

В.В. Пененко, Е.А. Цветова

Главные факторы климатической системы глобального и регионального масштабов и их применение в экологических исследованиях

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, г. Новосибирск

Поступила в редакцию 28.03.2003 г.

Обсуждается проблема выделения главных факторов, характеризующих многолетнюю динамику климатической системы и их использование для диагностических и прогностических исследований. Главные факторы представляют собой многокомпонентные агрегаты четырехмерной структуры (пространство и время). Они рассчитываются с помощью алгоритмов факторного анализа по многолетним данным о состоянии климатической системы и характеристиках ее чувствительности. Здесь используется база данных Реанализа NCEP/NCAR за 40 лет. Построены два типа главных факторов: глобального и регионального масштабов. Приведены результаты сравнительного анализа их информативности. Сформулированы принципы построения климатоэкологических сценариев с использованием баз данных, факторных решений и математических моделей исследуемых процессов.

Введение

Использование математического моделирования для изучения природных процессов, развивающихся при совместном воздействии естественных и антропогенных факторов, дает возможность решать задачи об изменениях климатоэкологических условий природной среды. Необходимые для таких исследований математические модели представляют собой сложные развиваемые структуры, описывающие различные механизмы изучаемых явлений.

В данной статье рассматриваются некоторые аспекты математического моделирования для диагностики приоритетных факторов в динамике климата, применительно к проблеме изучения экологических откликов на антропогенные воздействия.

Для исследования масштабов взаимодействий различных процессов в климатоэкологической системе, диагноза и прогнозирования их развития вводится совокупность обобщенных характеристик. В качестве таковых удобно использовать базовые элементы факторного анализа и функционалы, определенные на пространствах функций состояния изучаемой системы. Функции чувствительности этих функционалов к вариациям внутренних и внешних параметров содержат информацию о тенденциях изменений в системе под влиянием изменения каждого параметра в отдельности. В отличие от них главные факторы отражают общие закономерности формирования изучаемых процессов и дают декомпозицию их по масштабам.

Таким образом, с одной стороны, производится ранжирование параметров моделей и районирование территорий по интенсивности функций чувствительности, а с другой — декомпозиция пространств функций состояния по масштабам с позиций интегральных представлений факторного анализа. Это

позволяет объединить концепцию об идентификации центров действия в глобальной климатической системе с проблемой выявления областей риска/уязвимости для отдельных регионов.

Современные базы данных о состоянии климатической системы и методы совместного использования моделей и фактической информации дают возможность отработки предлагаемой методики исследования и алгоритмов ее практической реализации.

Чтобы получить количественное и качественное представление о соотношениях между глобальными и региональными процессами, выполнен многомерный многокомпонентный факторный анализ функций состояния глобальной климатической системы и ее региональной части, относящейся к южной части Восточно-Сибирского региона. Выбор этого региона обусловлен тем обстоятельством, что в нем имеется экологически значимый климатообразующий природный объект — оз. Байкал.

В исследованиях используются комплекс математических моделей и технология моделирования, разрабатываемые в ИВМ и МГ СО РАН для решения задач природоохранной тематики, в модификациях, ориентированных на диагностику и прогнозирование возможных климатоэкологических изменений.

1. Постановка задачи

Фундаментальными и прикладными аспектами факторного анализа и анализа главных компонент интересуется множество исследователей из различных областей знания, и по этим вопросам опубликовано большое количество работ. Систематическое изложение основных положений этих методов и некоторые их применения можно найти, например, в монографиях [1–3]. Там же имеется обширная библиография с обзором истории развития методов

начиная с 1873 г. Различные способы анализа главных факторов в последние годы активно используются в задачах метеорологии и океанологии для исследования структуры и изменчивости процессов с широким спектром пространственно-временных масштабов [2–7].

Мы развиваем алгоритмы многомерного многокомпонентного факторного анализа для климатических и экологических исследований и формирования сценариев для целей экологического прогнозирования и проектирования. Специфика этого класса задач состоит в том, что в них для организации сценариев требуются функциональные пространства с детальной структурой представления их элементов в трехмерном пространстве и времени. Приведенные ниже результаты являются продолжением исследований, описанных в [4, 5], поэтому здесь мы дадим только ключевые элементы алгоритмов, наглядно демонстрирующие взаимозависимости между исследуемыми полями функций и ортогональными факторными базами для их представления с заданной степенью информативности.

Пусть

$$\Phi = \{ \varphi_\beta \equiv \varphi_\beta(\mathbf{x}, t, q), \beta = \overline{1, n}, n \geq 1, q = \overline{1, Q}, Q \geq 1 \} \quad (1)$$

– исходная совокупность векторов, имеющих размерность N , центрированных относительно их покомпонентных средних значений и нормированных на единицу. Здесь $(\mathbf{x}, t) \in D_t^h$, D_t^h – область изменения пространственных координат и времени в дискретном представлении, а целочисленный параметр $q \geq 1$ отмечает различные по физическому содержанию компоненты функций состояния. Эта совокупность может рассматриваться как матрица размера $N \times n$ с $n \leq N$. Внутренняя блочная структура векторов φ_β по физическому смыслу, информационному содержанию и количеству компонент может быть произвольной. Она формируется в зависимости от целей исследования. Ее конкретная специфика учитывается в определении скалярного произведения для вычисления элементов матрицы Грама

$$H = \{ H_{\alpha\beta} \equiv (\varphi_\alpha, \varphi_\beta), \alpha, \beta = \overline{1, n} \} \quad (2)$$

и порождаемой им метрики для нормировки векторов исходной совокупности в дискретном представлении. Для задач рассматриваемого класса удобно использовать энергетическое скалярное произведение, вводимое для построения вариационных формулировок моделей и соотношений теории чувствительности для функционалов [4]. В этом случае область D_t^h выбирается так, чтобы она совпадала с сеточной областью для дискретных аналогов моделей исследуемых процессов.

Основная идея факторного анализа состоит в оптимальном выборе представления

$$\varphi_\beta \approx \sum_{p=1}^m a_{\beta p} \mathbf{F}_p, \quad m \leq n, \quad \beta = \overline{1, n}, \quad (3)$$

где \mathbf{F}_p – искомые ортонормированные базисные функции (факторы, естественные ортогональные

функции (ЕОФ)) с внутренней структурой, такой же как и структура векторов φ_β ; $a_{\beta p}$ – коэффициенты разложения или так называемые факторные нагрузки, отражающие вклад соответствующих факторов в φ_β ; m – число факторов, участвующих в разложении в соответствии с заданным уровнем информативности (3) по сравнению с исходной совокупностью векторов.

Базисные функции рассчитываются по исходной совокупности с помощью алгоритма

$$\mathbf{F}_p = \sum_{\beta=1}^n \frac{a_{\beta p}}{\lambda_p} \varphi_\beta, \quad p = \overline{1, m}. \quad (4)$$

Векторы $\mathbf{a}_p \equiv \{a_{\beta p}, \beta = \overline{1, n}\}$, $p = \overline{1, m}$ – собственные векторы $n \times n$ матрицы Грама (2), а λ_p – соответствующие им собственные значения, упорядоченные по убыванию, $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_n$.

Полная спектральная проблема для матрицы Грама решается при условиях последовательной максимизации величин

$$\lambda_p = \sum_{\beta=1}^n a_{\beta p}^2, \quad p = \overline{1, n}. \quad (5)$$

Эти условия используются также для нормировки собственных векторов, элементы которых участвуют в (3) и (4). В расчете (4) участвуют все исходные векторы φ_β , $\beta = \overline{1, n}$. Функцию $f_i(\lambda) = \sum_{k=1}^i \lambda_k$,

$i \leq n$, можно рассматривать как меру информативности набора из первых i базисных функций по отношению к исходной совокупности (1); $f_n(\lambda) = n$. Заметим, что след матрицы Грама (2) также равен n . Число базисных функций m для (4) выбирается, исходя из скорости убывания величин собственных значений и поведения функции $f_i(\lambda)$. Выполнение условий ортонормированности базиса $\{\mathbf{F}_p\}$ проверяется непосредственно.

Величина $b_p = \lambda_p/n$ характеризует информативность фактора с номером p . Она представляет собой суммарную меру относительного вклада фактора с номером p в представление всей совокупности с помощью (3). Упорядочение собственных значений по убыванию дает представление (3) при условиях (5) с последовательным исчерпыванием исходной совокупности с максимизацией вклада факторов (4) на каждом этапе. В этом случае процесс расчета факторов (4), в соответствии с уровнями информативности (5), дает нам декомпозицию исходного пространства (1) по масштабам процессов. Первые m факторов в (3), отвечающих большим по величине собственным значениям и, следовательно, имеющих более высокую меру информативности, обычно называют главными факторами. К этой категории естественно отнести векторы с $\lambda_p > 1$. Это значит, что информативность выбираемых главных факторов не должна быть меньше информативности каждого из исходных векторов.

При большой размерности выборки (1) реализация алгоритмов выделения компонент и факторного

анализа представляет собой сложную и трудозатратную вычислительную проблему. На практике эти алгоритмы весьма чувствительны к увеличению размерностей задач. Эти вопросы детально обсуждаются в [3]. В частности, предлагаются процедуры с декомпозицией векторов исходной совокупности по подобластям и другие приемы уменьшения размерностей. Так, для изучения межгодовых климатических вариаций используются средние за месяц, сезон, год значения полей функций состояния [3, 6, 7].

Чтобы преодолеть трудности, возникающие из-за высокой размерности анализируемых пространств, мы строим модификации алгоритмов, в которых при решении спектральных задач все внутренние степени свободы в векторах (1) замыкаются на себя в элементах матрицы Грама (2). И только при табулировании базисных функций (4) векторы (1) участвуют в полном виде. Алгоритмы параллельной структуры в этих расчетах оказываются чрезвычайно экономичными. Это обеспечивает высокую эффективность вычислительного алгоритма в целом при любом размере векторов. Заметим, что с позиций численного моделирования природных процессов алгоритмы с матрицами Грама со специализированной структурой скалярных произведений более технологичны при работе с многомерными многокомпонентными пространствами функций, чем алгоритмы с ковариационными матрицами, традиционно используемыми в методах факторного анализа.

2. Главные факторы глобального масштаба

Основной интерес представляет изучение межгодовой изменчивости пространственно-временного поведения климатической системы в режиме сезонного и годового хода. Для таких исследований исходное множество (1) соответствующим образом организуется, т.е. задается внутренняя структура векторов в (1) и в факторных агрегатах (4), вводится скалярное произведение.

Для отработки алгоритмов и решения конкретных задач здесь используются база данных Реанализа за 40 лет [8] и система подготовки информации для численных моделей [9]. В соответствии с поставленными нами целями климатоэкологических исследований выбирается совокупность типа (1) с числом исходных векторов, равным количеству лет в используемой базе Реанализа. В данном случае выбираем $n = 40$. Параметр n является ключевым для построения алгоритмов, поскольку от его величины зависят эффективность их реализации и характер интерпретации результатов анализа. Что касается задания внутренней структуры векторов, то здесь возможно множество вариантов. В общем случае это блочные векторы. Ограничений на число блоков и на общую размерность N по физическому смыслу и информационному содержанию нет. Величина N задается исходя либо из количества доступных для анализа данных, либо из возможностей используемой вычислительной техники. Здесь важно, чтобы при табулировании элементов матрицы Грама (2)

сохранялась информативность скалярных произведений по отношению ко всем учитываемым в них компонентам векторов.

В данном конкретном случае при формировании структуры множества (1) и факторных агрегатов (4) в качестве опорного интервала по времени берется месячный интервал с 12-часовым шагом дискретности. Пространственная структура этих векторов определяется в соответствии со структурой сеток численной модели, согласованной со структурой пространственно распределенной информации в базе данных. Компонентный состав векторов задается в зависимости от целей исследований в соответствии с набором компонент функций состояния математической модели и функций чувствительности, используемых для исследований совокупности функционалов.

Выделение месячных интервалов удобно для изучения межгодовой изменчивости и для интерпретации результатов анализа. Чтобы проанализировать специфику проявления изменений в режиме сезонного и годового ходов, достаточно рассмотреть 12 месячных интервалов. Таким образом, представление всей многолетней базы данных получается в виде 12 однотипных массивов по числу месяцев в году. Кстати отметим, что в этом случае алгоритмы также имеют крупноблочную параллельную структуру, в которой число параллельных ветвей равно числу анализируемых месяцев. В результате получается 12 наборов ЕОФ и соответствующих им наборов векторов факторных нагрузок \mathbf{a}_p ($p = \overline{1, n}$), позволяющих изучать поведение глобальной климатической системы в динамике.

По самой идее и по построению алгоритмы факторного анализа реализуют декомпозицию исходного пространства функций по масштабам информативности вклада каждого базисного вектора. Компоненты векторов \mathbf{a}_p при выбранном представлении внутренней структуры векторов \mathbf{v}_β дают количественные оценки изменчивости изучаемых процессов относительно построенных базисов. С позиций численного моделирования этих процессов такое обобщенное описание динамики климатической системы составляет конструктивную основу для построения новых алгоритмов, необходимых для решения практических задач.

Использование многомерных многокомпонентных факторов с пространственно-временной структурой, согласованной со структурой базы данных и функций состояния моделей, значительно упрощает анализ общих тенденций в поведении глобальной климатической системы и ее региональных частей. Выбранная нами конструкция факторных агрегатов дает простой способ ориентировки в многомерных пространствах. По существу, вся многомерность скрывается в базисах. И собственно анализ межгодовой изменчивости осуществляется в формально одномерном пространстве, где в качестве независимой переменной выступает текущий номер года, а анализируемыми величинами являются компоненты векторов факторных нагрузок в разложении (3). В свою очередь, каждый из базисных факторов (4) ценен

и сам по себе, поскольку представляет собой глобальную по пространству конструкцию с месячной динамикой по времени, упорядоченную по мере убывания информативности в смысле соотношения (5).

В частности, с помощью главных факторов эффективно решаются следующие задачи:

малокомпонентное представление исходной совокупности векторов с заданной степенью информативности;

выделение центров действия в климатической системе, идентификация их пространственного расположения и изучение изменчивости;

типизация многолетней динамики исследуемой системы в соответствии с интенсивностью факторных нагрузок относительно подмножества ЕОФ, обладающих повышенной информативностью;

формирование информативных фазовых подпространств для организации детерминированно-стохастических сценариев на базе моделей гидротермодинамики и переноса примесей.

Приведем пример анализа поведения климатической системы за 40 лет с 1960 по 1999 г. по данным Реанализа [8]. В расчетах использовались поля геопотенциала и температуры. Здесь будут продемонстрированы отдельные фрагменты расчетов для глобальных полей геопотенциала в изобарических координатах на сферической Земле на поверхности, соответствующей давлению 500 мбар. В этом случае общее количество векторов $n = 40$, внутренняя размерность исходных и базисных векторов $N = 144 \cdot 74 \cdot 60$. В соответствии с описанной выше схемой алгоритмов рассчитаны 12 наборов ЕОФ. Они имеют пространственно-временную структуру с разрешением на поверхности сферы $2,5 \times 2,5$, длительностью 1 мес. с дискретностью 12 ч. Каждый набор представляет собой совокупность из 40 ЕОФ. Такое представление является компромиссным с точки зрения экономии объема вычислительной работы и обеспечения информативности для анализа годового и сезонного хода в режиме межгодовой изменчивости глобального поведения климатической системы и ее частей.

В таблице приведены характеристики информативности (%) первых базисных векторов для каждого из 12 наборов. Видно, что информативность имеет сезонный ход с максимальным значением в январе и минимальным в мае. Для сорокалетнего периода первые факторы являются преобладающими для всех месяцев года. Это значит, что их можно использовать для выделения климатической составляющей исследуемых полей. Относительные вклады других базисных векторов по отдельности существенно ниже вкладов первых.

На рис. 1 представлены два фрагмента первых главных факторов глобального масштаба для июня и января. Далее, на рис. 2, а показан ход факторных нагрузок для первого июньского базисного вектора

за сорокалетний период. Он демонстрирует характер межгодовой изменчивости глобальной атмосферной циркуляции относительно этого фактора.

Сравнительный анализ обобщенных характеристик многолетней динамики атмосферы, представленных главными факторами, показывает известные различия в циркуляционных механизмах для летних и зимних сезонов.

3. Главные факторы регионального масштаба

В отличие от главных факторов глобального масштаба региональные факторы проявляют большую информативность в межгодовых изменениях. Это обусловлено тем обстоятельством, что в относительно небольших регионах геофизические условия более однородны и квазипериодическая составляющая в многолетнем режиме проявляется более четко. Так, например, для южной части Восточно-Сибирского региона ($95-115^\circ$ в.д., $47,5-60^\circ$ с.ш.) первый базисный вектор, соответствующий максимальному собственному числу, обеспечивает 97% значимости для июня и 93% для ноября. Для факторов глобального масштаба эти же величины суть 17,5 и 20,3% соответственно. В работе [5] были представлены ЕОФ поля геопотенциала в Северном полушарии в режиме межсезонных изменений для декабря 1998 г. Информативность первого фактора составляла 42%. Сопоставляя эти данные, можно сделать вывод, что региональные климаты можно описать при помощи пространственно-временных агрегатов ЕОФ с достаточно высокой степенью информативности.

На рис. 2, б приведены факторные нагрузки для первой июньской ЕОФ по годам. Задавая некоторым интервалом значимости для типизации, можно выделить годы, аномальные по отношению к главным факторам. В данном случае таковыми можно считать юни 1969 и 1990 гг. В остальные годы юни находятся в диапазоне типичных по отношению к главному фактору.

На рис. 3 показаны четыре фрагмента первого главного фактора поля геопотенциала на поверхности 500 мбар, соответствующие 00 GMT 1, 10, 20, 30 июня. Из них видно, что в течение месяца главные факторы демонстрируют существенную изменчивость. Совместный анализ региональных и глобальных факторов в динамике позволяет сделать вывод, что региональные факторы согласуются по структуре с глобальными, но отражают сезонную изменчивость с более высокой степенью информативности. Это важно для анализа региональных процессов в многолетней динамике и для построения численных моделей для диагностики и прогнозирования.

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$b_1, \%$	30,4	27,5	22,5	16,8	16,5	17,5	20,0	18,1	18,0	17,6	20,3	26,4

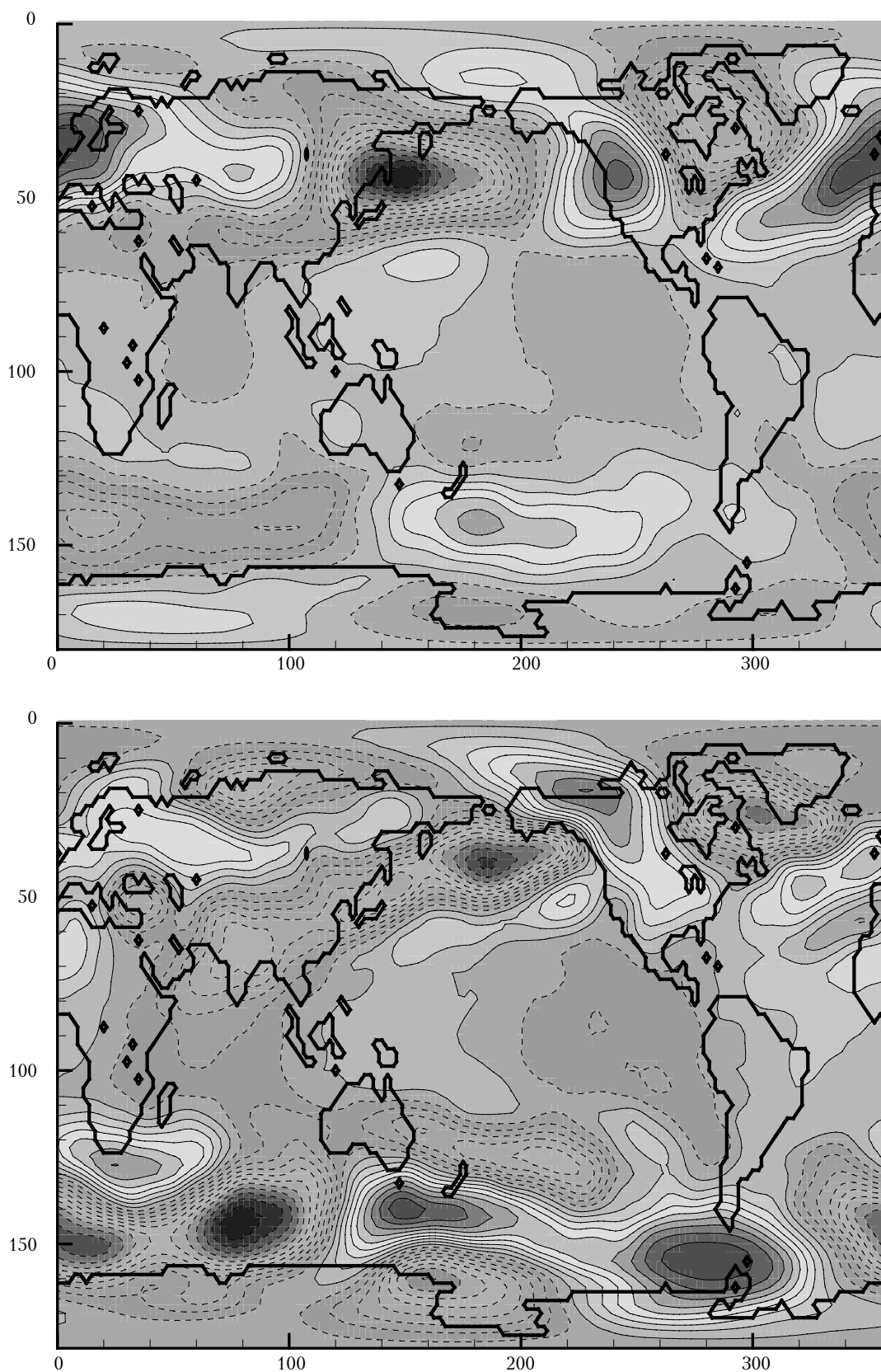


Рис. 1. Главные факторы глобального масштаба для поля геопотенциала на поверхности, соответствующей давлению 500 мбар. Вверху — 15 января 00:00 GMT, внизу — 15 июня 00:00 GMT. Сплошные линии — области положительных значений, штриховые — отрицательных

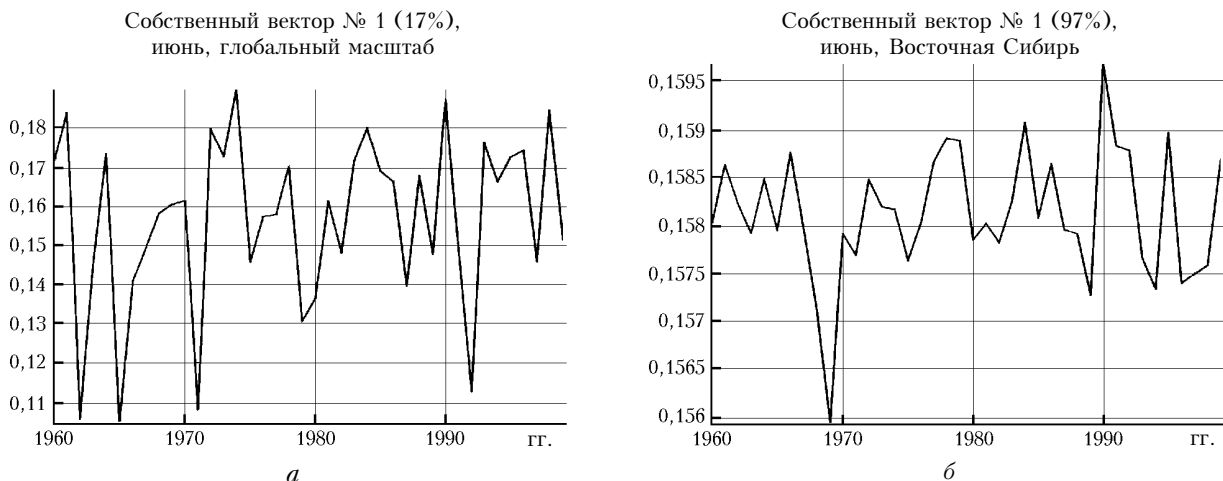


Рис. 2. Годовой ход факторных нагрузок для первого июньского базисного вектора за 40-летний период (1960–1999 гг.): а – глобальный фактор; б – региональный фактор

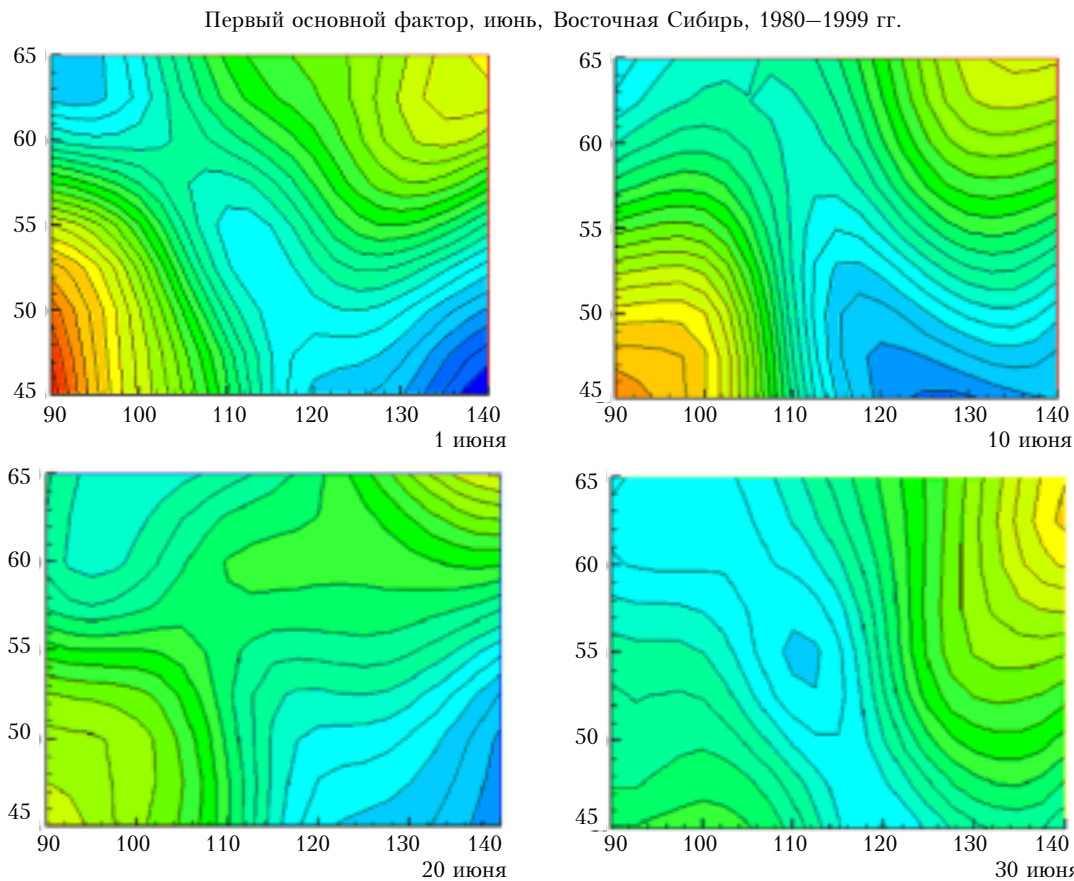


Рис. 3. Главный фактор поля геопотенциала (500 мбар поверхность) регионального масштаба для южной части Восточно-Сибирского региона

Что касается региона оз. Байкал (середина озера приходится примерно на $107,5^\circ$ в.д., $52,5^\circ$ с.ш.), то основной вывод состоит в том, что в структуре глобальных и региональных главных факторов он находится в неустойчивой переходной зоне между крупномасштабными термобарическими образованиями квазистационарного характера: в летнее время – по широте, а в зимнее время – по долготе. Как следствие этого, климатоэкологические процессы в ре-

гионе обладают высокой пространственно-временной изменчивостью, что и видно на рис. 3.

4. Принципы формирования сценариев

Методы факторного анализа расширяют возможности математических моделей для изучения природных процессов. Использование информации о главных факторах в экологических исследованиях

позволяет эффективно решать вопросы о подходящем выборе методов для описания метеорологических ситуаций, на фоне которых формируются долгопериодные процессы переноса и трансформации влаги и загрязняющих веществ.

Анализ главных факторов глобального и регионального масштабов совместно с анализом функций чувствительности и областей влияния для моделей и функционалов показывает, что адекватно воспроизводить динамику региональных процессов невозможно без учета их взаимосвязей с глобальными процессами. Это отчетливо проявляется, например, при оценке областей экологических рисков и уязвимости для изучаемого региона по отношению к антропогенным воздействиям [10–12].

Исходя из этих предпосылок, технология моделирования организуется на принципах комплексирования моделей различных масштабов и декомпозиции функции состояния по масштабам процессов на фоновые и возмущения. Суть этой технологии состоит в следующем. В модели вводятся новые элементы — направляющие фазовые пространства. Это многокомпонентные поля пространственно-временной структуры, обеспечивающие описание фоновых процессов с заданной степенью информативности по отношению к наблюдаемым состояниям глобальной климатической системы. Состав компонент определяется видом и содержанием функций состояния моделей.

Для формирования направляющих пространств мы отработываем два подхода, которые находятся в рамках гипотезы об относительной устойчивости климата. Первый подход имеет простую схему реализации и состоит в генерировании фоновых полей с помощью технологии, описанной в [9], непосредственно с использованием базы данных Реанализа [8] о многолетнем поведении климатической системы. В этом случае выбор конкретных ситуаций для организации сценариев производится с учетом типизации относительно главных факторов. Другой подход базируется на описанных выше методах факторного анализа. С их помощью строятся информативные базисы, выделяются главные факторы. И на их основе формируются фазовые подпространства по заданному критерию информативности. Эти конструкции и обеспечивают описание фоновых климатических процессов. Детальная структура полей рассчитывается с помощью комплекса математических моделей. Для региональных исследований используются синхронно глобальная и региональные модели [10, 11]. Комплексирование моделей различных масштабов и учет в них направляющих фазовых пространств осуществляются в темпе моделирования на каждом временном шаге с помощью разработанных нами процедур быстрого усвоения данных [13]. Здесь важно, чтобы все информационные массивы были представлены на согласованных по структуре сеточных областях. Это упрощает процедуры вложения без потери информативности и точности представления полей.

Для организации сценариев моделирования используется комплекс моделей, описанный в [10], до-

полненный алгоритмами факторного анализа, процедурами быстрого усвоения данных и методами теории чувствительности моделей. Сценарии реализуются в режимах прямого и обратного моделирования [11, 12]. В частности, когда изучаются процессы распространения загрязнений в атмосфере от источников, расположенных в регионе, реализуются методы прямого моделирования. В них региональные модели полностью описывают процесс до того момента времени, пока генерируемые источниками возмущения не достигнут границ области. Если необходимо проследить за судьбой этих возмущений за границами региона, то в работу включаются и глобальные модели. Если же экологическая ситуация в регионе оценивается в режиме обратного моделирования, то состав комплекса моделей организуется в зависимости от поведения функций чувствительности функционалов качества природной среды. То есть если области чувствительности достигают границы, то это является сигналом необходимости включения модели глобального масштаба для оценки области влияния и трансграничных источников.

Благодаря использованию направляющих пространств, такая организация моделирования позволяет рассчитывать долговременные сценарии атмосферной циркуляции и переноса примесей в регионах с сохранением предсказуемости и информативности. Это достигается за счет усвоения в моделях элементов фонового пространства, учитывающего динамику глобальных процессов. Кроме того, корректно решаются вопросы, связанные с неопределенностью задания краевых условий для областей на ограниченной территории. В таком контексте модели, по существу, дают детализированное описание процессов внутри региона с учетом фоновых глобальных процессов.

Заключение

Методы факторного анализа и алгоритмы выделения главных компонент являются эффективным инструментом для изучения изменчивости природных процессов и особенно для изучения изменчивости многолетней динамики климатической системы. Специальная организация информационных массивов и вычислений позволяет осуществлять жесткое представление в смысле декомпозиции размерности многомерных и многокомпонентных полей, оставляя для анализа наиболее существенное с точки зрения исследователя направление изменений. Например, в климатической динамике мы выбрали в качестве такой переменной время с дискретностью один год. Параметрическим представлением ее является номер года в относительной шкале отсчета. Номер месяца в году задается как параметр сезонного хода, а остальные переменные, включая и время в течение месяца, «уходят» во внутреннюю структуру характеристик исследуемых полей.

Численные эксперименты по выбору внутренней структуры векторов показали, что учет в них кроме пространственного еще и временного поведения повышает информативность анализа полей в целом и делает

его результаты более удобными для интерпретации и в использовании при формировании сценариев.

Результаты анализа глобальных и региональных процессов показывают, что в факторных решениях выделяются первые главные факторы, обладающие относительно высокой степенью информативности. Особенно ярко это видно в региональных сценарных оценках. Так, для Байкальского региона в структуре глобальной циркуляции, в частности, в полях геопотенциала на изобарической поверхности, соответствующей давлению 500 мбар, выделяются главные факторы с мерой информативности более 90%, которые можно интерпретировать как региональные проявления глобального климатического фона.

Анализ центров действия климатической системы по результатам факторного анализа месячных структур многолетних данных об атмосферной циркуляции глобального масштаба показывает, что Байкальский регион находится между крупномасштабными термобарическими образованиями. Это приводит к формированию локально неустойчивых циркуляций в регионе, о чем, в частности, свидетельствует наличие Саяно-Алтайской энергоактивной зоны, характеризующейся высокой интенсивностью летнего циклогенеза.

Таким образом, совместное использование количественной и качественной информации о структуре главных факторов в динамике климатической системы и о функциях чувствительности этой системы к возмущениям определяющих ее параметров дает новые возможности для построения моделей и сценариев для климатоэкологических исследований, адекватно отражающих как общие, так и специфические черты изучаемых явлений.

Работа поддержана Европейской комиссией (проект ICA2-CT-2000-10024), Минпромнауки РФ (проект 37.011.11.0009), РФФИ (грант № 01-05-65313).

1. Харман Г. Современный факторный анализ. М.: Статистика, 1972. 486 с.

V. V. Penenko, E. A. Tsvetova. Principal global-scale and regional-scale factors of a climatic system and their application to ecological investigations.

The extraction of principal components characteristic of long-term climate dynamics and their application to diagnosis and prognosis are considered. Principal factors are multicomponent 4D (space and time) constructions. They are calculated from many-years data on climatic system behavior and sensitivity characteristics with the help of the factor analysis algorithms. Reanalysis NCEP/NCAR 40-year database is used. Two types of principal components of global and regional scale are presented. The results of comparative analysis of their information quality are presented. The principles of construction of climatic and ecological scenarios with the use of databases, factor solutions and numerical models of the processes under study are formulated.

2. Мещерская А.В., Руховец Л.В., Юдин М.И., Яковлева Н.И. Естественные составляющие метеорологических полей. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 199 с.
3. Preisendorfer R.W. Principal Component Analysis in Meteorology and Oceanography. Amsterdam; New York; Tokyo: Elsevier, 1988. 425 p.
4. Пененко В.В. Методы численного моделирования атмосферных процессов. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 351 с.
5. Пененко В.В., Цветова Е.А. Формирование сценариев атмосферной циркуляции для климато-экологических исследований // Оптика атмосф. и океана. 2001. Т. 14. № 6–7. С. 491–495.
6. Aires F., Rossow W.B., Chedin A. Rotation of EOFs by the independent component analysis: toward a solution of the mixing problem in the decomposition of geophysical time series // J. Atmos. Sci. 2002. V. 59. № 1. P. 111–123.
7. Cash B.A., Kushner P.J., Vallis G.K. The structure and composition of the annular modes in an aquaplanet general circulation model // J. Atmos. Sci. 2002. V. 59. № 23. P. 3399–3414.
8. Kalney E., Ranamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L. The NCEP / NCAR 40-year Reanalysis Project // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 1996. V. 77. P. 437–471.
9. 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.
10. 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.
11. Пененко В.В., Цветова Е.А. Некоторые аспекты решения взаимосвязанных задач экологии и климата // Прикл. мех. и техн. физ. 2000. Т. 41. № 5. С. 161–170.
12. Пененко В.В. Выявление областей повышенной экологической уязвимости: концепция и подходы к реализации // Оптика атмосф. и океана. 2001. Т. 14. № 6–7. С. 596–600.
13. Penenko V., Tsvetova E. Variational fast data assimilation algorithms // Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modeling. 2002 WGNE Blue Book Web Site <http://www.cmc.ec.gc.ca/rpn/wgne 01–48>.