

В.В. Пененко, Е.А. Цветова

Формирование сценариев атмосферной циркуляции для климато-экологических исследований

ИВМиМГ СО РАН, г. Новосибирск

Поступила в редакцию 12.02.2001 г.

Представлен новый подход к формированию сценариев атмосферной циркуляции для решения задач экологического прогнозирования и проектирования. Он основан на совместном использовании моделей гидротермодинамики и фактической информации о состоянии климатической системы. Основное требование к сценариям состоит в том, чтобы их информативность в климатическом плане была не ниже, чем у климатических моделей общей циркуляции атмосферы, а конкретные ситуации из базы данных, по которым они построены, должны воспроизводиться в соответствии с заданными критериями с достаточной степенью точности.

Практическая реализация подхода базируется на методах факторного анализа, усвоения данных измерений и оптимальной экстраполяции по информативным базисам для конкретных ситуаций. В зависимости от целей исследования строятся многокомпонентные базисы с заданной пространственно-временной структурой. Численные модели используются для согласования, усвоения и восстановления недостающих данных, расчета функций состояния, сопряженных функций и функций чувствительности, требуемых для формирования сценариев.

Введение

Проблема формирования гидротермодинамического фона для решения задач экологического прогнозирования и проектирования пока не имеет однозначного решения. Специфика ее состоит в том, что характерные времена функционирования существующих и проектируемых объектов как источников антропогенных воздействий в климатической системе, как правило, значительно больше характерных масштабов интервалов предсказуемости современных моделей гидротермодинамики, составляющих основу моделей общей циркуляции атмосферы и теории климата. Это значит, что в таких задачах предпочтительнее ориентироваться на сценарный подход, в котором прогноз строится по совокупности решений для типичных ситуаций. При конструировании сценариев математические модели, как правило, используются совместно с данными измерений. При этом всегда имеется возможность достижения компромисса в структуре алгоритмического описания процессов с помощью комбинации лучших черт информационных, т.е. базирующихся на фактической информации, и гидротермодинамических моделей.

В предлагаемой методике совокупность сценариев строится на комбинации четырех системных уровней методов, а именно методов факторного анализа, методов исследования чувствительности моделей и функционалов, методов прямого и обратного моделирования с усвоением фактических данных. Идейная основа такого комплексного подхода и принципы организации его алгоритмических конструкций были в общих чертах сформулированы еще в 1981 г. в монографии [1]. Однако в то время возможности его

практической реализации были ограничены недостаточностью вычислительных ресурсов и доступных для численного экспериментирования баз данных.

Ясно, что для экологического прогнозирования сценарии должны отражать реальные ситуации в климатическом масштабе. Следовательно, и базы данных для их построения должны содержать информацию таких временных масштабов. В настоящее время созданы различные базы данных о состоянии климатической системы и имеются возможности их эффективного использования для решения научных и практических задач. В наших исследованиях используется архив данных реанализа NCEP/NCAR [2]. Он очень удобен для многофункциональных применений во взаимосвязанных задачах экологии и климата [3–6]. Для работы с ним была создана специальная развиваемая система моделирования, которая позволяет восстанавливать структуру атмосферной циркуляции с помощью моделей гидротермодинамики с использованием данных реанализа в режиме усвоения [7]. Опыт показывает, что для приложений необходимо строить сценарии пространственно-временной структуры [3–6].

Предлагаемые здесь алгоритмы построения информативных базисов и подпространств с помощью метода факторного анализа дополняют эту систему моделирования. Различные аспекты факторного анализа излагаются в монографии [8]. Следует отметить, что факторный анализ имеет уже столетнюю историю развития, начиная с работы К. Пирсона 1901 г. Некоторые его применения в задачах гидрометеорологии в качестве метода выделения естественных составляющих метеорологических полей представлены в монографии [9].

Постановка задачи

Центральное место в методологии формирования сценариев и анализа результатов моделирования занимают вопросы поиска главных факторов, определяющих поведение климатической системы. В терминах главных факторов можно также проводить идентификацию проявлений реакции климатической системы на антропогенные воздействия.

Задача состоит в построении алгоритмов факторного анализа (в предположении, что структура совокупности данных, подлежащих анализу, определена) и в организации их связей с методами чувствительности моделей. В математическом моделировании всегда имеются три компонента – модель, данные и алгоритмы. В этом блоке главным и связующим звеном являются математические модели изучаемых процессов. В наших работах при формулировке математической модели мы записываем также и подходящий вариационный принцип, который является обобщенной характеристикой всех элементов системы моделирования. Он не только отражает физическую сущность процессов, но и порождает все вычислительные алгоритмы. В данном случае при определении функциональных пространств, скалярных произведений в них, структуры входных и выходных данных и базисных функций мы исходим из формулировок класса моделей, включающих модели гидротермодинамики атмосферы и водных объектов и модели переноса и трансформации загрязняющих примесей [1, 3–6, 10].

Структура информационных пространств и массивов при организации алгоритмов факторного анализа связана со структурой следующих объектов: имеющейся базы данных, функций состояния дискретных аналогов модели; сопряженных функций как решений соответствующих целям исследований сопряженных задач; функций чувствительности моделей и функционалов; функций, представляющих результаты тематической обработки объектов первых четырех типов.

Алгоритмы факторного анализа

Опишем схему построения алгоритмов факторного анализа. Для примера возьмем сферическую систему координат по горизонтали, а по вертикали – координату, следящую за рельефом поверхности. Применительно к этой системе строятся основные элементы нашей технологии моделирования [3, 4, 7].

1. Представим исходные данные в виде совокупности матричной структуры

$$\Phi = \{\Phi_\beta \equiv [\varphi_{\beta\alpha ijk}^j]\}, \quad (1)$$

где β – номер вектора в совокупности, $\beta = \bar{1}, \bar{nk}$, $nk \geq 1$; $\varphi_{\beta\alpha ijk}^j = \varphi_{\beta\alpha}(t_j, \psi_i, \theta_m, \sigma_k)$; j – индекс по времени, $j = \bar{1}, \bar{jk}$, $jk \geq 1$; i – индекс по параллели (по долготе), $i = \bar{1}, \bar{ik}$; m – индекс по меридиану (по

дополнению к широте), $m = \bar{1}, \bar{mk}$; k – индекс по вертикали, $k = \bar{1}, \bar{kk}$; α – индекс по физической размерности компонент (в случае многокомпонентного анализа, например $\varphi_\alpha \equiv \{u, v, \dot{\sigma}, H, p, T, q\}$, $u, v, \dot{\sigma}$ – компоненты вектора скорости; H – геопотенциал; p – давление; T – температура; q – удельная влажность); $\alpha = \bar{1}, \bar{\alpha k}$, αk – число различных компонент, $\alpha k \geq 1$. Если какой-либо параметр из набора $jk, ik, mk, kk, \alpha k$ равен единице, то соответствующая ему размерность у векторов Φ_β исключается из рассмотрения.

2. Введем определение скалярного произведения и квадратурных формул для функции состояния Φ_β ($\beta = \bar{1}, \bar{nk}$) как

$$(\Phi_{\beta_1}, \Phi_{\beta_2}) = \sum_{j=1}^{jk} \sum_{i=1}^{ik} \sum_{m=1}^{mk} \sum_{k=1}^{kk} \left\{ \sum_{\alpha=1}^{\alpha k} \langle \Phi_{\beta_1}, \Phi_{\beta_2} \rangle_\alpha \eta_\alpha \omega_\alpha \right\}_{imk}^j \delta D_{imk}^j, \quad (2)$$

где $\delta D_{imk}^j = \delta D_{imk} \cdot \delta t_j$; $\delta D_{imk} = \delta S_{im} \pi_{im} \delta \sigma_k$; δS_{im} – элементы площади на поверхности сферы; $\pi_{im} \delta \sigma_k$ – размер ячеек по вертикали; π_{im} – функция, зависящая от давления; δt_j – шаг по времени; $\omega_{\alpha imk}^j$ – весовая функция, которая выбирается из условий нормировки векторов совокупности на единицу. Суммы в (2) получаются при аппроксимации интегралов в скалярном произведении. Само скалярное произведение в пространстве функций (1) конструируется, исходя из выражения интеграла полной энергии системы, для которой строится математическая модель, и из определения соответствующего ей интегрального тождества [1, 3]. Для выравнивания физических размерностей в многокомпонентных функциях (1) при $\alpha k > 1$ используются множители η_α . Они выбираются в соответствии с определением полной энергии системы и функционала вариационной формулировки модели и его вариаций для расчета соотношений чувствительности моделей [1, 3, 4, 10]. Таким образом, через выбор скалярного произведения осуществляется связь между методами исследования чувствительности моделей и методами факторного анализа.

3. Предварительная подготовка векторов состоит в расчете средних значений, отклонений от средних значений и в их нормировке. Нормированные векторы отклонений имеют вид

$$\Phi_\beta^{\text{norm}} = \frac{1}{S_\beta} \Phi_\beta' \equiv \left\{ \frac{1}{S_\beta} (\varphi_{\beta\alpha ijk}^j)' \right\}, \quad (3)$$

где $\Phi_\beta' = \Phi_\beta - \bar{\Phi}_\beta$ – вектор отклонений и $S_\beta^2 \equiv (\Phi_\beta', \Phi_\beta')$ – квадрат нормы вектора отклонений.

4. Расчет матрицы Грама для векторов совокупности производится по формулам

$$R = \left\{ r_{\beta_1 \beta_2} \equiv (\Phi_{\beta_1}^{\text{norm}}, \Phi_{\beta_2}^{\text{norm}}), \beta_1, \beta_2 = \bar{1}, \bar{nk} \right\}. \quad (4)$$

Скалярное произведение в (4) рассчитывается по формуле (2).

Суть факторного анализа состоит в следующем [8]. Ищется представление векторов $\Phi_{\beta}^{\text{norm}}$ из совокупности (1) и (3) в виде

$$\Phi_{\beta}^{\text{norm}} = \sum_{p=1}^{nf} a_{\beta p} \mathbf{F}_p, \quad nf \leq nk, \quad \beta = \bar{1}, \bar{nk}, \quad (5)$$

где \mathbf{F}_p – ортонормированные базисные функции; $a_{\beta p}$ – коэффициенты разложения.

В свою очередь, элементы разложения (5) находятся по заданной совокупности числовых значений векторов (3) из условий последовательной минимизации величин

$$V_p = \sum_{\beta=1}^{nk} a_{\beta p}^2, \quad p = \bar{1}, \bar{nf} \quad (6)$$

при ограничениях

$$r_{\beta_1 \beta_2} \equiv \sum_{k=1}^{nf} a_{\beta_1 k} a_{\beta_2 k}, \quad \beta_1, \beta_2 = \bar{1}, \bar{nk}, \quad (7)$$

т.е. каждый из компонентов \mathbf{F}_k в порядке их расположения в (5) должен учитывать максимум суммарной дисперсии исходной совокупности векторов в подпространстве, которое получается вычитанием из векторов (3) суммы вкладов предшествующих \mathbf{F}_k факторов \mathbf{F}_i , $i = \bar{1}, \bar{k} - \bar{1}$. При $k = 1$ учитывается все исходное пространство (1), (3).

Величина V_p представляет собой сумму вкладов базисной функции \mathbf{F}_p , оцениваемых в метрике пространства Φ (1), порождаемой скалярным произведением (2), в суммарную величину норм векторов отклонений (3), которая равна числу nk . Искомые коэффициенты $a_{\beta p}$ в (5) получаются из решения полной спектральной проблемы для матрицы Грама (4).

5. Формулировка полной спектральной проблемы для матрицы Грама записывается в виде

$$R\alpha = \alpha\Lambda, \quad (8)$$

где $\alpha \equiv \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{nk}\}$ – собственные векторы; $\Lambda \equiv \text{diag} \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{nk}\}$ – собственные значения; $\alpha_{\beta} \equiv \{\alpha_{j\beta}, j = \bar{1}, \bar{nk}, \beta = \bar{1}, \bar{nk}\}$ – структура собственного вектора. Первый индекс j – номер компонента этого вектора, второй индекс β – номер вектора. Собственные значения упорядочены по убыванию $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_{nk}$, им соответствуют векторы α_{β} в том же порядке. Для решения полной спектральной проблемы мы используем процедуры из библиотеки LINAL [11].

6. Коэффициенты разложения в (5) получаются при нормировании собственных векторов

$$\mathbf{a}_k = \frac{\sqrt{\lambda_k} \alpha_k}{(\alpha_k, \alpha_k)^{1/2}} \equiv \left\{ a_{jk} = \frac{\sqrt{\lambda_k} \alpha_{jk}}{\sqrt{\sum_{j=1}^{nk} \alpha_{jk}^2}} \right\}, \quad (9)$$

$$j = \bar{1}, \bar{nk}, \quad k = \bar{1}, \bar{nf}.$$

Отсюда

$$\sum_{j=1}^{nk} a_{jk}^2 = \lambda_k = V_k, \quad k = \bar{1}, \bar{nf}. \quad (10)$$

7. Окончательно расчет искомым базисных векторов производится по формулам

$$\mathbf{F}_p = \sum_{\beta=1}^{nk} \frac{a_{\beta p}}{\lambda_p} \Phi_{\beta}^{\text{norm}}, \quad p = \bar{1}, \bar{nf}.$$

В расчете участвуют все исходные нормированные векторы (3). Функцию $f_m(\lambda) = \sum_{k=1}^m \lambda_k$, $m \leq nk$, можно рас-

сматривать как функцию информативности базиса по отношению к исходной совокупности (1); $f_{nk}(\lambda) = nk$. Число базисных функций nf задается, исходя из скорости убывания величин собственных значений и поведения функции $f_m(\lambda)$. Выполнение условий ортонормированности базиса проверяется непосредственно.

Построенные таким образом базисы используются для анализа исходной совокупности (1) с целью идентификации и интерпретации главных факторов, определяющих поведение изучаемой системы. В задачах экологического прогнозирования принимается гипотеза об относительной устойчивости климата. При таких предположениях строятся пространственно-временные базисы с использованием данных реанализа за интервалы времени более 45 лет. По ним формируются «направляющие» подпространства, по которым с помощью математических моделей восстанавливается детальное поведение функций состояния в режимах диагноза, прогноза и экстраполяции.

В качестве примера приведем результаты типичного сценария моделирования по изучению атмосферных процессов методами факторного анализа. В нем ставится задача оценки роли Байкальского региона как источника и рецептора возмущений в климатической системе по проявлениям в полях геопотенциала на 500 мбар поверхности, т.е. требуется оценить масштабы влияния Байкала как климатообразующего фактора в глобальном и региональном аспектах. В сценарии, в частности, рассчитаны факторные составляющие совокупности полей геопотенциала и оценена их информативность на примере декабря 1998 г. Рис. 1 и 2

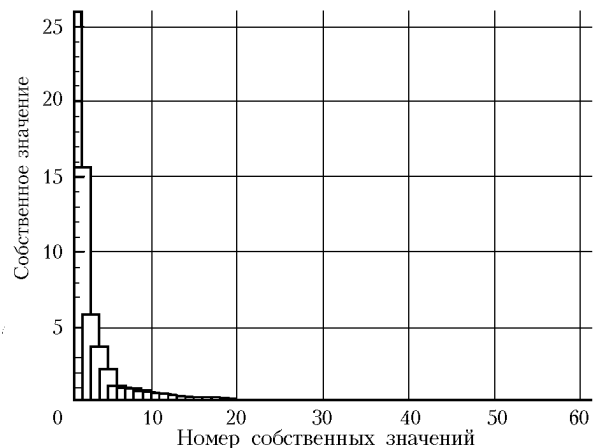


Рис. 1. Собственные значения матрицы Грама для совокупности полей геопотенциала за декабрь 1998 г.

показывают меру информативности базисных функций при размерности анализируемой совокупности,

равной 62 (62 полусферных поля геопотенциала за месяц по данным реанализа). На рис. 1 приведена диаграмма, показывающая величину собственных значений матрицы Грама для этой совокупности. Собственные значения расположены в порядке убывания и определяют относительный вклад соответствующей базисной функции в разложении всей совокупности полей по базису. Сумма вкладов всех базисных функций равна 62.

Рис. 2 показывает, как растет информативность базисной последовательности в зависимости от числа функций в этой последовательности от 1 до 62.

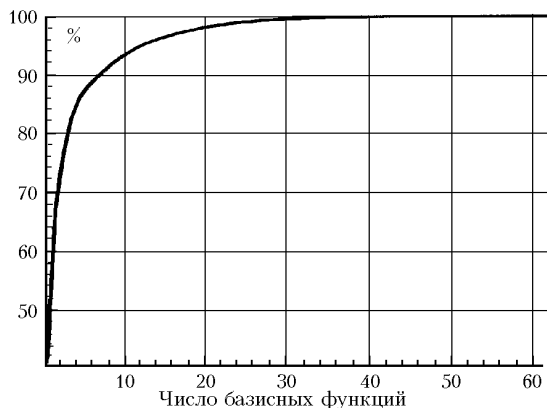


Рис. 2. Функция информативности базисных векторов в зависимости от их числа

На рис. 3 изображена главная составляющая поля геопотенциала. Анализ всей совокупности базисных функций показывает, что влияние Байкала становится

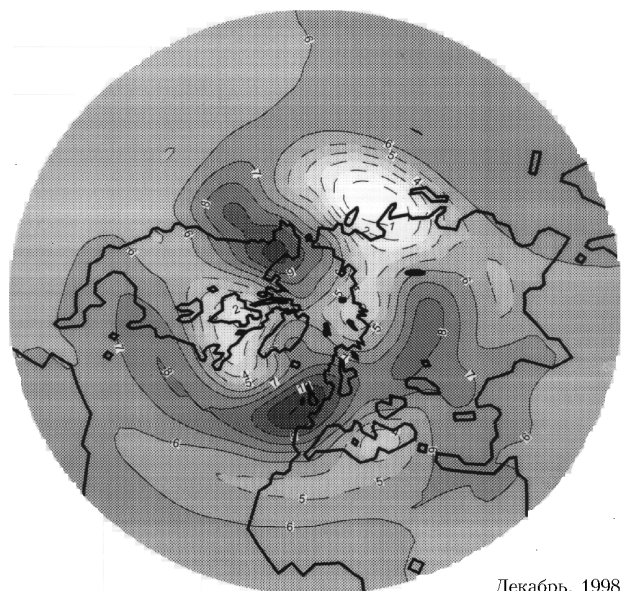
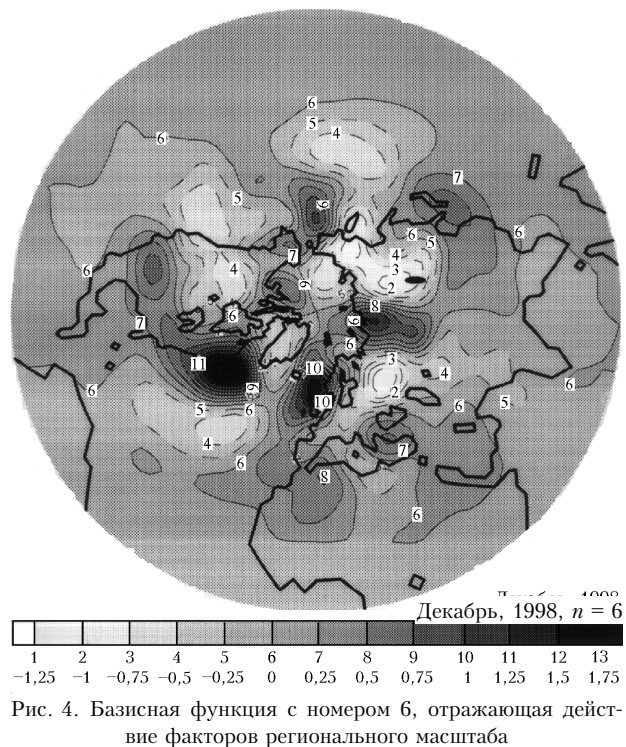


Рис. 3. Главная базисная функция для совокупности полей геопотенциала, соответствующая уровню 500 мбар

заметным в климатической системе на уровне характерных масштабов возмущений, описываемых 6-й-8-й

базисными функциями. Это видно, например, на рис. 4, где представлена 6-я по значимости вклада базисная функция. Здесь Байкал находится в области характерного возмущения регионального масштаба. Относительный вклад функций с номерами 6-8 имеет величину порядка 1 в шкале значений рис. 1, т.е. составляет примерно 1/25 от вклада главных факторов,



показанных на рис. 3. По сравнению базисных функций с номерами 1 (см. рис. 3) и 6 (см. рис. 4) с учетом их вклада можно судить о соотношении глобальных и региональных климатообразующих факторов.

Таким образом, из расчетов следует, что информативность на уровне существующих моделей общей циркуляции, которая в настоящее время по оценкам составляет порядка 90%, достигается (в данной конкретной ситуации) при использовании менее 10 базисных функций. Это подтверждает гипотезу о возможности выделения центров действия в климатической системе, что необходимо для региональных оценок в аспекте глобальных изменений, т.е. можно проследить, на каком уровне главных факторов (масштабов) начинает проявляться влияние региональных возмущений на фоне глобальных. В приведенном здесь конкретном примере это соотношение 25 : 1.

Развитие представленного в настоящей статье направления работ на базе комплексного использования методов теории чувствительности и факторного анализа в технологии моделирования нам кажется приоритетным для дальнейших теоретических и практических климато-экологических исследований.

Работа выполняется при поддержке гранта «Ведущие научные школы» № 00-15-98543, РФФИ (грант № 98-05-65318), Программы перспективных

информационных технологий Минпромнауки России (проект 0201.06.269/349) и Интеграционных грантов СО РАН-2000 (№ 64 и 56).

1. *Пененко В.В.* Методы численного моделирования атмосферных процессов. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 351 с.
2. *Kalnay E., Rasmusson M., Kistler R. et al.* The NCEP/NCAR 40-year Reanalysis Project // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 1996. V. 77. P. 437–471.
3. *Пененко В.В., Цветова Е.А.* Математические модели для исследования взаимодействий в системе «озеро Байкал – атмосфера региона» // *Прикл. мех. и техн. физ.* 1999. Т. 40. № 2. С. 137–147.
4. *Пененко В.В., Цветова Е.А.* Некоторые аспекты решения взаимосвязанных задач экологии и климата // *Прикл. мех. и техн. физика.* 2000. Т. 41. № 5. С. 161–170.
5. *Пененко В.В., Цветова Е.А.* Моделирование процессов переноса примесей в прямых и обратных задачах климатологического мониторинга // *Оптика атмосф. и океана.* 1999. Т. 12. № 5. С. 463–465.
6. *Пененко В.В., Цветова Е.А.* Анализ масштабов антропогенных воздействий в атмосфере // *Оптика атмосф. и океана.* 2000. Т. 13. № 4. С. 392–396.
7. *Пененко В.В., Цветова Е.А.* Подготовка данных для экологических исследований с использованием Reanalysis // *Оптика атмосф. и океана.* 1999. Т. 12. № 6. С. 482–487.
8. *Харман Г.* Современный факторный анализ. М.: Статистика, 1972. 486 с.
9. *Мещерская А.В., Руховец Л.В., Юдин М.И., Яковлева Н.И.* Естественные составляющие метеорологических полей. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 199 с.
10. *Пененко В.В., Алоян А.Е.* Модели и методы для задач охраны окружающей среды. Новосибирск: Наука, 1985. 254 с.
11. *Библиотека LINAL* для решения задач линейной алгебры. Оперативно-информационный материал. Новосибирск: ВЦ СО РАН, 1985. С. 144.

V.V. Penenko, E.A. Tsvetova. **Formation of atmospheric circulation scenarios for climatic-ecological investigation.**

A new approach to the construction of atmospheric circulation scenarios for ecological prognosis and design is presented. It is based on the combined use of hydrodynamical models and climatic data archives. The essential feature required of scenarios is that their informative quality in climatic sense be no less than that of general circulation climatic models. Moreover, any situations from the data base used for the construction have to be reproduced according to given criteria with reasonable accuracy.

A practical realization of the approach is based on the factor analysis, data assimilation, and optimal extrapolation on informative basis. Depending on the goal of investigation, multicomponent bases of given time and space structure are built. Numerical models are used to fit, assimilate, and reconstruct data, to calculate the state, adjoint and sensitivity functions required for scenarios design.