получаются с помощью соотношений чувствительности для функционалов (4), а их пространственно-временная динамика в пространстве $Q(D_t)$ и $R(D_t)$ описывается функциями чувствительности (ФЧ) этих функционалов к вариациям параметров модели. Поэтому для совместного анализа данных, моделей и ФЧ требуются согласованные между собой определения энергетических скалярных произведений в соответствующих функциональных пространствах. Основу таких алгоритмических конструкций дает вариационный принцип (ВП) для оценок функционалов и моделей [4]:

$$\tilde{\Phi}_k^h(\varphi) \equiv \Phi_k^h(\varphi) + [I^h(\varphi, \mathbf{Y}, \varphi^*)]_{D_t^h}; \quad (5)$$

$$I(\varphi, \mathbf{Y}, \varphi^*) \equiv \left(B \frac{\partial \varphi}{\partial t} + G(\varphi, \mathbf{Y}) - \mathbf{f} - \mathbf{r}, \varphi^* \right) = 0. \quad (6)$$

Здесь $\varphi^* \in Q^*(D_t)$ — вспомогательные функции, определяемые спецификой ВП и принадлежащие пространству, сопряженному по отношению к пространству функций состояния.

Интегральное тождество (6) представляет собой вариационную формулировку моделей (1)–(3). Функционал здесь выбирается так, чтобы при $\varphi^* = \varphi$ соотношение (6) превращалось в уравнение баланса полной энергии системы. На основе интегрального тождества получают все требуемые для работы определения скалярных произведений и алгоритмические конструкции для построения дискретных моделей, функционалов и схем их реализации на ЭВМ. Заданием скалярных произведений можно управлять процессом обработки и анализа информации применительно к конкретным целям исследования. Например, если в качестве базовой модели использовать модель гидродинамики атмосферы в квазистатическом приближении, то энергетическое скалярное произведение для функций состояния в (1), (3), (6) можно взять в виде

$$(\varphi, \varphi^*)_{Q(D_t)} = \int_{D_t} \{uu^* + vv^* + \sigma_0 [TT^* + (\gamma(p)/R^2)HH^*]\} dDdt + \sum_{i=1}^n \int_{D_t} \beta_i c_i c_i^* dDdt, \quad (7)$$

где $\varphi = (u, v, T, H, c_i, i = \overline{1, n}) \equiv \{\varphi_i, i = \overline{1, n+4}\}$ — вектор-функция переменных состояния; u, v — горизонтальные составляющие вектора скорости; T — температура; H — геопотенциал; c_i — функции состояния из (3); $n+4$ — общее число субстанций; R — универсальная газовая постоянная; $\sigma_0, \gamma(p), \beta_i$ — весовые множители, выбранные так, чтобы операции сложения разнородных компонент функции состояния имели смысл.

Для исследования ФЧ вводим согласованное с (2)–(7) скалярное произведение, порожаемое правой частью соотношений чувствительности для функционалов $\Phi_k(\varphi)$ [4]:

$$\delta \Phi_k^h(\varphi) \equiv (\text{grad}_{\mathbf{Y}} \Phi_k^h(\varphi), \delta \mathbf{Y}) \equiv \frac{\partial}{\partial \alpha} I^h(\varphi, \mathbf{Y} + \alpha \delta \mathbf{Y}, \varphi_k^*) |_{\alpha=0}, \quad (8)$$

$$\delta \mathbf{Y} = \omega \text{grad}_{\mathbf{Y}} \Phi_k^h(\varphi), \quad k = \overline{1, K_f}, \quad (9)$$

где α, ω — вещественные параметры; $\delta \mathbf{Y}$ — вариации вектора параметров моделей, которые мы обычно выбираем пропорциональными ФЧ; φ — решение основной задачи (1) при заданных значениях набора параметров \mathbf{Y} , а φ_k^* — решение сопряженной задачи, порожденной вариационным принципом для оценок вариаций функционала $\tilde{\Phi}_k^h(\varphi)$. Индекс h отмечает дискретные аналоги. Для удобства алгоритмических конструкций в число компонент вектора параметров \mathbf{Y} включены все функции (источники, начальные данные, функции неопределенностей моделей и др.), участвующие в моделях, кроме функции состояния. Структура и размерности компонент вектора параметров и структура функционала интегрального тождества определяют структуру фазового пространства функций чувствительности в (8), (9).

Для дальнейшего изложения удобно ввести диагональную весовую матрицу C , а скалярные произведения типа (7), (8) представить в виде

$$(\varphi, \varphi^*)_{Q(D_t)} = [C\varphi, \varphi^*] = [C^{1/2}\varphi, C^{1/2}\varphi^*], \quad (10)$$

расширяя в случае необходимости количество и состав компонент в вектор-функциях состояния.

2. Алгоритм экспресс-анализа баз данных

Для оперативного анализа баз данных большой размерности, описывающих эволюцию изучаемых процессов, будем использовать методы ортогональной декомпозиции. Отправной точкой для этих целей является определение структуры баз данных и энергетического скалярного произведения, задающего метрику и тип функционалов в пространстве анализируемых полей, представляющих собой многомерные многокомпонентные агрегаты высокой размерности.

Не вдаваясь в детали описания информационного и физического содержания этих функций, сформулируем сначала общую схему вычислительных алгоритмов. Сами поля представляют собой результаты натуральных исследований сложных природных процессов и/или результаты расчетов по моделям этих процессов при различных способах задания входных данных, например, описанных в предыдущем разделе. Мы будем представлять эти поля в виде векторно-матричных объектов в вещественных линейных пространствах. Заметим, кстати, что векторно-матричные операции имеют простую реализацию на ЭВМ и допускают эффективные схемы распараллеливания вычислительных алгоритмов.

Сначала представим базу данных в виде $(N \times n)$ -матрицы Z , где n — число вектор-столбцов внешней структуры, а N — число элементов в вектор-столбцах внутренней структуры. Для удобства построения алгоритмических конструкций приведем все многокомпонентные вектор-функции к одинаковой (физической) размерности в смысле выбранного скалярного произведения (10). То есть векторы-столбцы матрицы Z имеют представление вида $C^{1/2}\varphi$. При необходимости центрируем их относительно некоторого среднего состояния. После этих операций нормируем векторы к единичной длине.

Матрицу Z можно рассматривать двояко: как совокупность n векторов из вещественного пространства R_N или как совокупность N векторов из R_n . Матрицу Z организуем так, чтобы $n \ll N$. Для обеспечения эффективности вычислений параметр n будем задавать величиной порядка 100. На величину параметра размерности N и на внутреннюю структуру компонент вектор-столбцов матрицы ограничений практически нет. Все определяется мерой информативности процесса вычислений функционала скалярного произведения.

Наиболее эффективную и наглядную форму описания многокомпонентных баз данных и методов их анализа и декомпозиции можно получить, используя аппарат исследования билинейных и квадратичных форм в вещественных векторных пространствах со скалярными произведениями [5]. Исходя из этих предпосылок для обобщенного описания базы данных определим квадратичную форму вида

$$\eta(\mathbf{v}) = (Z\mathbf{v})^T(Z\mathbf{v}) = \mathbf{v}^T Z^T Z \mathbf{v} \equiv \mathbf{v}^T \Gamma \mathbf{v} \quad (11)$$

на множестве векторов $\mathbf{v} \in R_n$, удовлетворяющих условиям нормировки $\mathbf{v}^T \mathbf{v} = 1$, а $\Gamma = Z^T Z$ — симметричная неотрицательно определенная $(n \times n)$ -матрица Грама для исходной совокупности вектор-столбцов матрицы Z , верхний индекс T определяет операцию транспонирования. Вариационная форма записи (11) согласуется с вариационной структурой задач экологического прогнозирования (1)–(10) и позволяет использовать понятия главных компонент и главных факторов [6] для интерпретации ортогональных разложений. Решая оптимизационную задачу последовательного нахождения максимальных и минимальных значений квадратичной формы на множестве нормированных векторов $\mathbf{v} \in R_n$, получаем набор соотношений для ортогональной декомпозиции векторов базы данных $Z \in \{R_N, R_n\}$. Такой способ описания и трансформации баз данных является

развитием используемого нами вариационного подхода для организации системы моделирования и расширяет возможности для анализа сложных систем при совместном использовании моделей и фактических данных. Приведем кратко основные конструктивные элементы.

Расчет главных базисных компонентов в пространстве \mathbf{R}_n . Решается полная спектральная проблема для $(n \times n)$ -матрицы Грама со специальной нормировкой собственных векторов для учета масштабов возмущений:

$$\Gamma \mathbf{v} = \lambda \mathbf{v}, \quad \mathbf{v}_p^T \mathbf{v}_q = \delta_{pq} \lambda_p, \quad \mathbf{v}_p = \{v_p(\beta), \beta = \overline{1, n}\}, \quad \sum_{p=1}^n \lambda_p = \text{tr}(\Gamma), \quad (12)$$

$$p, q = \overline{1, n}, \quad \lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_n \geq 0.$$

Собственные векторы \mathbf{v}_p нормированы и упорядочены по убыванию соответствующих собственных значений λ_p . При разложениях учитываются только векторы, отвечающие собственным значениям $\lambda_p > 0$. Собственные векторы $\mathbf{v}_p, p = \overline{1, n}$, представляют собой ортогональный базис в пространстве размерности n , содержащий вектор-строки матрицы данных Z , т. е. независимая переменная, представляющая номер компонента вектора, определяется по ведущему индексу $i (i = \overline{1, n})$ внешней структуры базы данных Z .

Формирование базисных подпространств в \mathbf{R}_N . Их структура подобна структуре исходных векторов φ :

$$\psi_p(k) = \lambda_p^{-1} \sum_{j=1}^n \mathbf{v}_p(j) \mathbf{Z}_j(k), \quad (13)$$

$$p, q = \overline{1, n}, \quad k = \overline{1, N}, \quad (\psi_p, \psi_q) = \delta_{pq}.$$

Здесь $\mathbf{Z}_j(k)$ — вектор-столбцы матрицы Z ; δ_{pq} — кронекер-дельта; параметр $(k) \in K$ по существу является мультииндексом, по которому определяется номер компонент векторов, упорядоченных по расположению в пространственно-временной области D_t и по физическому содержанию соответствующих функций, участвующих в скалярных произведениях (8), (10). Величина собственных значений λ_p является характерным масштабом возмущений и может использоваться в качестве меры информативности пар соответствующих им векторов $\{\mathbf{v}_p, \psi_p\}$.

Композитные базисные подпространства. Эти объекты рассчитываются как взвешенная линейная комбинация ортогональных базисных векторов (13) в виде

$$\boldsymbol{\eta}_m(k) = \sum_{i=1}^m \chi_i (\lambda_i / \lambda_1) \psi_i(k), \quad 1 < m \leq n, \quad k \in K, \quad (14)$$

где χ_i — это детерминированный или случайный параметр, который используется для организации факторных подпространств на базе лидирующих ортогональных подпространств в соответствии с масштабами их возмущений.

Синтез подпространств с фильтрацией процессов выбранных масштабов. Сборка векторов состояния для специальных сценариев моделирования осуществляется с использованием базисных векторов с фильтрацией по заданному критерию информативности:

$$\mathbf{Z}_i^{(\alpha)}(k) = \sum_{p=1}^{\alpha} \psi_p(k) \mathbf{v}_p(i), \quad i \in \overline{1, n}, \quad k \in K, \quad \alpha \leq n. \quad (15)$$

Обычно фильтрация осуществляется при $\alpha < n$ за счет исключения составляющих, которые отвечают малым собственным значениям. При $\alpha = n$ получается исходная совокупность векторов \mathbf{Z}_i .

Энергетический критерий для выявления областей заданного уровня значимости. Этот критерий необходим для выявления областей повышенных рисков и уязвимости, а также для обнаружения центров энергетической активности климатической системы. Следуя (10), обозначим через $\gamma^c(\boldsymbol{\psi}, k) = [\boldsymbol{\psi}, C\boldsymbol{\psi}]_k$ энергию вектора $\boldsymbol{\psi}$ в подобласти, определяемой мультииндексом $k \in K$. Определим

$$A \equiv \gamma^c(\boldsymbol{\psi}, k_0) = \max_{k \in K} \gamma^c(\boldsymbol{\psi}, k). \quad (16)$$

Здесь $\boldsymbol{\psi}$ — один из векторов из (9), (13)–(15) или их линейные комбинации, а k_0 — мультииндекс локализации максимального значения функции $\gamma^c(\boldsymbol{\psi}, k)$. Используя эти определения, рассчитываем область $k \in K_0^\alpha(\boldsymbol{\psi}) \subset K$, если $\gamma^c(\boldsymbol{\psi}, k) \geq \alpha A$, где $0 < \alpha < 1$ — параметр, выбираемый для определения области по заданному относительному уровню энергетической значимости. Анализ конфигурации областей $K_0^\alpha(\boldsymbol{\psi})$ в зависимости от параметра α используют для идентификации энергоактивных областей и областей повышенной чувствительности в глобальной климатической системе и ее частях в D_t .

Принципы организации прогностических сценариев. Учет климатической информации в природоохранном прогнозировании осуществляется путем формирования специальных сценариев для расчета гидродинамического фона, на котором происходят процессы переноса и трансформации загрязняющих веществ, описываемых моделями (1)–(3) и алгоритмами теории чувствительности (8), (9). Что касается сценарного подхода как такового, то в настоящее время активно развивается техника сценарных ансамблей. Особенно эта техника используется применительно к проблемам прогноза погоды (см. обзор в [7]). Однако в этом подходе остается открытым вопрос, по каким критериям выбирать сценарии и как совместно анализировать их результаты в соответствии с заданными целевыми установками. Предлагаемый нами подход позволяет конструктивно решить эти вопросы, поскольку он опирается на количественные представления обо всех априорных знаниях, касающихся изучаемых процессов, находящихся в базе данных, с возможностью совместного количественного и качественного анализа в рамках ортогональной декомпозиции [1, 3, 8]. Конкретно использование результатов ортогональных разложений позволяет формировать сценарии для типичных и экстремальных ситуаций, разделить процессы на климатические и “шумы” и идентифицировать пространственно-временные области по интенсивности развития процессов в соответствии с заданными критериями информативности в метрике, заложенной в скалярных произведениях.

3. Методы теории чувствительности для оценок рисков и качества прогнозов

Методы теории чувствительности дают возможность количественно и достоверно оценивать тенденции влияния изменений различных факторов на изменения целевых функционалов, дающих обобщенную оценку прогнозируемых характеристик. Существенную роль в них играют различные комбинации решений прямых и сопряженных задач (СЗ). Различные аспекты применения сопряженных задач для изучения сложных систем обсуждаются в монографии [9]. Здесь мы строим сопряженные задачи для методов теории

чувствительности функционалов (4) с помощью вариационных принципов [4]. Все задачи порождаются с помощью соотношений (5), (6), (8) по единой схеме и имеют одинаковую структуру. Различия между ними состоят только в формулах вычисления функций $\text{grad}_{\varphi} \Phi_k^h(\varphi)$, выступающих как источники в СЗ для каждого индивидуального функционала из совокупности (4). После задания функций-источников все СЗ могут решаться параллельно и все функции чувствительности для всей совокупности задач также могут рассчитываться в параллельном режиме.

Использование методов чувствительности в цикле исследований в режиме прямого и обратного моделирования применительно к проблемам диагностики качества среды и природоохранного прогнозирования делает их эффективным инструментом для решения многих вопросов, в том числе следующих.

1. *Оценка областей риска и уязвимости.* Принимая вариации целевого функционала за меру изменений качества атмосферы в области рецептора, с помощью алгоритма (8), (9) получаем информацию для оценки риска/уязвимости рецепторов по отношению к воздействиям естественных и антропогенных факторов. Для этих целей задается некоторый диапазон изменения вариаций функционала. В зависимости от того, попадают величины вариаций в этот диапазон или нет, можно квалифицировать изучаемую ситуацию как экологически благополучную или нет. Что касается ФЧ, то они дают детальное описание пространственно-временной динамики влияния возмущений параметров на поведение системы. При идентификации характера ситуаций в первую очередь надо обращать внимание на области локальных минимумов и максимумов ФЧ для тех параметров, которые несут информацию об интенсивности выбросов токсичных веществ из источников или о константах скоростей трансформации примесей в механизмах, порождающих опасные продукты из первоначально относительно безобидных веществ-предшественников. В первом из этих примеров случае осуществляется анализ источников, попадающих в области носителей функции чувствительности с заданным диапазоном уровней значимости ФЧ. Второй случай более сложный. Здесь требуется исследовать чувствительность механизма трансформации, который описывается жесткими системами кинетических уравнений. Для этих целей мы строим новые алгоритмы решения прямых и сопряженных задач динамики атмосферной химии и аэрозолей, необходимые для реализации методов теории чувствительности.

2. *Оценка влияния неопределенностей* на прогноз атмосферных и экологических условий. Алгоритмически эти задачи близки к задачам оценки рисков.

3. *Включение обратных связей* от целевых функционалов к моделям процессов и идентификация параметров источников возмущений. Для этих задач требуются специальные вариационные принципы, чтобы организовать обратные связи.

4. Саяно-Алтайский регион в динамике климатической системы

В качестве примера приведем некоторые результаты исследования с помощью метода ортогональной декомпозиции климатического режима центральной части Евразийского континента, включающей Саяно-Алтайский регион, регион озера Байкал и сопредельные территории. Эта область характеризуется высокой степенью циклонической активности [10] и находится на пересечении глобальных транспортных потоков загрязнения атмосферы, что создает предпосылки возникновения ситуаций экологических рисков и требует повы-

шенного внимания при планировании хозяйственной деятельности в Сибирском регионе.

Для исследований используется база данных реанализа [11] за 1950–2002 гг. Анализ главных факторов глобального масштаба показал, что этот регион постоянно находится между двумя крупномасштабными образованиями высокой энергетической активности [12]: в зимний сезон — между Тихоокеанской и Атлантической энергоактивными зонами, а в летний — между Арктической и Южно-Азиатской зонами. В численных экспериментах здесь рассматривается регион между $45\text{--}60^\circ$ с.ш. и $75\text{--}115^\circ$ в.д., для которого ищутся главные компоненты и главные факторы в динамике климатического режима. Детали организации численных экспериментов, подобных этому, описаны в [8].

Анализ поведения временной совокупности всех факторов свидетельствует о высокой изменчивости климатической составляющей полей в этом регионе. Подчеркнем еще раз,

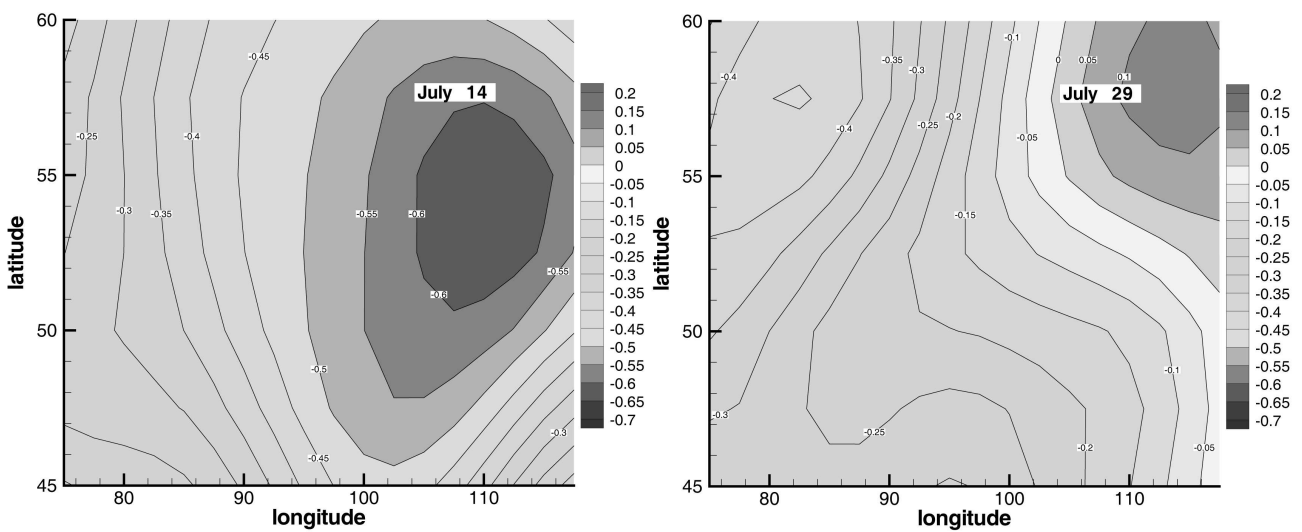


Рис. 1. Первый ортогональный базисный вектор: слева — для момента времени 0.0 GMT 14 июля, справа — для 0.0 GMT 29 июля.

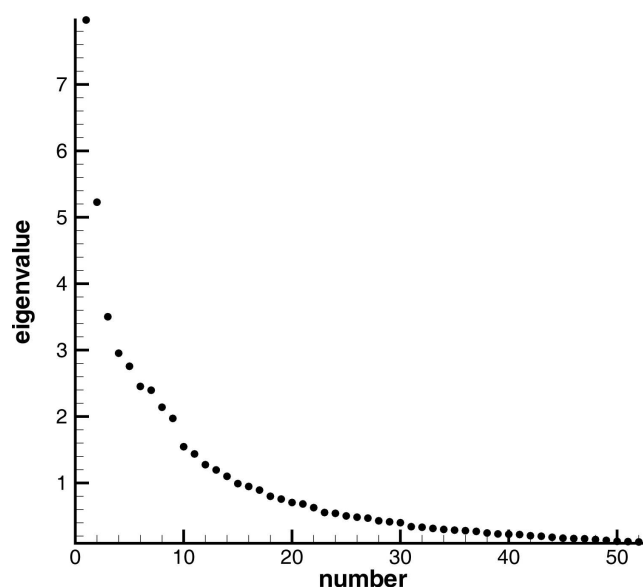


Рис. 2. Собственные значения матрицы Грама.

что в наших построениях главные факторы имеют четырехмерную структуру, т. е. изменяются не только по пространству, но и по времени. В частности, поля, представленные на рис. 1, являются двумя фрагментами из 62 первого лидирующего вектора для “климатически обобщенного” июля. Эти поля соответствуют геопотенциалу на уровне 500 ГПа в рассматриваемой пространственной области на сферической Земле.

На рис. 2 приведена функция информативности базисных подпространств главных компонент в R_n и главных факторов в R_N , измеряемая величиной собственных значений матрицы Грама из (11), (12). Что касается информационной значимости, то, как видно из рис. 2, для климатически значимых сценариев необходимо брать порядка 14 лидирующих факторов, т. е. факторов, соответствующих собственным значениям $\lambda_p > 1$. Заметим, что, в отличие от других регионов, для рассматриваемой области в лидирующей группе базисных подпространств не выделяется вектор, значительно преобладающий над другими. Это говорит о том, что квазистационарные сценарии для представления климатического фона в этой области нерепрезентативны. Для прогнозирования и проектирования необходимо воспроизводить динамические сценарии, что и позволяет сделать предлагаемая здесь методика.

Заключение

Построен математический аппарат, позволяющий эффективно ранжировать информацию из баз данных по заданным критериям. Описаны основные элементы и алгоритмы системы моделирования. Вариационная формулировка методов ортогональной декомпозиции многомерных баз данных согласована с вариационной структурой базовых моделей процессов посредством выбора общего скалярного произведения. Предлагаемый подход дополняет методику решения прямых и обратных задач природоохранного прогнозирования и проектирования и предназначен как для подготовки сценариев, так и для анализа результатов расчетов.

Список литературы

- [1] ПЕНЕНКО В.В., ЦВЕТОВА Е.А. Формирование сценариев атмосферной циркуляции для климатоэкологических исследований // Оптика атмосферы и океана. 2001. Т. 14, № 6–7. С. 491–495.
- [2] ПЕНЕНКО В.В., ЦВЕТОВА Е.А. Изучение изменчивости климатической системы с помощью факторных пространств // География и природные ресурсы. 2004. Спецвыпуск. С. 143–151.
- [3] ПЕНЕНКО В.В., ЦВЕТОВА Е.А. Математические модели для исследования взаимодействий в системе озеро Байкал — атмосфера региона // ПМТФ. 1999. Т. 40, № 2. С. 137–147.
- [4] ПЕНЕНКО В.В. Методы численного моделирования атмосферных процессов. Л.: Гидрометеоиздат, 1981.
- [5] КУРАНТ Р., ГИЛЬБЕРТ Д. Методы математической физики. М.; Л.: Гос. изд-во технико-теорет. лит-ры, 1951. Т. 1. 476 с.
- [6] PRIENDORFER R.W. Principal Component Analysis in Meteorology and Oceanography. Amsterdam: Elsevier, 1988. 425 p.

- [7] TOTH Z., KALNAY E. Ensemble forecasting at NMC: the generation of perturbations // Bull. Amer. Meteor. Soc. 1993. Vol. 74. P. 2317–2330.
- [8] ПЕНЕНКО В.В., ЦВЕТОВА Е.А. Система моделирования для климатозкологических исследований // Вычисл. технологии. 2005. Т. 10, № 8. С. 90–98.
- [9] МАРЧУК Г.И. Сопряженные уравнения и анализ сложных систем. М.: Наука, 1992. 335 с.
- [10] KASAHARA A. Influence of orography on the atmospheric general circulation // GARP Publ. Ser. 1980. N 23. P. 7–52.
- [11] KALNAY E., KANAMITSU M., KISTLER R. ET AL. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // Bull. Amer. Meteor. Soc. 1996. Vol. 77. P. 437–471.
- [12] PENENKO V.V., TSVETOVA E.A. Energy centers of the climate system and their connection with ecological risk domains // SPIE. 2005. Vol. 6160, pt 2, 61602U. P. 1–8.

Поступила в редакцию 9 ноября 2006 г.