

О признаках согласованности природно-климатических процессов

В.А. Тартаковский, А.И. Кусков*

*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
634021, г. Томск, пр. Академический, 10/3*

Поступила в редакцию 6.10.2010 г.

Исследования проводились на основе формализации утверждения, что внешнее вынуждающее воздействие, общее для какой-либо физико-географической единицы, проявляется в сходстве существенных признаков всех процессов в ее пределах. Введенный критерий согласованности дает количественную характеристику этого воздействия. При анализе согласованности на всей азиатской территории России зимой были выделены области, занимаемые обширным азиатским антициклоном. Для летнего периода была выявлена аномалия синхронности термического поля, очевидно, связанная с поглощением тепла водными массами в области между Обью и Енисеем. Предложен новый полезный инструмент, интегрирующий информацию, содержащуюся в экспериментальных данных, который имеет перспективы для дальнейших исследований и интерпретаций.

Ключевые слова: внешнее вынуждающее воздействие, синхронность; external inducing effect, synchronism.

Введение

Внешнее вынуждающее воздействие, в соответствии с природой своих составляющих, инициирует в оболочках Земли различные процессы, которые можно соотнести с физико-географической иерархией и расценивать как глобальные, региональные, локальные и индивидуальные. При этом полагается, что на заданном уровне иерархии отдельные процессы отличаются по энергии, но имеют схожие существенные признаки, частично сохраняют свой функциональный вид, изменяются в какой-то мере согласованно. Наличие согласованности отдельных составляющих процессов расценивается как присутствие полезного сигнала, т.е. проявления вынуждающего воздействия на данной территории. Другие, функционально не схожие, составляющие рассматриваются как особенность нижних уровней иерархии и играют роль шума по отношению к полезному сигналу.

Не делая предположений о характере взаимодействий процессов различной природы на разных уровнях, попытаемся отыскать оставшиеся после всех взаимодействий элементы согласованности, отраженные в рядах экспериментальных данных. Иллюстрация этого подхода будет дана с помощью трех изотопных хронологий из Прибайкалья за период с 1734 по 1998 г. Распределение полезного сигнала по территории определим с использованием температурных рядов, измеренных на 134 метеостанциях азиатской части России с 1955 по 1998 г.

На первый взгляд, для решения поставленной задачи могли бы быть использованы известные методы,

применяемые в геофизическом мониторинге при исследованиях климата, например: главные компоненты, канонические корреляции, агрегированный сигнал [1–3]. Однако они не адекватны поставленной задаче, так как не основаны на существенных свойствах полезного сигнала, которые, исходя из вышесказанного, должны быть инвариантны относительно замены одного исследуемого процесса другим на данном уровне иерархии. Такая концепция ранее нам не встречалась.

Алгоритм совместной фильтрации

Идея инвариантности существенных признаков является конструктивной, так как из нее вытекает алгоритм, предназначенный для выделения тех составляющих рядов данных, в которых проявляется полезный сигнал. Назовем эти составляющие общими частями.

Будем считать, что ряды экспериментальных данных $x_{l,k}$ взаимно однозначно представляют исходные функции, действительные и с ограниченной энергией. Здесь k — дискретный аргумент, принимающий N значений на заданном интервале наблюдений, а l есть номер ряда. Ряды можно дополнить и продолжить на всю действительную ось периодически, четным или нечетным способом. Для подобных рядов существует дискретное преобразование Фурье, например в тригонометрическом базисе. Возможно применение и других базисов, ориентированных на особенности исследуемых рядов, например полиномиальных при выраженных трендах. Этим достигается консолидация информации в пространстве выбранного базиса. Скорость убывания коэффициентов Фурье будет характеризовать адекватность выбора.

* Валерий Абрамович Тартаковский (tv@imces.ru);
Аркадий Игнатьевич Кусков (arcus1309@rambler.ru).

В данном случае прямое и обратное преобразования Фурье имеют вид

$$\begin{aligned} X_{l,v} &= \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_{l,k} \exp(-i2\pi vk/N), \\ x_{l,k} &= \sum_{v=0}^{N-1} X_{l,v} \exp(i2\pi vk/N). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь i – мнимая единица; v – дискретная частота. При принятых условиях продолжения коэффициенты Фурье $X_{l,v}$ не будут комплексными числами. Идея похожести реализуется так, что существенным признаком выбирается знак коэффициентов Фурье. Именно он должен быть инвариантным относительно смены исследуемых функций. Таким образом, по определению, общие части формируются гармониками, у которых знак коэффициентов Фурье не зависит от выбора ряда в пределах выборки G . Определим алгоритм совместной фильтрации для выделения общих частей $y_{l,k}$ следующим образом:

$$\begin{aligned} Y_{l,v} &= \begin{cases} X_{l,v}, & \text{sign } X_{l,v} = \text{sign } X_{j,v}; \\ 0, & \text{sign } X_{l,v} \neq \text{sign } X_{j,v}; \end{cases} \\ y_{l,k} &= \sum_{v=0}^{N-1} Y_{l,v} \exp(i2\pi vk/N); \quad l, j \in G; \quad k, v \in [1, N]. \end{aligned} \quad (2)$$

Для рассматриваемых рядов существует скалярное произведение

$$(x_{j,k}, x_{l,k}) = \sum_{k=0}^{N-1} x_{j,k} x_{l,k}$$

и справедливо равенство Парсеваля

$$(x_{j,k}, x_{l,k}) = (X_{j,v}, X_{l,v}).$$

Поэтому для каждой пары j и k коэффициент корреляции r_o рядов $x_{j,k}$ и $x_{l,k}$ будет меньше коэффициента корреляции r_c их общих частей $y_{j,k}$ и $y_{l,k}$, который достигает максимума:

$$\begin{aligned} r_o &= \frac{(x_{j,k}, x_{l,k})}{\sqrt{(x_{j,k}, x_{j,k})(x_{l,k}, x_{l,k})}} \leq r_c = \\ &= \frac{(y_{j,k}, y_{l,k})}{\sqrt{(y_{j,k}, y_{j,k})(y_{l,k}, y_{l,k})}} = \max_{j,l}. \end{aligned} \quad (3)$$

Применим совместную фильтрацию к трем $\delta^{18}\text{O}$ -изотопным хронологиям, полученным из древесины лиственницы, образцы которой отобраны в трех достаточно удаленных и контрастных по условиям вегетации экотопах Прибайкалья [4]: вблизи г. Иркутска (Ir), на острове Ольхон (OI) и на перевале Даван (Da). Хронологии имеют длительность от 1734 до 1998 г., т.е. $k \in [1, 264]$; $l = 1, 2, 3$. В качестве меры согласованного поведения исследуемых рядов используем вышеприведенные коэффициенты корреляции и относительную энергию

$$\varepsilon = (y_{l,k}, y_{l,k}) / (x_{l,k}, x_{l,k}). \quad (4)$$

На рис. 1 общим частям $y_{l,k}$ соответствует облако точек, вытянутое вдоль диагонали октанта (a), тогда как точки, отображающие исходные хронологии $x_{l,k}$ и их локальные особенности, распределены изотропно (a и b). Коэффициенты корреляции и относительные дисперсии общих частей приведены в таблице.

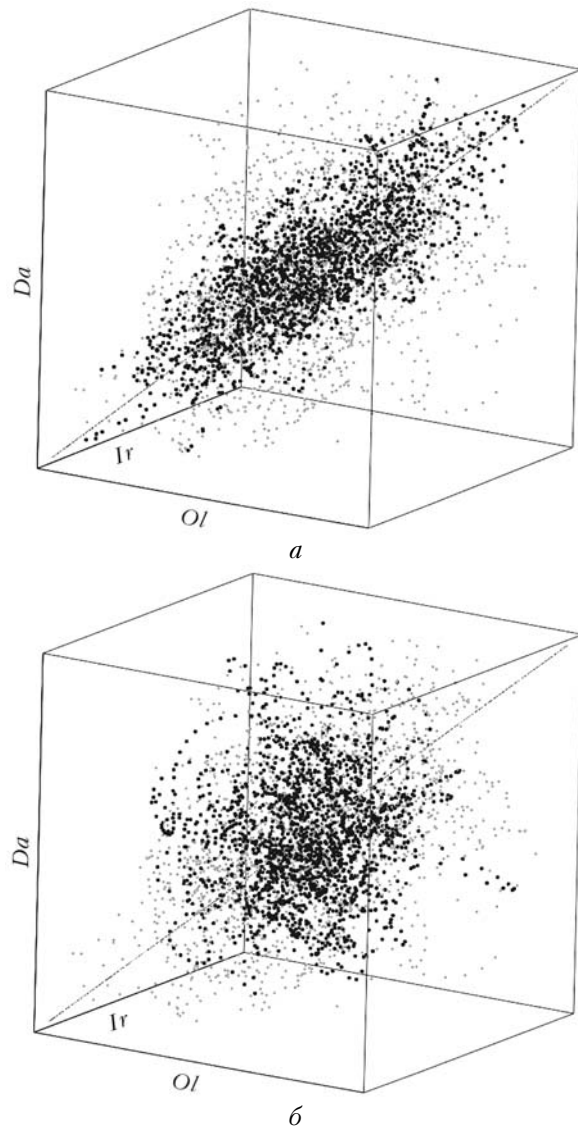


Рис. 1. Диаграммы рассеяния $\delta^{18}\text{O}$ -изотопных хронологий из Прибайкалья за период с 1734 по 1998 г. Серые точки соответствуют исходным хронологиям, черные точки (a) – общим частям хронологий, (b) – локальным особенностям. Значения $\delta^{18}\text{O}$ приводятся в относительных единицах. Начало координат находится в середине диагонали октанта

Коэффициенты корреляции r_c оказались значительно больше исходных коэффициентов корреляции r_o . При этом общие части аккумулируют в себе около 40–60% всей энергии (ε) соответствующих хронологий. По определению в общих частях как элементах полезного сигнала в местообитаниях должно проявляться вынуждающее воздействие, и эти найденные характеристики вполне подтверждают его реальность.

Взаимосвязи $\delta^{18}\text{O}$ -изотопных хронологий из Прибайкалья за период с 1734 по 1998 г. Коэффициенты корреляции общих частей хронологий r_c (слева от диагонали) и исходных хронологий r_o (справа). В нижней строке приведена относительная энергия ε общих частей каждой хронологии

	<i>Da</i>	<i>Ir</i>	<i>Ol</i>
<i>Da</i>		0,36	0,48
<i>Ir</i>	0,66		0,25
<i>Ol</i>	0,79	0,64	
ε	0,56	0,40	0,62

Исследовались достаточно контрастные экотопы Прибайкалья, и в этой ситуации совместная фильтрация оказалась эффективной. Тем не менее возможны случаи, когда в общих частях может оказаться очень мало энергии, вплоть до полного ее отсутствия. Это происходит из-за того, что при совместной фильтрации каждый ряд оказывает влияние на все остальные, с учетом этого требуется предварительный отбор анализируемых рядов.

Мажорирующая фильтрация

Представляет интерес ситуация, когда исследуемых рядов достаточно много и нет гарантий, что все они принадлежат одному уровню физико-географической иерархии. Тогда возможны: задача по исследованию характеристик процессов на районированной территории и обратная задача по уточнению пространственно-временных границ исследуемых территорий, исходя из характеристик протекающих в них процессов.

В обоих случаях необходимо исключить влияние рядов, возможно, контролируемых иными уровнями иерархии или имеющих существенные искажения по каким-либо причинам. При этом заранее не известно, какие из рядов следует отнести к данной категории.

Будем использовать мажоритарный подход, по которому при фильтрации большинство оказывает влияние на меньшинство, а обратное влияние исключается.

Введем спектральную характеристику всего набора исследуемых рядов в виде

$$M_v = \Omega_v \sum_l \text{sign} X_{l,v}. \quad (5)$$

Здесь $v \in [1, N]$; $l \in G$; $\Omega_v > 0$ – спектральное окно, а знаковая функция $\text{sign}(0) = 0$. Для фиксированной частоты v $M_v > 0$, если коэффициенты Фурье $X_{l,v}$ большинства рядов положительны, и $M_v < 0$, если коэффициенты большинства рядов отрицательны. Тогда алгоритм мажорирующей фильтрации примет вид

$$Y_{l,v} = \begin{cases} X_{l,v}, & \text{sign} X_{l,v} = \text{sign} M_v; \\ 0, & \text{sign} X_{l,v} \neq \text{sign} M_v; \end{cases} \quad (6)$$

$$y_{l,k} = \sum_{v=0}^{N-1} Y_{l,v} \exp(i2\pi v k/N); \quad l \in G; \quad k, v \in [1, N].$$

Критерий согласованного поведения

Дискретная функция M_v характеризует согласованное поведение всех рядов из выборки G . Необходимо определить характеристику согласованности для каждого ряда $x_{l,k}$ относительно всей выборки. Будем считать, что выборка G определена областью, откуда она получена, и введем критерий согласованности

$$C_l = \frac{1}{N} \sum_{v=1}^N \#(M_v \times \text{sign} X_{l,v}), \quad l \in G. \quad (7)$$

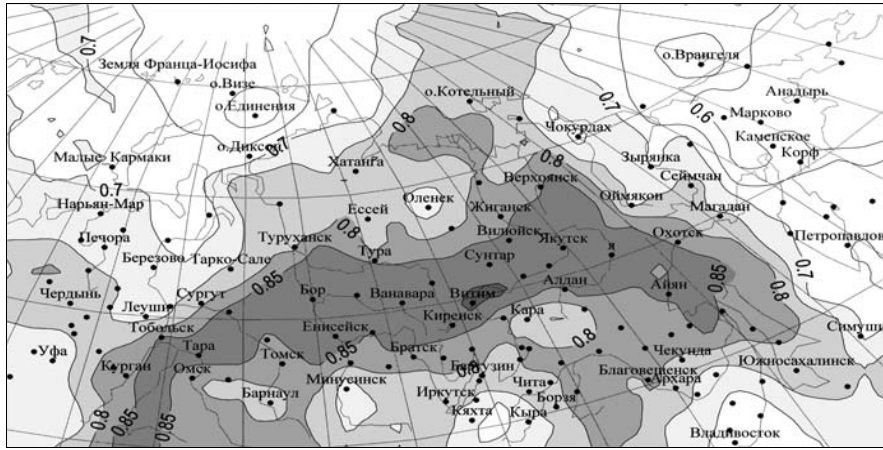
Здесь $\#$ – функция Хэвисайда, для отрицательных аргументов она равна нулю, для положительных – единице. Для нулевого аргумента существуют различные определения функции Хэвисайда, в данном случае она равна нулю.

Критерий (7) характеризует согласованность поведения процесса с номером l со всеми другими процессами, протекающими в области G . Если для всех v знаки коэффициентов Фурье совпадают со знаком M_v , тогда $C_l = 1$ и имеет место полная согласованность для процесса с номером l . Полная несогласованность ($C_l = 0$) наблюдается тогда, когда знаки M_v и коэффициентов Фурье противоположны для всех v .

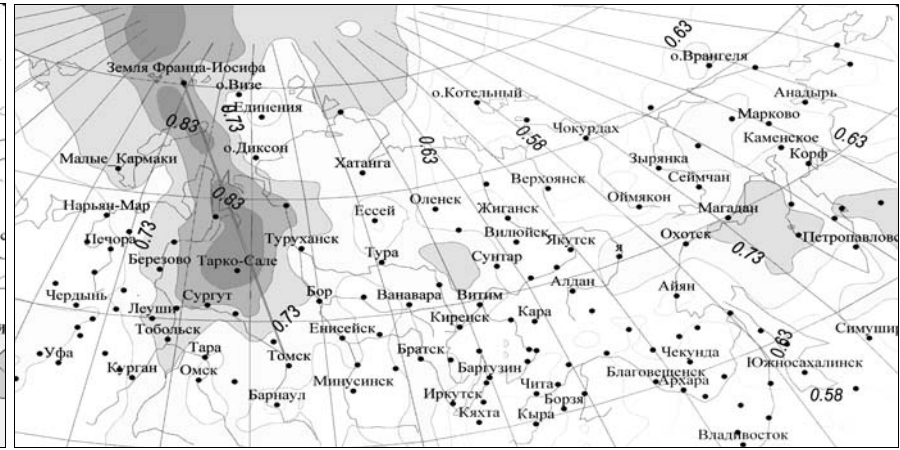
Ранее был введен другой критерий [3]. Использовалась первая главная компонента с той же целью, что и функция M_v , а мера согласованности каждого ряда со всей выборкой определялась как его коэффициент корреляции с главной компонентой. Сопоставительный анализ пока не проводился, но отметим, что в данной работе применен менее формальный подход, так как введенные существенные признаки, в том числе и с возможным использованием различных ортогональных базисов, методологически можно отнести к имманентным свойствам исследуемых процессов. Кроме того, использование знаковых функций должно способствовать большей робастности.

Применим введенный критерий C_l для анализа согласованного поведения рядов среднемесячных температур за период с 1955 по 1998 г., полученных на 134 метеорологических станциях, расположенных на азиатской территории России. Данные подготовлены ВНИИГМИ-МЦД и взяты с сайта <http://meteo.ru/mcd/meteo/topis.htm>.

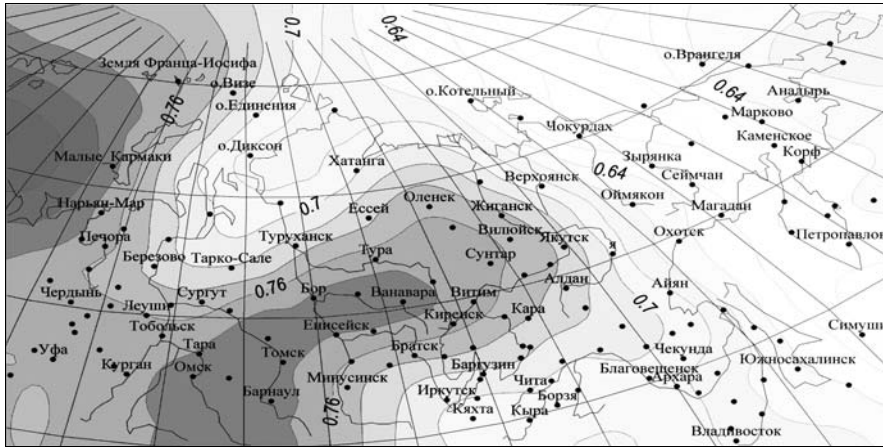
С точки зрения используемых среднемесячных значений температуры, станции расположены достаточно равномерно, допустимое расстояние между ними не превышено [5]. Тем не менее для уравнивания вклада каждого элемента территории в вычисляемые характеристики и устранения прерывистости были проведены интерполяция температурного поля и отображение его на равномерной сетке



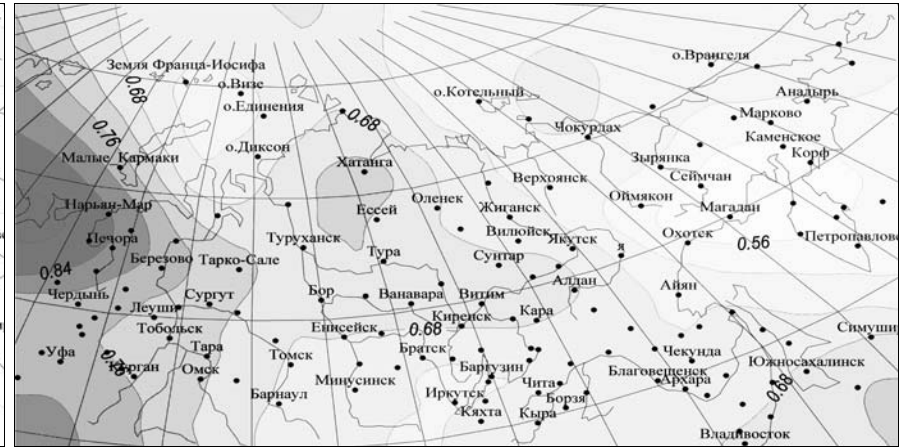
a



б



в



г

Рис. 2. Распределение критерия согласованного поведения температурных рядов по азиатской территории России за период с 1955 по 1998 г. Анализ проводился для всей территории: зимний период (*a*), летний (*б*). Сканирование территории круговой областью: зимний период (*в*), летний период (*г*). Диапазон изменения критерия от 0,5 до 0,9. Отрезок прямой (*б*) показывает ось аномалии синхронности

(35 точек вдоль широты и 21 вдоль меридиана, всего 735 узлов) по модифицированному методу Дроздова–Шепелевского [5, 6].

Критерий C_l определялся для летнего и для зимнего периодов. Кроме того, использовались две формы области G . В первом случае область совпадала с исследуемой частью континента, во втором — область имела форму круга с центром в узле с номером $j \in [1, 735]$. В круг попадало 21–25 узлов сетки, она сканировалась по континенту с шагом, равным расстоянию между соседними узлами. Карты распределения критерия C_l приведены на рис. 2.

Критерий C_l характеризует степень согласованности каждого l -го процесса из области G с некоторым общим источником. В частности, согласованность может быть следствием устойчивости потока энергии в пределах исследуемой области. С этой точки зрения можно дать первоначальные пояснения к рис. 2.

При анализе согласованности на всей азиатской территории России зимой наблюдается (рис. 2, а) ясно выраженный широтный ход величины C_l . Он занимает практически всю территорию, что можно сопоставить с господствующим в это время года обширным азиатским антициклоном, обеспечивающим стабильность погоды и уменьшающим свое влияние по направлению к границам континента, где значения критерия приближаются к 0,5. Максимальное значение критерия равно 0,9 в районе метеостанции Витим. Летом наблюдается (рис. 2, б) размытое поле критерия C_l , исключая район вдоль направления Земля Франца-Иосифа — г. Томск, который можно охарактеризовать как устойчивую аномалию синхронности.

При сканировании территории выявляется локальная согласованность в пределах круговой области. Поэтому наблюдаются более размытые структуры, расположение которых не контрастирует с полученными в предыдущем случае. На карте можно увидеть менее выраженное влияние зимнего азиатского анти-

циклона (рис. 2, в) и летней адвекции холода над Западной Сибирью (рис. 2, г).

Заключение

Изложенная в статье идея состоит в том, что внешнее вынуждающее воздействие, инициирующее процессы различной природы, проявляется в сходстве существенных признаков этих процессов в пределах исследуемой территории. Это сходство дает основания для определения общих частей, в которых интегрированы существенные признаки протекающих процессов. Введенный критерий согласованности дает количественную характеристику внешнего вынуждающего воздействия. Предложенный новый инструмент для анализа информации, содержащейся в экспериментальных данных, имеет перспективы для применения и интерпретаций. Обнаружена аномалия синхронности термического поля, в которую попадает Томская область именно в июле, что, возможно, уменьшает тепловые ресурсы, необходимые и без того неустойчивому земледелию.

1. Пузаченко Ю.Г. Математические методы в экологических и географических исследованиях. М.: Издательский центр «Академия», 2004. 416 с.
2. Кусков А.И., Катаев С.Г. Структура и динамика приземного температурного поля над азиатской территорией России. Томск: ТГПУ, 2006. 176 с.
3. Любушин А.А. Анализ данных систем геофизического и экологического мониторинга. М.: Наука, 2007. 228 с.
4. Воронин В.И., Волков Ю.В., Шлезер Г.Х., Хелле Г., Несветайло В.Д., Тартаковский В.А. Древесно-кольцевые изотопные хронологии Прибайкалья и их связь с ледовой изотопной хронологией Гренландии // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21, № 1. С. 60–64.
5. Гандин Л.С., Каган Р.Л. Статистические методы интерпретации метеоданных. Л.: Гидрометеоиздат, 1976. 360 с.
6. Дроздов О.А., Шепелевский А.А. Теория интерполяции в стохастическом поле метеорологических элементов и ее применение к вопросам метеорологических карт и рационализации сети // Тр. НИУ ГУГМС. 1946. Сер. I. Вып. 13. С. 65–115.

V.A. Tartakovsky, A.I. Kuskov. About consistency of environmental processes.

Investigation is conducted on the basis of formalization of the statement: “the inducing effect, which is common for a definite unit of physics-geography division, manifests itself in the similarity of the substantial properties of all of the one-type processes occurring within this territory”. The introduced criterion of a consistency gives the quantitative characteristic of this external impact. The analysis of the consistency on all Asian territory of Russia has shown the areas occupied with the winter Asian anticyclone. For the summer period the anomaly of synchronism of the thermal field has been revealed. Obviously, the anomaly is connected with the heat absorption in water storages between Ob and Yenisei. Thus, the new useful tool, integrating the information, containing in experimental data, which is prospective for the further researches and interpretations, is offered.