

СИСТЕМА МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ КЛИМАТОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ*

В.В. ПЕНЕНКО, Е.А. ЦВЕТОВА

*Институт вычислительной математики
и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия*
e-mail: penenko@sscc.ru, E.Tsvetova@ommgr.sccc.ru

An intelligent modeling system for climatic and ecological studies is described. It contains the elements of several system levels such as basic models of processes; methods and algorithms of sensitivity theory for models and functionals; algorithms for presentation of multicomponent and multidimensional climatic data bases as a set of orthogonal subspaces of principle components etc. The focus is to reveal some aspects of the energy active domains in the climatic system. It is necessary for studies of the regions prone to risk and vulnerability.

Введение

При современных темпах изменений в общественном развитии требуются эффективные средства математического моделирования, обеспечивающие адекватные количественные прогнозы экологической перспективы. В настоящей статье представлены основы построения многофункционального комплекса моделей и создаваемой на его основе информационно-моделирующей технологии для реализации сценарных прогнозов такого типа. Изменения качества природной среды и условий жизни человека происходят на фоне не только региональных, но и глобальных взаимодействий естественных и антропогенных факторов климатической системы. Принципиальная черта предлагаемого подхода состоит в том, чтобы, используя априорные знания и доступную фактическую информацию о климатической системе, выделить ее энергетически активные центры действия и оценить области экологической уязвимости территорий по отношению к антропогенным воздействиям, чтобы в дальнейшем использовать эту информацию в конкретных экологических прогнозах.

Работы по выявлению и изучению климатических центров действия атмосферы ведутся довольно давно. В классической метеорологии к центрам действия обычно относят регионы земного шара, где формируются квазистационарные зоны повышенного и пониженного давления. В литературе по синоптической метеорологии описываются более двадцати центров с относительно устойчивой локализацией по географическому положению [2]. Так, например, в Северном полушарии выделены постоянные центры действия, такие как исландский циклон (минимум), азорский антициклон (максимум), гренладский

*Работа выполняется по Программам фундаментальных исследований РАН (№ 13) ОМН РАН (№ 1.3.2), поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 04-05-64562) и Интеграционными грантами СО РАН (№ 03-130, № 03-137, № 03-138).

© Институт вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук, 2005.

антициклон и др. Свои постоянные центры действия имеются и в Южном полушарии. Различают также несколько сезонных центров активности как в Северном, так и в Южном полушариях.

В 80-х годах Г.И. Марчуком была предложена концепция энергоактивных зон (ЭАЗО) Мирового океана [3, 4]. Эта концепция определила новый подход к изучению центров действия климатической системы с использованием методов теории сопряженных уравнений [4] и стала теоретической основой Национальной программы СССР “Разрезы”, которая была успешно реализована. Основная цель этой программы состояла в изучении взаимодействия атмосферы и океана и оценке роли ЭАЗО в короткопериодных изменениях климата. Было выполнено большое количество натуральных наблюдений и теоретических исследований, сфокусированных на энергоактивных зонах Мирового океана: норвежской, ньюфаундленской, Гольфстриме, тропической Атлантической, Куроисио и т. д. [5].

Описываемый здесь подход развивает концепцию исследования энергетически активных центров действия климатической системы на базе современных информационных и вычислительных технологий для целей долгосрочного экологического прогнозирования, оценок экологических рисков/уязвимости, управления рисками и природоохранного проектирования с позиций устойчивого развития и общественной безопасности.

Теоретическая часть создаваемой вычислительной технологии базируется на комбинации инструментов моделирования четырех типов, а именно: методов ортогонального разложения функциональных пространств на подпространства с выделением главных компонент и факторов [6-9], методов теории чувствительности моделей и функционалов к вариациям параметров, методов прямого и обратного моделирования с усвоением фактических данных [8-11]. Идентификация главных факторов, которые обнаруживаются в поведении климатической системы, занимает центральное место в формировании сценариев и анализе результатов, полученных в численном моделировании. В терминах главных факторов возможна также оценка отклика климатической системы на антропогенные воздействия. Информационно-моделирующая система работает с информацией нескольких типов. Это данные наблюдений о фактическом поведении климатической системы, результаты сценарных расчетов на базе математических моделей (гидродинамики, гидрологического цикла в атмосфере, переноса и трансформации примесей), поля рассчитанных значений функций чувствительности (ФЧ) заданного набора обобщенных характеристик системы к вариациям параметров моделей и источников естественного и антропогенного происхождения и т. д. Так как информация имеет разносторонний характер, для ее анализа и интерпретации также используются численные модели и связанные с ними целевые функционалы, которые нужны как средство сжатого представления информации. В зависимости от целей исследования вводятся различные функционалы для описания энергетики изучаемых процессов, соотношений теории чувствительности, социально-экономических критериев и ограничений экологической безопасности и т. д. Конструктивно они выражаются как скалярные произведения на пространствах, образованных многомерными (в общем случае) массивами разнородной информации. Существенно, что эти скалярные произведения имеют энергетический смысл и строятся по такому же принципу, как и функционалы в вариационных формулировках математических моделей изучаемых процессов.

1. Вариационные формулировки и функционалы

Информационно-моделирующая система включает несколько системных уровней. Базовый уровень составляют математические модели процессов. В данном конкретном случае

это модели гидродинамики, переноса и трансформации влаги, а также химически и оптически активных примесей в газовом и аэрозольном состоянии. Главное назначение моделей в системном контексте — связать функции состояния климатоэкологической системы с естественными и антропогенными факторами, выступающими как источники возмущений. С позиций вариационного принципа они являются ограничениями на классы функций, на которых определяются целевые функционалы. Модели базового системного уровня можно представить в следующем операторном виде:

$$B \frac{\partial \varphi}{\partial t} + G(\varphi, \mathbf{Y}_b) - \mathbf{f} = 0, \quad \varphi|_{t=0} = \varphi^0(\mathbf{x}), \quad (1)$$

где $\varphi \in Q(D_t)$, $Q(D_t)$ — вещественное пространство вектор-функций состояния; B — блочная диагональная матрица; $G(\varphi, \mathbf{Y}_b)$ — нелинейный матричный дифференциальный оператор, содержащий частные производные по пространственным переменным $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3)$; $\mathbf{Y} = (\mathbf{Y}_b, \mathbf{f}, \varphi^0)$ — совокупность входных параметров; \mathbf{Y}_b — внутренние параметры модели; \mathbf{f} — источники; φ^0 — априорная оценка начального состояния; $\mathbf{Y} \in R(D_t)$; $R(D_t)$ — область допустимых значений параметров, $D_t = D \times [0, \bar{t}]$, D — область изменения пространственных координат, $t \in [0, \bar{t}]$ — интервал изменения времени. Область D может быть глобальной на сферической Земле либо ограниченной частью глобальной системы. Граничные условия для замыкания моделей задаются в зависимости от постановки задачи и включаются в определение класса функций $Q(D_t)$. Энергетика системы описывается с помощью интегрального тождества вариационной формулировки моделей [8]. Для исследования поведения климатоэкологической системы в виртуальном пространстве, описываемом с помощью параметров модели и внешних источников, введем совокупность целевых функционалов типа скалярного произведения

$$\Phi_k(\varphi) = \int_{D_t} F_k(\varphi) \chi_k(\mathbf{x}, t) dDdt \equiv (F_k, \chi_k), \quad \chi_k \in Q^*(D_t), \quad (2)$$

где F_k — функции заданного вида, ограниченные и дифференцируемые по φ ; χ_k — неотрицательные весовые функции; $\chi_k dDdt$ — соответствующие им меры Радона или Дирака; $Q^*(D_t)$ — пространство функций, сопряженных по отношению к функциям состояния. В частности, эти функционалы используются для оценок экологических рисков и уязвимости системы по отношению к естественным и антропогенным воздействиям. При этом получают специальные функции риска, которые рассчитываются с помощью методов теории чувствительности моделей и функционалов к вариациям параметров и источников. Существенным элементом этих конструкций являются сопряженные задачи, порождаемые вариационными принципами. Подчеркнем еще раз, что для совместного анализа данных, моделей и ФЧ требуются согласованные между собой определения энергетических скалярных произведений в соответствующих функциональных пространствах.

Упомянутый выше вариационный принцип формулируется для оценок вариаций расширенных функционалов вида [8]:

$$\tilde{\Phi}_k(\varphi) \equiv \Phi_k(\varphi) + I(\varphi, \varphi^*, \mathbf{Y}), \quad k = \overline{1, K}; \quad (3)$$

$$I(\varphi, \varphi^*, \mathbf{Y}) = \int_{D_t} \left(B \frac{\partial \varphi}{\partial t} + G(\varphi, \mathbf{Y}_b) - f \right) \varphi^* dDdt = 0, \quad (4)$$

$\varphi \in Q(D_t)$, $\varphi^* \in Q^*(D_t)$; $\mathbf{Y} \in R(D_t)$. Интегральное тождество (4) представляет собой вариационную формулировку модели (1). Функционал в нем выбирается так, чтобы

при $\varphi^* = \varphi$ (4) превращалось в уравнение баланса полной энергии системы. На его основе получают все требуемые определения скалярных произведений. Например, если в качестве базовых моделей взять модель гидродинамики атмосферы в квазистатическом приближении и модели переноса и трансформации примесей, то энергетическое скалярное произведение для функций состояния в (4) можно определить в виде

$$(\varphi, \varphi^*)_{D_t} = \int_{D_t} \{uu^* + vv^* + \sigma_0(TT^* + (\alpha(p)/R^2)HH^*)\} dDdt + \sum_{i=1}^n \int_{D_t} \beta_i \varphi_i \varphi_i^* dDdt, \quad (5)$$

где $\varphi = (u, v, T, H, \varphi_i, \quad i = \overline{1, n})$ — функция состояния; u, v — горизонтальные составляющие вектора скорости; T — температура; H — геопотенциал; φ_i — функции, описывающие компоненты гидрологического цикла и концентраций примесей в газовом и аэрозольном состоянии; n — общее число субстанций; $\sigma_0, \alpha(p), \beta_i$ — весовые множители; R — универсальная газовая постоянная.

Второй, более высокий системный уровень представляют алгоритмы реализации соотношений теории чувствительности для целевых функционалов. Здесь используются условия стационарности расширенных функционалов (3) по отношению к вариациям функций состояния и сопряженных функций. При этом возникают сопряженные задачи, замыкающие на себя все внутренние степени свободы моделей. С использованием решений основных и сопряженных задач конструируется набор соотношений чувствительности для целевых функционалов, в которых внешние по отношению к системе возмущения учитываются посредством ФЧ. Чтобы пояснить смысл включения в анализ ФЧ, заметим, что для каждого функционала можно рассчитать столько ФЧ, сколько в модели параметров и источников. И снова для выявления приоритетов в анализе ФЧ необходимы согласованные с (3)—(5) скалярные произведения, порождаемые соотношением чувствительности (6) для функционала $\Phi_k(\varphi)$. Алгоритмическая схема таких построений имеет вид

$$\delta\Phi_k(\varphi) = (\text{grad}_{\mathbf{Y}}\Phi_k(\varphi, \delta\mathbf{Y}) \equiv \frac{\partial}{\partial\xi} I^h(\varphi, \varphi_k^*, \mathbf{Y} + \xi\delta\mathbf{Y})|_{\xi=0}, \quad (6)$$

$$\delta\mathbf{Y} = \epsilon \text{grad}_{\mathbf{Y}}\Phi_k(\varphi), \quad (7)$$

где ξ, ϵ — вещественные параметры; $\delta\mathbf{Y}$ — вариации параметров моделей; φ — решение основной задачи (1) при заданном наборе параметров \mathbf{Y} , а φ_k^* — решение сопряженной задачи, порожденной вариационным принципом для оценок вариаций функционала $\tilde{\Phi}_k(\varphi)$. Индекс h отмечает дискретные аналоги.

2. Выделение ортогональных факторных подпространств

Таким образом, мы используем два типа скалярных произведений для сжатия внутренней структуры полей. Первый определяется непосредственно на функциях состояния моделей, а второй — на ФЧ заданного набора целевых функционалов к вариациям параметров. Они могут использоваться как вместе, так и по отдельности. Дальнейшие построения направлены на выделение из всей совокупности изучаемых данных главных компонентов и главных факторов, что и составляет третий системный уровень.

Итак, рассмотрим совокупность данных, подлежащих анализу с целью выявления характера изменчивости исследуемых процессов. Формально структура всех пространств может быть представлена в виде

$$\varphi = \{\varphi_q(\mathbf{x}, t), \quad q = \overline{1, N}\} \in Q^h(D_t^h). \quad (8)$$

Параметр N задает количество векторов в базе данных. По этому параметру определяется общая структура самой базы данных и алгоритмов обработки информации. Если база данных содержит только ФЧ, то число векторов в ней равно числу целевых функционалов (2). В свою очередь, каждый из векторов $\varphi_q(\mathbf{x}, t)$ имеет внутреннюю блочную структуру

$$\varphi_q(\mathbf{x}, t) \equiv \{\varphi_{q\alpha}(\mathbf{x}, t)\}, \quad \alpha = \overline{1, \alpha_k}, \quad \alpha_k \geq 1, \quad (9)$$

с заданным набором различных по физическому смыслу и информационному содержанию компонент. Количество α_k таких составляющих определяется формой скалярного произведения типа (4)–(6). Например, если используются скалярные произведения, порождаемые дискретными аналогами формул типа (6), (7), то параметр $\alpha_k = 4 + n$. Для формул типа (6) α_k равно числу варьируемых компонент векторов \mathbf{Y} , описывающих совокупности параметров моделей и внешних источников. Кроме этого, каждый внутренний блок $\varphi_{q\alpha}$ в (9) имеет свою пространственно-временную структуру и число компонент, определяемых в соответствии со структурой системы координат (\mathbf{x}, t) в областях D_t и D_t^h . В общем случае ограничений на внутреннюю структуру и размерности векторов φ_q нет.

Построением информационно-моделирующей системы мы преследуем две цели:

- создать инструментарий в виде комплекса алгоритмов и моделей для тематической обработки больших массивов данных;
- провести цикл исследований на примере конкретной информации.

Опишем основные этапы технологии, относящиеся к анализу информации. Предварительно векторы исходной совокупности центрируются относительно некоторого среднего состояния и нормируются на единицу с сохранением структуры и физического содержания в целом и различных компонент — блоков в соответствии с выбранными функционалами скалярных произведений в дискретных пространствах.

1. Для обобщенного представления информации о совокупности векторов (8), (9) формируется $N \times N$ -матрица Грама. Элементы матрицы рассчитываются по процедурам реализации заданной структуры скалярных произведений.

2. Решается полная спектральная проблема для матрицы Грама. Собственные значения упорядочиваются по мере убывания. Собственные векторы имеют размерность N и образуют ортогональную систему с условиями нормировки такими, что квадраты их норм равны соответствующим собственным значениям. В результате получается ортогональное пространство главных компонент (ГК).

3. Рассчитываются ортонормированные базисные векторы (ОБВ) в соответствии с внутренней структурой векторов (9) исходной совокупности (8). Ортогональные пространства ГК и ОБВ ранжируются в соответствии с собственными значениями, которые определяют меру и характерные масштабы возмущений, описываемых этими пространствами по отношению к исходной совокупности (8).

4. С использованием пространств ГК и ОБВ формируются подпространства, аппроксимирующие векторы исходной совокупности (8) в соответствии с заданной мерой информативности, определяемой по величине собственных значений и ГК.

5. С помощью базовых подпространств ГК, ОБВ и аппроксимирующих подпространств

формируются фактор-пространства [12] для детерминированно-стохастических сценариев. Функции распределения для стохастической части подпространств задаются с учетом распределения собственных значений матрицы Грама. Алгоритм формирования фактор-пространств изложен в [10]. В нем для генерирования стохастической части фактор-пространства использована идея о построении случайных фракталов с использованием метода фурье-фильтрации [13].

6. Анализируются поведение в целом и изменчивость исследуемых процессов, описываемых совокупностью (8), (9) в терминах ортогональных пространств ГК и ОБВ.

3. Центры энергетической активности

Для изучения поведения климатической системы необходимы многолетние базы данных. В настоящее время имеется несколько представительных баз данных, которые подходят для наших целей. Мы выбрали данные Реанализа [14]. Это хорошо структурированная информационная система, содержащая набор основных характеристик атмосферы глобальной климатической системы. В численных экспериментах используется база данных за 1950–2002 годы ($N = 53$). Выбранный временной интервал превышает принятый в климатологических оценках период осреднения (порядка 30 лет). Всего анализируется $53 \cdot 365 \cdot 2$ наборов глобальных полей функции состояния (u, v, H, T и т. д.).

Временная структура искомым базисных пространств организуется так, чтобы учесть межгодовой, сезонный и суточный ход процессов. С этой целью исходная база разбивается на 12 частей по числу календарных месяцев и вводятся две шкалы по времени. Внутренняя шкала — 1 месяц в локальном времени с дискретностью 12 часов, а внешняя — с дискретностью 1 год.

Таким образом, получается 12 типов факторных пространств по числу месяцев в году. Для каждого типа строятся 53 пространства ОБВ и ГК (по числу лет). Покомпонентное содержание каждого из них определяется скалярным произведением, которое вводится для расчета соответствующих матриц Грама, необходимых для построения этих пространств. Предусмотрена возможность построения как глобальных, так и региональных факторов. Что касается внутренней структуры (9) векторов (8), то они имеют размерность по времени, равную $2M$ (M — число дней в месяце), с разрешением по горизонтальным переменным $2.5 \cdot 2.5$ град. и с числом уровней по вертикали, задаваемым параметрически. Например, при 20 уровнях по вертикали размер одного компонента-блока в структуре (9) составляет величину более $2 \cdot 10^5$ чисел. В региональном варианте конфигурация, положение региона и пространственно-временное разрешение также задаются параметрически. В идейном плане конструкции ОБВ и ГК развивают понятия естественных ортогональных функций применительно к анализу динамики сложных систем.

На рисунках представлены фрагменты первых главных векторов функции состояния, соответствующие полям горизонтальной скорости на поверхности, соответствующей уровню давления 500 гПа для января (рис. 1) и июля (рис. 2). Жирными линиями выделены очертания материков. Информативности первого ОБВ в долях следа матрицы Грама для всей 53-летней совокупности данных составляют 16.06 и 13.6% для января и июля соответственно. На каждом из рисунков четко выделяются циркуляционные системы в областях, которые относятся к энергетически активным областям в глобальной климатической системе. Сравнительный анализ рисунков дает представление о сезонной изменчивости глобальных характеристик циркуляции атмосферы. Физическая интерпретация, примеры

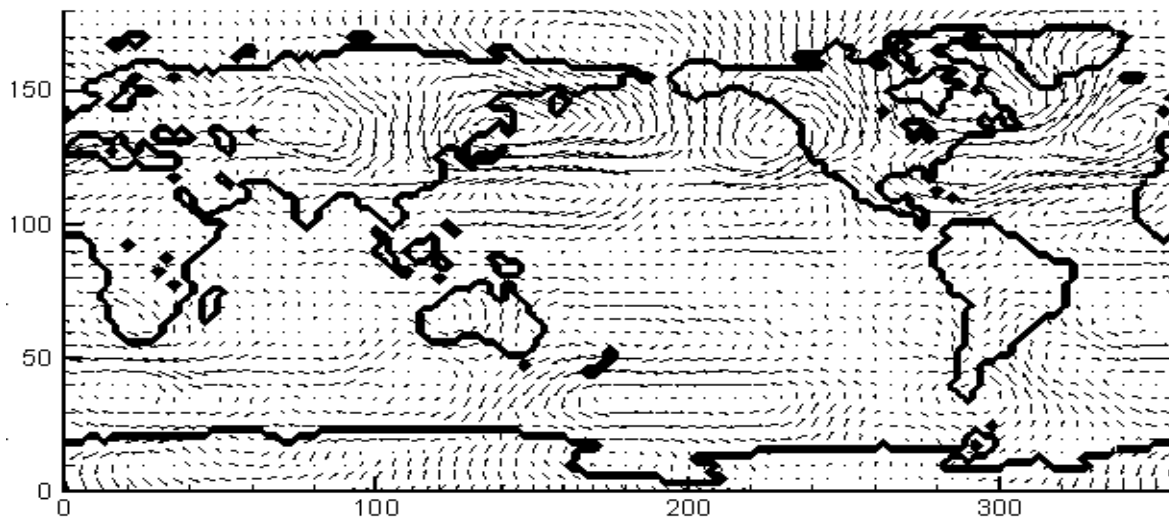


Рис. 1. Компонента первого базисного вектора за январь 1950 — 2002 годов, отвечающая горизонтальному полю скорости на поверхности, соответствующей уровню 500 гПа. Фрагмент относится к 00:00 GMT 1 января.

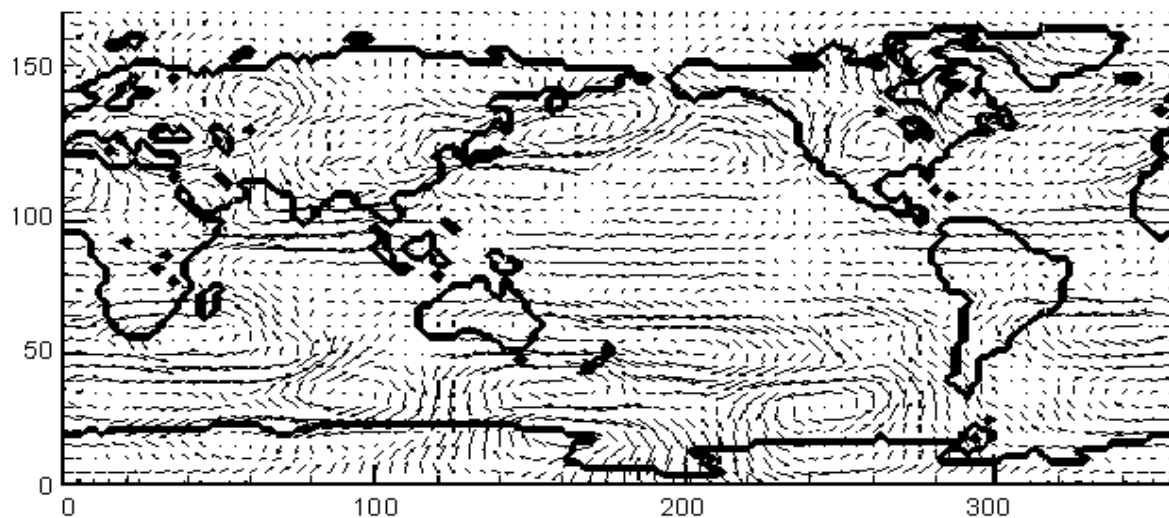


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, но для 00:00 GMT 1 июля.

базисных пространств и главных компонент для поля геопотенциала даны в [11].

Преимущества представления пространства функций (8) в виде объединения ортогональных подпространств очевидны: это удобства проектирования данных на ОБВ и формирования новых подпространств с заданными свойствами с помощью линейных комбинаций ОБВ. Поскольку суммарная дисперсия всей совокупности представляется в виде суммы дисперсий для каждого подпространства без взаимодействий, можно ранжировать выделенные подпространства по убыванию соответствующих им собственных значений, характеризующих масштабы возмущений. Векторы ГК характеризуют межгодовую из-

менчивость многолетней динамики в ортогональных подпространствах ОБВ. Синхронное сравнение ГК и ОБВ для разных месяцев показывает сезонную изменчивость в режиме многолетнего хода. Анализируя совместно систему ГК и ОБВ, можно отметить, что области максимумов модулей компонент ОБВ с интерпретацией в терминах долей стандартного отклонения, выражаемого через собственные значения матрицы Грама, претендуют на роль искомым энергоактивных центров действия в климатической системе. Кроме того, годы, соответствующие номерам компонент векторов ГК с повышенными величинами модулей, можно отнести к годам повышенной энергетической активности.

Таким образом, создаваемая система моделирования позволяет выделять энергетически активные центры действия в атмосфере по заданным критериям информативности, описываемым с помощью функционалов — скалярных произведений. Знание информации об энергетически активных центрах действия атмосферы позволяет адекватно связать влияние естественных и антропогенных факторов при составлении экологических прогнозов.

Список литературы

- [1] ЗВЕРЕВ А.С. Синоптическая метеорология. Л.: Гидрометеиздат, 1968. 774 с.
- [2] МАРЧУК Г.И. Моделирование изменений климата и проблема долгосрочного прогноза погоды // Метеорология и гидрология. 1979. № 7. С. 25–36.
- [3] МАРЧУК Г.И. Сопряженные уравнения и анализ сложных систем. М.: Наука, 1992. 335 с.
- [4] МАРЧУК Г.И., ДЫМНИКОВ В.П., КУРВАТКИН Г.П., САРКИСЯН А.С. Программа “Разрезы” и мониторинг Мирового океана // Метеорология и гидрология. 1984. Т. 6, № 8. С. 9–17.
- [5] ИТОГИ науки и техники. Атмосфера, океан, космос. Программа “Разрезы”. Т. 1–7. 1983–1987. М.: ВИНТИ.
- [6] HARMAN Н.Н. Modern Factor Analysis. Chicago: Univ. of Chicago Press, 1976.
- [7] PREISENDORFER R.W. Principle Component Analysis in Meteorology and Oceanography. Amsterdam; Oxford: Elsevier, 1988.
- [8] ПЕНЕНКО В.В. Методы численного моделирования атмосферных процессов. Л.: Гидрометеиздат, 1981.
- [9] ПЕНЕНКО В.В., ЦВЕТОВА Е.А. Главные факторы климатической системы глобального и регионального масштабов и их применение в экологических исследованиях // Оптика атмосферы и океана. 2003. Т. 16, № 5–6. С. 407–414.
- [10] ПЕНЕНКО В.В., ЦВЕТОВА Е.А. Построение ортогональных факторных пространств для детерминированно-стохастических моделей природных процессов // Тр. Междунар. конф. по вычислительной математике МКВМ-2004. Ч. 1. Новосибирск: Изд-во ИВМиМГ СО РАН, 2004. С. 296–302.
- [11] ПЕНЕНКО В.В., ЦВЕТОВА Е.А. Изучение изменчивости климатической системы с помощью факторных пространств // География и природные ресурсы. 2004. Спецвыпуск. С. 143–152.
- [12] КАНТОРОВИЧ Л.В., АКИЛОВ Г.П. Функциональный анализ. М.: Наука, 1984.

- [13] CROWNOVER R. Introduction to Fractals and Chaos. Boston, London: Jones and Barlett Publ. Inc., 1995.
- [14] 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.

Поступила в редакцию 2 июня 2005 г.