

Декомпозиция наблюдаемых рядов температуры и чисел Вольфа. Свойства средних величин

В.А. Тартаковский, А.И. Кусков*

*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3*

Поступила в редакцию 19.12.2012 г.

Предложена гипотеза, предполагающая, что внешнее вынуждающее воздействие синхронизирует природно-климатические процессы и проявляется в сходстве их существенных признаков. Вводятся ортогональные составляющие процессов, отличающиеся совпадением и несовпадением существенных признаков. Теория применена для декомпозиции рядов температуры и чисел Вольфа. Обнаружено, что ортогональные составляющие температуры в среднем формируют зоны либо положительных, либо отрицательных температур. В эти же зоны, разграниченные нулевой изотермой, попадают средние значения аналогичных составляющих ряда чисел Вольфа. Соответствие физике климатообразующих процессов подтверждается пересечением вблизи точки весеннего равноденствия графиков годового хода числа метеостанций, попадающих в зоны среднемесячных положительных или отрицательных температур. Найден новый инструмент для анализа информации, содержащейся в данных наблюдений природно-климатических процессов.

Ключевые слова: синхронность, существенные признаки, вынуждающее воздействие; synchronism, essential indicators, external forcing.

И вновь и вновь взошли на Солнце пятна,
И омрачились трезвые умы.

А.Л. Чижевский, 1919

Введение

Солнце — основной источник и регулятор внешнего воздействия на процессы, формирующие климат на Земле. Это вынуждающее воздействие имеет сложную структуру. Можно выделить потоки солнечной плазмы, электромагнитное излучение в широком диапазоне от радиочастот до γ -лучей, магнитные поля и облака космической пыли. Признается важнейшая роль изменений напряженности магнитного поля самого Солнца и его взаимодействия с магнитным полем Земли. Усиление тороидальной компоненты магнитного поля сопровождается возрастанием числа темных областей в хромосфере Солнца — солнечных пятен. При этом космические лучи, потоки заряженных пылевых частиц модулируются магнитным полем и также оказываются связанными с солнечной активностью [1–4]. Коэффициенты корреляции числа пятен с интенсивностью космических лучей отрицательны и лежат в интервале $[-0,8; -0,9]$ [5]. Также установлена хорошая корреляция числа пятен с плотностью потока радиоизлучения на длине волны 10,7 см [6]. По этим причинам комплексной харак-

теристикой солнечной активности и космического влияния — внешнего вынуждающего воздействия — стала линейная комбинация количества пятен и групп пятен, которая носит название чисел Вольфа.

Составляющие внешнего вынуждающего воздействия в соответствии со своей природой инициируют в оболочках Земли всевозможные процессы. Прежде всего, в зависимости от времени года меняется полный поток солнечной энергии, влияющий на температуру в приземном слое и в недрах Земли, но это влияние неравномерно распределено по поверхности, так как существуют гравитационно-электромагнитные полюса в областях разломов и других неоднородностей земной коры. Коротковолновое излучение Солнца и модулированные его магнитным полем космические лучи [6] ионизируют верхнюю стратосферу, изменяют там концентрацию озона и аэрозольных частиц, что в итоге влияет на циркуляцию в тропосфере. Солнечные частицы непосредственно воздействуют на магнитосферу Земли, вызывая геомагнитные бури и полярные сияния. Частицы космической пыли меняют прозрачность атмосферы. Хотя основные факторы в основном известны, но не вполне изучены порождаемые ими процессы, их относительный вклад и механизмы действия. Вопрос о степени влияния вынуждающего воздействия, представленного в форме чисел Вольфа, на температуру приземного слоя до сих пор актуален [7].

* Валерий Абрамович Тартаковский (trtk@list.ru); Аркадий Игнатьевич Кусков (arcus1309@rambler.ru).

Солнечные пятна наблюдались еще в Китае в IV в. до н.э., они упомянуты в Никоновской летописи в 1365 г. Профессиональное наблюдение началось с изобретением телескопа. Астрономы ведут подсчет пятен около 400 лет, в результате был получен самый длинный из известных ряд инструментальных данных о космосе, имеющий непреходящую ценность. В 1998 г. ряд Вольфа был усовершенствован за счет привлечения обширной архивной базы, более чем в 2 раза превышающей ту, что была известна в начале наблюдений. Кроме того, число групп пятен стало играть главную роль. В результате этих действий интервал с 1610 по 1850 г. стал более надежным, однако после 1850 г. ряд практически не изменился [8].

Значительные усилия были направлены на исследование цикличности в ряду чисел Вольфа. Вполне выражен так называемый 11-летний цикл. Предпоследний 23-й цикл солнечной активности начался в мае 1996 г. и завершился в декабре 2008 г. Он продолжался 12,6 года с максимумом в 1999 г. В январе 2009 г. начался 24-й цикл солнечной активности, но его максимум пока не наблюдался. Предполагается наличие еще нескольких циклов с большей длительностью, например 22-летний цикл, в течение которого магнитные полюса Солнца возвращаются в исходное состояние.

Надо признать, что периодизация цикла или присвоение ему определенной длительности в значительной степени зависят от применяемых оценок. Продолжительность наблюдений, пусть даже в 400 лет, нельзя считать достаточной для надежных оценок повторяемости обнаруживаемых циклов. Возможно, продуктивнее рассмотреть системы, в поведении которых присутствуют детерминизм некоторых существенных характеристик и хаотичность несущественных. В волне дневного прогрева и ночного охлаждения, о которой, как известно, говорил еще Ломоносов, реализуются именно такие закономерности.

Цель данной работы состоит в том, чтобы, не делая конкретных предположений о характере процессов различной природы на разных уровнях, отыскать проявления согласованности ряда Вольфа и рядов температуры и исследовать свойства этих проявлений. Для этого будут использоваться данные наблюдений на метеостанциях, находящихся в России и на прилегающих территориях.

1. Метод декомпозиции: попарная фильтрация

В данном разделе определим величины и получим для их вычисления аналитические выражения, которые будут исследованы в дальнейшем. Примем во внимание физическую предпосылку, состоящую в том, что вынуждающее воздействие по своей природе должно проявляться в некотором априорном сходстве элементарных процессов, вызванных этим воздействием. Сходство определим совпадением существенных признаков, которые надо установить. Тогда можно ввести и выделить составляющие с сов-

падающими (CS) и несовпадающими признаками (NS) (см. схему влияния Солнца на рис. 1, цв. вклейки). Так же обозначим зоны (множества), где действуют эти составляющие. Мету согласованности (синхронности) составляющих оценим коэффициентом корреляции.

Будем решать задачу декомпозиции рядов путем их нелинейной фильтрации в базисе тригонометрических функций. Возможно применение и других базисов, например полиномиальных, при выраженных трендах в зарегистрированных рядах. Этим достигается консолидация информации в пространстве выбранного базиса. Скорость убывания коэффициентов Фурье будет характеризовать как адекватность выбора базиса, так и корректность алгоритма.

Анализ множества временных рядов рассматривался многими авторами, в частности в работах [9, 10]. Но там отсутствуют связанные с вынуждающим воздействием понятие существенных признаков процессов, как и соответствующее правило для их декомпозиции. Новый подход был разработан и применен в работах [11–14]. Здесь рассматривается еще одна задача – влияние источника воздействия на отдельные ряды температуры, что потребовало в рамках нашего подхода разработки нового алгоритма для выделения составляющих.

Рассмотрим алгоритм декомпозиции рядов, основанный на «попарной фильтрации» каждого температурного ряда и ряда данных о солнечной активности. Пусть ряды температуры $x_{k,l}$ взаимно однозначно представляют физическую величину в точке наблюдений, по определению они действительные и с ограниченной энергией. Их можно дополнить и продолжить по непрерывности на всю действительную ось периодически, четным или нечетным образом. Ряд, характеризующий солнечную активность, обладает теми же свойствами, он один и обозначен как s_k . Для подобных рядов существуют дискретное, прямое и обратное преобразования Фурье:

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

где i – мнимая единица; v – дискретная частота; k – дискретный аргумент (время); $k, v \in [0, N - 1]$, а $l \in [0, M - 1]$ есть номер ряда (метеостанции) из выборки. Для принятых условий продолжения коэффициенты Фурье рядов температуры $X_{v,l}$ и ряда Вольфа S_v не будут комплексными числами.

Введем функцию

$$H_{v,l} = \begin{cases} 1, & \text{sign} S_v = \text{sign} X_{v,l}, \\ 0, & \text{sign} S_v \neq \text{sign} X_{v,l} \end{cases} \quad (2)$$

и получим CS-составляющую $\hat{x}_{k,l}$ по алгоритму «попарной фильтрации» следующим образом:

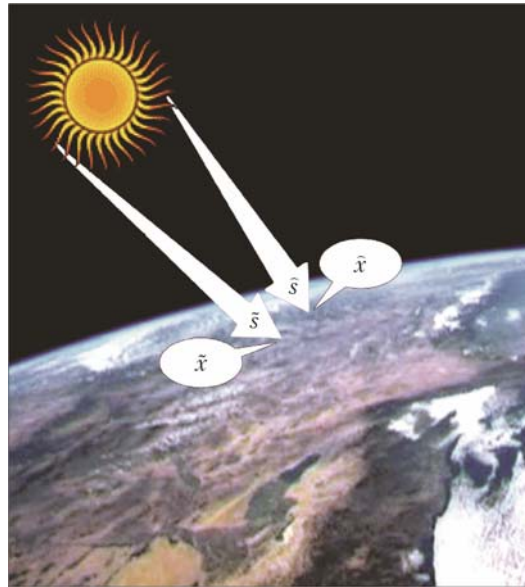


Рис. 1. Схема влияния Солнца на поле температуры. Взаимодействуют \hat{s} и \hat{x} , \tilde{s} и \tilde{x} – CS- и NS-составляющие ряда Вольфа и температурных рядов

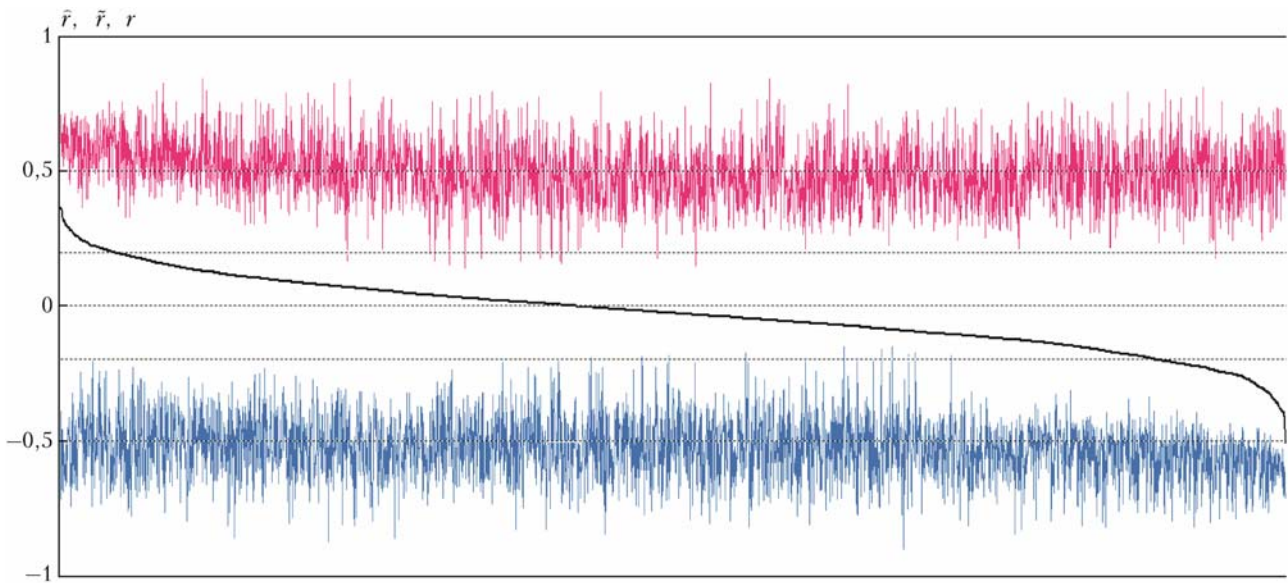


Рис. 2. Коэффициенты корреляции рядов температуры, чисел Вольфа и их составляющих. Вверху \hat{r} , внизу \tilde{r} , в середине r . Вдоль оси абсцисс все коэффициенты корреляции упорядочены по убыванию r ; каждое значение соответствует одному ряду из 249, в один из 12 месяцев за 56 лет. Пунктирными линиями обозначен коридор $\pm 0,2$. Объем выборки: 2988 точек

$$\hat{X}_{v,l} = \begin{cases} X_{v,l}, & H_{v,l} = 1, \\ 0, & H_{v,l} = 0; \end{cases} \quad \hat{x}_{k,l} = \sum_{v=0}^{N-1} \hat{X}_{v,l} \exp(i2\pi v k/N), \quad (3)$$

затем получим NS-составляющую $\tilde{x}_{k,l}$

$$\tilde{X}_{v,l} = \begin{cases} 0, & H_{v,l} = 1, \\ X_{v,l}, & H_{v,l} = 0; \end{cases} \quad \tilde{x}_{k,l} = \sum_{v=0}^{N-1} \tilde{X}_{v,l} \exp(i2\pi v k/N). \quad (4)$$

Тем самым в качестве существенного признака выбирается знак коэффициентов Фурье соответствующих рядов.

Результаты декомпозиции ряда чисел Вольфа (его CS- и NS-составляющие, или $\hat{s}_{k,l}$ и $\tilde{s}_{k,l}$) зависят от индекса l , т.е. индивидуальны для каждого температурного ряда $x_{k,l}$:

$$\hat{S}_{v,l} = \begin{cases} S_v, & H_{v,l} = 1, \\ 0, & H_{v,l} = 0; \end{cases} \quad \hat{s}_{k,l} = \sum_{v=0}^{N-1} \hat{S}_{v,l} \exp(i2\pi v k/N), \quad (5)$$

$$\tilde{S}_{v,l} = \begin{cases} 0, & H_{v,l} = 1, \\ S_v, & H_{v,l} = 0; \end{cases} \quad \tilde{s}_{k,l} = \sum_{v=0}^{N-1} \tilde{S}_{v,l} \exp(i2\pi v k/N).$$

Из (3)–(5) ясно, что выполняются соотношения:

$$\begin{aligned} X_{v,l} &= \hat{X}_{v,l} + \tilde{X}_{v,l}, & x_{k,l} &= \hat{x}_{k,l} + \tilde{x}_{k,l}, \\ S_v &= \hat{S}_{v,l} + \tilde{S}_{v,l}, & s_k &= \hat{s}_{k,l} + \tilde{s}_{k,l}. \end{aligned} \quad (6)$$

Отметим, что при попарной фильтрации значения исходных коэффициентов Фурье $X_{v,l}$, S_v остаются без изменения, каждый коэффициент попадает либо в CS-, либо в NS-составляющую ряда с индексом l .

Основываясь на алгоритме попарной фильтрации, получим аналитические выражения для исследования средних и коэффициентов корреляций, они будут далее применены при исследовании рядов наблюдений.

Учитывая инвариантность скалярного произведения относительно преобразования Фурье и определения (2), (4), получим

$$\sum_{k=0}^{N-1} s_k x_{k,l} = (s_k, x_{k,l}) = \frac{1}{2\pi} (S_v, X_{v,l}),$$

$$(\hat{x}_{k,l}, \tilde{x}_{k,l}) = (\hat{s}_{k,l}, \tilde{s}_{k,l}) = (\hat{s}_{k,l}, \tilde{x}_{k,l}) = (\tilde{s}_{k,l}, \hat{x}_{k,l}) = 0, \quad (7)$$

$$(\hat{X}_{v,l}, \tilde{X}_{v,l}) = (\hat{S}_{v,l}, \tilde{S}_{v,l}) = (\hat{S}_{v,l}, \tilde{X}_{v,l}) = (\tilde{S}_{v,l}, \hat{X}_{v,l}) = 0,$$

$$(s_k, x_{k,l}) = (\hat{s}_{k,l}, \hat{x}_{k,l}) + (\tilde{s}_{k,l}, \tilde{x}_{k,l}).$$

Суммирование в (7) проводится по индексам k или v . Таким образом, при фиксированном l CS- и NS-составляющие температурных рядов будут ортогональны, то же самое справедливо для ряда Вольфа и при перестановке составляющих этих рядов.

Получим связь коэффициентов корреляции исходных рядов температуры и чисел Вольфа и их CS- и NS-составляющих соответственно r_l , \tilde{r}_l и \tilde{r}_l :

$$\begin{aligned} r_l &= \text{corr}(s_k, x_{k,l}) = \text{corr}[(\hat{s}_{k,l} + \tilde{s}_{k,l}), (\hat{x}_{k,l} + \tilde{x}_{k,l})] = \\ &= \tilde{r}_l \left(\frac{\text{var} \hat{s}_{k,l} \times \text{var} \hat{x}_{k,l}}{\text{var} s_k \times \text{var} x_{k,l}} \right)^{1/2} + \tilde{r}_l \left(\frac{\text{var} \tilde{s}_{k,l} \times \text{var} \tilde{x}_{k,l}}{\text{var} s_k \times \text{var} x_{k,l}} \right)^{1/2}. \end{aligned} \quad (8)$$

Здесь коэффициенты корреляции и дисперсия (var) вычисляются по индексу k .

По определению (2), (4), (5) $\tilde{r}_l = \text{corr}(\tilde{x}_{k,l}, \tilde{s}_{k,l}) < 0$,

тогда из (8) следует, что $\tilde{r}_l > r_l$, или если $r_l < 0$, то $|\tilde{r}_l| > |r_l|$. Таким образом, попарная фильтрация выделяет составляющие с максимальной корреляционной связью (рис. 2, цв. вклейки). Заметим, что перемена знака коэффициента Фурье нарушит априорное сходство сигналов, связанное с их происхождением, если соответствующая базисная функция вносит значительный вклад в разложение. Этот факт также может служить обоснованием выбора знаков коэффициентов Фурье в качестве существенных признаков.

Рассмотрим средние значения по индексу k (в данном случае по времени) CS- и NS-составляющих: $\langle \hat{x}_{k,l} \rangle_k$, $\langle \tilde{x}_{k,l} \rangle_k$, $\langle \hat{s}_{k,l} \rangle_k$, $\langle \tilde{s}_{k,l} \rangle_k$. Эти величины будут пониматься как нормированные скалярные произведения. Имея в виду (7), получим

$$\begin{aligned} \langle \hat{x}_{k,l} \rangle_k &= \frac{1}{N} (1, \hat{x}_{k,l})_k = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} 1 \cdot \hat{x}_{k,l} = \\ &= \frac{1}{2\pi N} (\delta_v, \hat{X}_{v,l}) = \frac{1}{2\pi N} \hat{X}_{0,l}. \end{aligned} \quad (9)$$

Учитывая выражения (2)–(5), (9), рассмотрим ряды с индексом l , средние значения которых не равны нулю. Определение (2) создает две логические цепочки:

$$\begin{aligned} &\exists l : l \in \text{CS}, \\ &\left. \begin{aligned} \text{sign } S_0 = \text{sign } X_{0,l} \Rightarrow H_{0,l} = 1 \\ \langle x_{k,l} \rangle_k \neq 0 \Leftrightarrow X_{0,l} \neq 0 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \\ &\Rightarrow \left\{ \begin{aligned} \langle \hat{x}_{k,l} \rangle_k \neq 0, \\ \hat{X}_{0,l} = X_{0,l} \Rightarrow \left\{ \begin{aligned} \hat{S}_{0,l} = S_0 \neq 0 \Rightarrow \langle \hat{s}_{k,l} \rangle_k \neq 0, \\ \hat{S}_{0,l} = 0 \Rightarrow \langle \tilde{s}_{k,l} \rangle_k = 0, \end{aligned} \right. \\ \tilde{X}_{0,l} = 0 \Rightarrow \langle \tilde{x}_{k,l} \rangle_k = 0; \end{aligned} \right. \quad (10) \\ &\exists l : l \in \text{NS}, \\ &\left. \begin{aligned} \text{sign } S_0 \neq \text{sign } X_{0,l} \Rightarrow H_{0,l} = 0 \\ \langle x_{k,l} \rangle_k \neq 0 \Leftrightarrow X_{0,l} \neq 0 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \\ &\Rightarrow \left\{ \begin{aligned} \langle \hat{x}_{k,l} \rangle_k = 0, \\ \tilde{X}_{0,l} = 0 \Rightarrow \left\{ \begin{aligned} \hat{S}_{0,l} = 0 \Rightarrow \langle \hat{s}_{k,l} \rangle_k = 0, \\ \tilde{S}_{0,l} = S_0 \neq 0 \Rightarrow \langle \tilde{s}_{k,l} \rangle_k \neq 0, \end{aligned} \right. \\ \tilde{X}_{0,l} = X_{0,l} \Rightarrow \langle \tilde{x}_{k,l} \rangle_k \neq 0. \end{aligned} \right. \end{aligned}$$

Из выражений (10) следует, что если $\langle x_{k,l} \rangle_k \neq 0$, то имеются два непересекающихся множества значений индекса l . На одном из этих множеств (при $H_{0,l} = 1$) средние значения CS-составляющих не равны нулю, NS-составляющих равны нулю, а на другом (при $H_{0,l} = 0$) – наоборот. Это справедливо и для рядов температуры, и для ряда чисел Вольфа.

Пусть теперь среднее исходных температурных рядов для некоторых станций равно нулю. Будем считать, что индекс l этих станций принадлежит некоторому множеству I_0 . В соответствии с условиями (2) рассмотрим два варианта для ряда чисел Вольфа, хотя нулевое среднее этого ряда не реализуется:

$$\begin{aligned} & \exists l : l \in I_0, \\ & \left. \langle x_{k,l} \rangle_k = 0 \Leftrightarrow X_{0,l} = 0 \Leftrightarrow \left. \begin{array}{l} \text{sign} X_{0,l} = 0 \\ \text{sign} S_0 \neq 0 \end{array} \right\} \Rightarrow H_{0,l} = 0 \Rightarrow \right. \\ & \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \tilde{X}_{0,l} = 0 \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \langle \tilde{x}_{k,l} \rangle_k = 0, \\ \tilde{S}_{0,l} = 0 \Rightarrow \langle \tilde{s}_{k,l} \rangle_k = 0, \\ \tilde{S}_{0,l} = S_0 \neq 0 \Rightarrow \langle \tilde{s}_{k,l} \rangle_k \neq 0, \end{array} \right. \\ \tilde{X}_{0,l} = X_{0,l} = 0 \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \langle x_{k,l} \rangle_k = 0, \\ \langle \tilde{x}_{k,l} \rangle_k = 0, \end{array} \right. \end{array} \right. \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} & \left. \langle x_{k,l} \rangle_k = 0 \Leftrightarrow X_{0,l} = 0 \Leftrightarrow \left. \begin{array}{l} \text{sign} X_{0,l} = 0 \\ \text{sign} S_0 = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow H_{0,l} = 1 \Rightarrow \right. \\ & \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \tilde{X}_{0,l} = X_{0,l} = 0 \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \langle x_{k,l} \rangle_k = 0, \\ \langle \tilde{x}_{k,l} \rangle_k = 0, \\ \tilde{S}_{0,l} = 0 \Rightarrow \langle \tilde{s}_{k,l} \rangle_k = 0, \\ \tilde{S}_{0,l} = S_0 = 0 \Rightarrow \langle \tilde{s}_{k,l} \rangle_k = 0, \end{array} \right. \\ \tilde{X}_{0,l} = 0 \Rightarrow \langle \tilde{x}_{k,l} \rangle_k = 0. \end{array} \right. \end{aligned}$$

Из выражений (11) видно, что в обоих вариантах средние значения обращаются в нуль на множестве I_0 , исключая NS-составляющую ряда чисел Вольфа в первом варианте, что является следствием положительности этих чисел.

Следовательно, если температурная шкала допускает нулевые значения, а $\langle x_{k,l} \rangle_k \neq 0$, то для любой метеостанции с номером l равно нулю либо среднее значение CS-составляющей температурного ряда $\langle \tilde{x}_{k,l} \rangle_k$, либо среднее его NS-составляющей $\langle x_{k,l} \rangle_k$. Достаточно плотная сеть метеостанций позволит выделить зоны действия этой закономерности, границей которых будет нулевая изотерма для средней температуры (см. разд. 4). При переходе через ну-

левую изотерму знак средних $\langle x_{k,l} \rangle_k$ изменяется, поэтому можно сказать, что зоны положительных и отрицательных средних температур формируются либо CS-, либо NS-составляющими (6). В эти же зоны, разграниченные нулевой изотермой, попадают средние значения составляющих ряда чисел Вольфа $\langle \tilde{s}_{k,l} \rangle_k$ и $\langle \tilde{s}_{k,l} \rangle_k$, с учетом особенностей границы для средних NS-составляющих этого ряда (10), (11).

2. Ряды наблюдений: числа Вольфа и температура

Территория, где находились метеостанции, включает Россию и сопредельные государства, в том числе Норвегию, Швецию, Финляндию, Германию, Польшу, Украину и Беларусь (рис. 5, вклейка). База наблюдений температуры на 249 метеостанциях за период с 1955 по 2010 г. предоставлена на сайте Climatic Research Unit [5]. Ряд среднемесячных значений чисел Вольфа за 56 лет с 1955 по 2010 г. включительно взят на сайте Пулковской обсерватории [6].

Из рядов среднемесячной температуры для каждой метеостанции выбирались значения для одного из месяцев в каждом году, всего $249 \times 12 = 2988$ рядов по 56 значений. Температура была измерена в градусах Цельсия, что обеспечивало появление возможных нулевых изотерм как в (10) и (11). Ряды среднемесячных чисел Вольфа строились таким же образом – 12 рядов по 56 отсчетов.

Полагалось, что эти 56 значений соответствуют теореме отсчетов, поэтому их можно интерполировать без искажения информации. Так как алгоритм содержит нелинейные операции, уширяющие спектральные функции, интерполяция осуществлялась на 2^{12} отсчетов. Затем для реализации преобразования Фурье ряды продолжались периодически четным образом за пределы интервала определения.

Заметим, что соответствие процедуры дискретизации теореме отсчетов предполагает наличие финитности у преобразования Фурье исходной функции. Это свойство контролируется при вычислении, что в конечном итоге обеспечивает необходимую точность численных алгоритмов.

3. Эксперименты по декомпозиции и обсуждение результатов

Цель исследования заключается в верификации разработанной теории путем применения ее к реальным данным наблюдений и сопоставлении результатов расчетов с известными физическими закономерностями. В необходимых случаях дополнительно используются ряды псевдослучайных чисел.

Вначале были рассчитаны для каждого месяца суммы среднемесячных значений чисел Вольфа s_{Σ} за период с 1955 по 2010 г. (таблица).

Суммы среднемесячных значений чисел Вольфа за 56 лет (% от наибольшей)

| Месяц | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII |
|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $s_{\Sigma}, \hat{s}_{\Sigma}, \tilde{s}_{\Sigma}$ | 95,9 | 94,3 | 94,2 | 94,0 | 96,0 | 97,5 | 98,1 | 100 | 99,9 | 98,8 | 93,1 | 99,1 |

Значения s_{Σ} совпали с такими же суммами CS- и NS-составляющих чисел Вольфа $\hat{s}_{\Sigma}, \tilde{s}_{\Sigma}$ в зонах их ненулевых значений, как и следует из выражений (10), (11). Из таблицы видно, что в среднем наиболее активным Солнце было в августе, а наименее – в ноябре.

Для анализа выражения (8) вычислены коэффициенты корреляции r, \hat{r} и \tilde{r} за каждый месяц в течение 56 лет и для каждой из 249 метеостанций, все 2988 значений каждого из трех коэффициентов корреляции рассматривались как одна выборка. Результат, упорядоченный по убыванию величины r , показан на рис. 2 (вклейка).

Оценки коэффициентов корреляции как средние по месяцам и станциям таковы: $\langle \hat{r} \rangle = 0,5(0,1)$; $\langle \tilde{r} \rangle = -0,5(0,1)$. При этом $|r| < 0,2$ в 85% случаев и значение конкретного r никогда не достигает значений соответствующих \hat{r} или \tilde{r} , как и следует из (8) (см. рис. 2). Очень слабая корреляция исходных рядов солнечной активности и температуры является результатом разнонаправленного действия их CS- и NS-составляющих, имеющих при этом достаточно сильную связь, которая характеризуется $\langle \hat{r} \rangle$ и $\langle \tilde{r} \rangle$.

Исследование полученных соотношений (10), (11) было сначала проведено в численном эксперименте. Использовалась выборка псевдослучайных чисел объемом в 200 рядов, каждый ряд имел 2^{12} элементов, распределенных по закону, близкому к нормальному. Ряды, моделирующие температуру по 100-градусной шкале Цельсия, были знакопеременные; для ряда Вольфа генерировались положительные числа. Изменялись дисперсия рядов, их

спектральная плотность. Определенной зависимости полученных оценок средних величин от этих параметров установлено не было.

Из рис. 3 видно, что средние значения CS- либо NS-составляющих отличны от нуля только по одну сторону от граничной точки. Эта граничная точка играет роль нулевой изотермы. В данном случае граничная точка одна, так как произведено упорядочение рядов, моделирующих температуру, по их среднему значению $\langle x_{k,l} \rangle_k$.

Рассмотрим эксперимент, результаты которого демонстрирует адекватность представленной теории сезонным циклам и их особым точкам, тем самым верифицируя ее. После декомпозиции рядов температуры и ряда чисел Вольфа находились средние значения их CS- и NS-составляющих за 56 лет для каждой из 249 метеостанций. Затем станции, в соответствии со своими географическими координатами, упорядочивались в направлении с севера на юг, определялась «северная» и «южная» группа по 125 метеостанций в каждой. Станция № 125 присутствовала в обеих группах. То же самое было выполнено для станций, упорядоченных по возрастанию среднемесячной температуры: первые 125 станций отнесены к «холодной» группе, другие 125 – к «теплой».

Для каждого месяца определялось суммарное число станций, попадающих в зону положительных или отрицательных температур и в зависимости от попадания их в ту или иную группу после упорядочения. Это число нормировалось на 249 либо на 125, т.е. приводилось к интервалу от нуля до 100%. Результат показан на рис. 4.

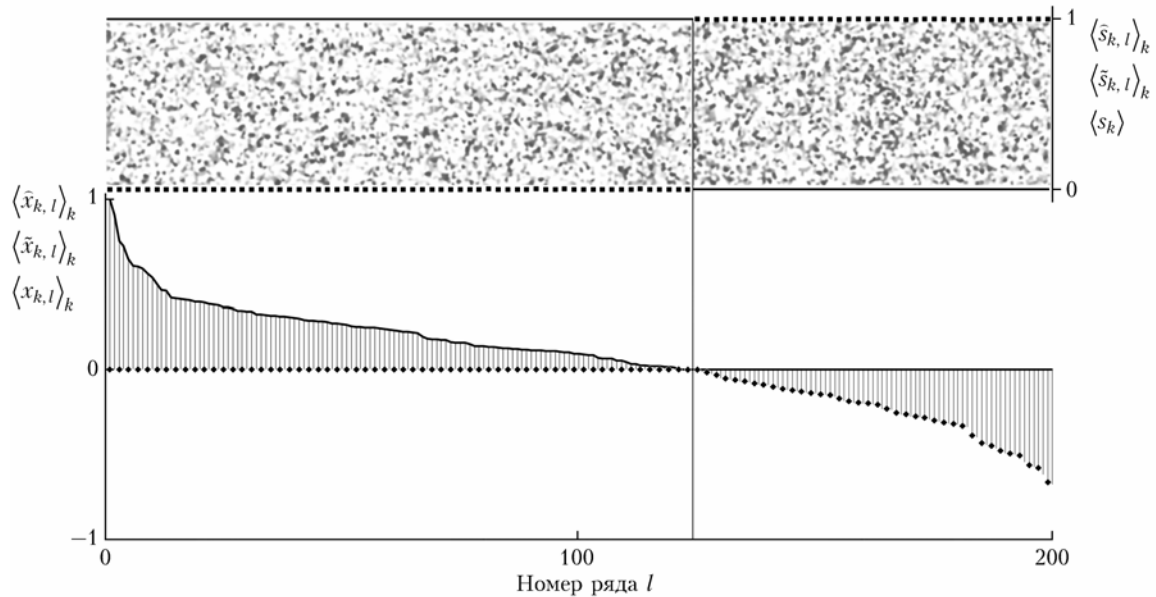


Рис. 3. Средние значения CS- и NS-составляющих рядов псевдослучайных чисел. Непрерывная линия, ось ординат слева – $\langle \hat{x}_{k,l} \rangle_k$, ось справа – $\langle \tilde{s}_{k,l} \rangle_k$; ромбики – $\langle \hat{x}_{k,l} \rangle_k$, квадратики – $\langle \tilde{s}_{k,l} \rangle_k$; штриховка – $\langle x_{k,l} \rangle_k$, серая заливка – $\langle s_k \rangle$. Ряды упорядочены по убыванию величины $\langle x_{k,l} \rangle_k$

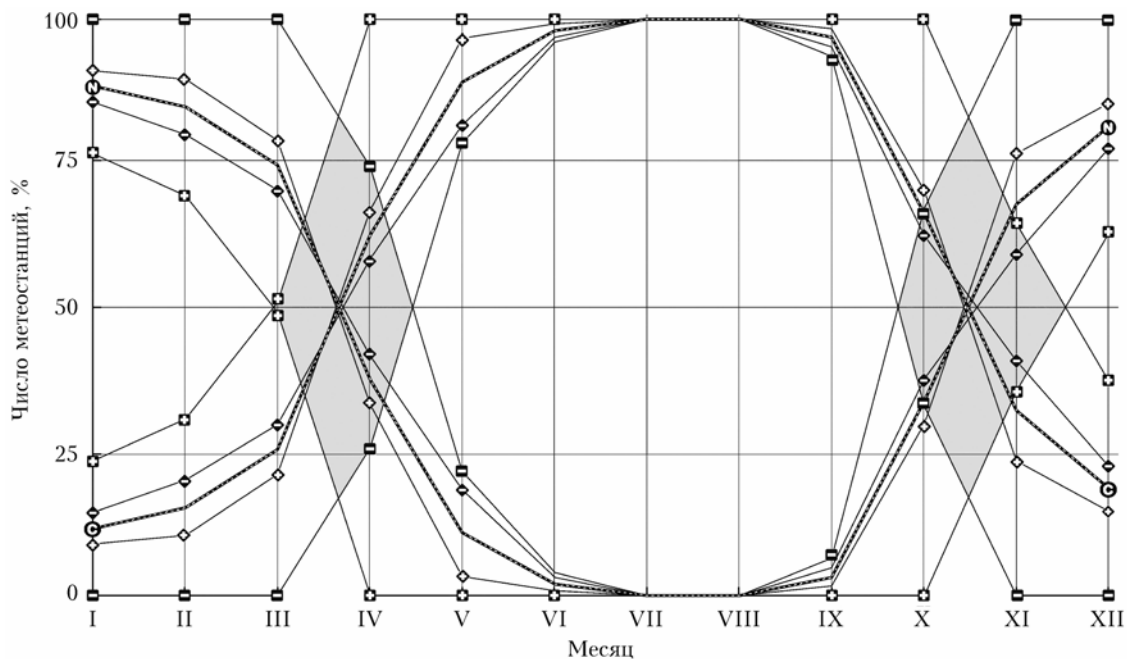


Рис. 4. Суммарное за 56 лет число метеостанций, попадающих в зоны среднемесячных положительных или отрицательных температур. Все 249 станций: \odot , \ominus ; станции, упорядоченны с севера на юг (\diamond – «северные», \square – «южные»), по возрастанию средней температуры (\square – «холодные», \square – «теплые»). Выгнутые вверх кривые соответствуют количеству станций в зонах положительных средних температур, сформированных CS-составляющими, выгнутые вниз – количеству станций в зонах отрицательных средних от NS-составляющих. Серый фон – области весеннего и осеннего периодов

Пересечение линий, характеризующих число станций в зонах, сформированных CS- и NS-составляющими, как точка равновесия обозначает начало или конец некоторого периода. Отметим два переходных периода: весенний и осенний. Весенний период наступает в начале марта, эта точка обозначена пересечением линий для «теплых» станций (\square). Конец весеннего периода, в середине апреля, обозначен пересечением линий для «холодных» станций (\square). Внутри этого временного интервала попадает весеннее равноденствие, когда ось вращения Земли расположена перпендикулярно направлению на Солнце и время дневного прогрева атмосферы и ее ночного охлаждения не зависит от широты. Поэтому вблизи точки весеннего равноденствия пересекаются все линии, кроме тех, что соответствуют группам станций, упорядоченных по возрастанию средней температуры, так как для более теплых мест весна начинается раньше и заканчивается позже для более холодных.

Начало осеннего периода обозначено пересечением линий для «холодных» станций вблизи осеннего равноденствия. В это время в местах расположения «холодных» станций уже отсутствует тепло, накопленное в предшествующий период в воде и почве, и приземный слой атмосферы нагревается непосредственно от Солнца с сохранением баланса дневного прогрева и ночного охлаждения. Осенний период заканчивается пересечением в середине ноября линий для «теплых» станций, – накопленное тепло исчезло и для них. Все остальные пересечения осеннего периода попадают на середину октября, характеризуя в этих группах станций промежуточные тем-

пературные режимы по сравнению со станциями, упорядоченными по средней температуре, «теплыми» и «холодными».

Можно полагать, что точки пересечения кривых на рис. 4 устанавливают естественные границы переходных периодов – весеннего и осеннего. Подобным образом определяются естественные границы холодного и теплого периодов сезонного цикла. Они разграничены весенним равноденствием и серединой октября. Характерно, что по этому определению теплый период на данной территории в среднем длиннее холодного и составляет 7 мес. Известные факты, что июль и август являются наиболее теплыми месяцами, что январь холоднее декабря, а февраль – ноября, также следуют из хода зависимостей на рис. 4.

4. Описание распределений составляющих температуры и солнечной активности

Как было установлено (10), (11), средние CS- и NS-составляющих температурных рядов формируют зоны, разграниченные нулевой изотермой. Для иллюстрации этого свойства было рассчитано распределение среднемесячной температуры в период с 1955 по 2010 г. на 249 метеостанциях. С учетом сезонного хода CS- и NS-составляющих на рис. 4 проведем помесячный анализ полученных карт, показанных на рис. 5 (цв. вклейки). Учтем, что эти карты также отображают зоны, где среднемесячные значения CS-составляющих рядов чисел Вольфа

больше нуля, а NS-составляющих — меньше нуля в соответствии с их свойствами.

Январь. Поле температуры имеет очаговый характер, ее минимум -45°C располагается в районе Верхоянска—Оймякона. От этого центра температура к северу повышается до $-20 \div -25^{\circ}\text{C}$, к югу до -15°C , а к юго-западу до 5°C . К западу температура повышается до -5°C , при этом до Средней Сибири изотермы имеют меридиональное направление, что свидетельствует о влиянии Атлантического океана на температурное поле вплоть до территории Восточной Сибири. На северо-западе территории температура повышается до 0°C , что объясняется влиянием Гольфстрима. Прогрев наблюдается на юго-западе территории, что связано с большим водным объектом — Каспийским морем. В зоне положительных средних температур действует CS-составляющая, которая связана прямой зависимостью с солнечной активностью на данной территории. Внутри зоны, ограниченной нулевой изотермой, действует NS-составляющая, она связана обратной зависимостью с солнечной активностью. В силу таких связей энергия Солнца поддерживает как положительные, так и отрицательные значения средних температур. Все 125 (100%) «холодных» станций попадают в зоны отрицательных средних температур, там же находятся около 76% «теплых» станций; соответственно около 24% «теплых» станций находятся в зоне положительных средних температур.

Февраль. По сравнению с январем общая картина не меняется, кроме повышения температуры до -40°C в центре очага холода Верхоянск—Оймякон. Нулевая изотерма по-прежнему охватывает все «холодные» станции, но число «теплых» станций в этой зоне уменьшилось и, соответственно, увеличилось их число в зоне положительных средних температур.

Март. Отмечается увеличение температуры на 5°C по всей исследуемой территории. Очаг минимальной температуры, охваченный изотермой -30°C , уменьшается в размерах. Центр следующей замкнутой изотермы -25°C смещается на север и располагается в районе Новосибирских островов. Зона, охватываемая нулевой изотермой, уменьшается, но все «холодные» станции еще остаются там. Количество «теплых» станций стало примерно одинаковым в каждой из зон, что характеризует март как пограничный месяц.

Апрель. Очаг холода перемещается дальше к северу, и центр его достигает района с координатами 80° с.ш. и 140° в.д. Но произошли качественные изменения, и нулевая изотерма больше не охватывает «теплые» станции, так как западные, юго-западные и южные территории уже лежат в зоне положительных средних температур, формируемой CS-составляющими. Такое состояние «теплых» станций сохраняется до октября включительно.

Май—июнь. Очаг холода смещается за 80° с.ш. Зона внутри нулевой изотермы резко сокращается в размерах и не охватывает «теплые» станции. Температура увеличивается.

Июль—август. В этот период отрицательных температур на исследуемой территории не наблюда-

ется. Станции из всех групп охвачены зоной действия CS-составляющих. Очаг минимальных температур стационарировал и переместился за 80° с.ш. Наступили два самых теплых месяца.

Сентябрь—октябрь. В сентябре появляются отрицательные температуры, поле температуры сентября по положению изотерм напоминает поле температуры июня, но градиенты температуры в сентябре меньше. Очаг холода смещается на юг. Нулевая изотерма еще не охватила «теплые» станции. Расширяясь, она пока захватывает все большее число «холодных» станций. Октябрь, так же как и март, — пограничный месяц, хотя есть отличия в соотношении составляющих (см. рис. 4).

Ноябрь—декабрь. Этот период по расположению изотерм напоминает январь—февраль, но ноябрь является пограничным месяцем и имеет другие соотношения составляющих (см. рис. 4) в отличие от февраля.

В итоге реализуется сезонный цикл, в ходе которого зоны положительных температур увеличиваются от января к июлю—августу, затем происходит их уменьшение практически по той же схеме. Этот процесс можно наблюдать как на всем температурном поле, так и по путям движения очага холода.

Заключение

Внешнее вынуждающее воздействие проявляется в сходстве существенных признаков процессов, инициируемых им в геосферах. Гипотеза о существенных признаках как результат опыта и аппарат преобразования Фурье были применены к рядам наблюдений, реализуя тем самым феноменологический подход.

Введены ортогональные CS- и NS-составляющие процессов, отличающиеся совпадением и несовпадением существенных признаков.

Для вычисления составляющих разработаны новые алгоритмы, их применение максимизирует коэффициенты корреляции CS- и NS-составляющих рядов температуры и солнечной активности, что обеспечивает оптимальное решение задачи декомпозиции.

Решение задачи декомпозиции будет единственным для заданного набора рядов и выбранного функционального базиса, при конкретном уровне шумов и фильтре для их подавления.

Обнаружено, что CS- и NS-составляющие температуры в среднем формируют зоны положительных и отрицательных температур. В эти же зоны, разграниченные нулевой изотермой, попадают средние значения аналогичных составляющих ряда чисел Вольфа.

Предложенная теория соответствует физике климатообразующих процессов, что подтверждается совпадением сезонного температурного цикла с изменением зон, формируемых CS- и NS-составляющими. Особенно важно пересечение вблизи точки весеннего равноденствия графиков годового хода числа метеостанций, попадающих в зоны среднемесячных положительных или отрицательных температур.

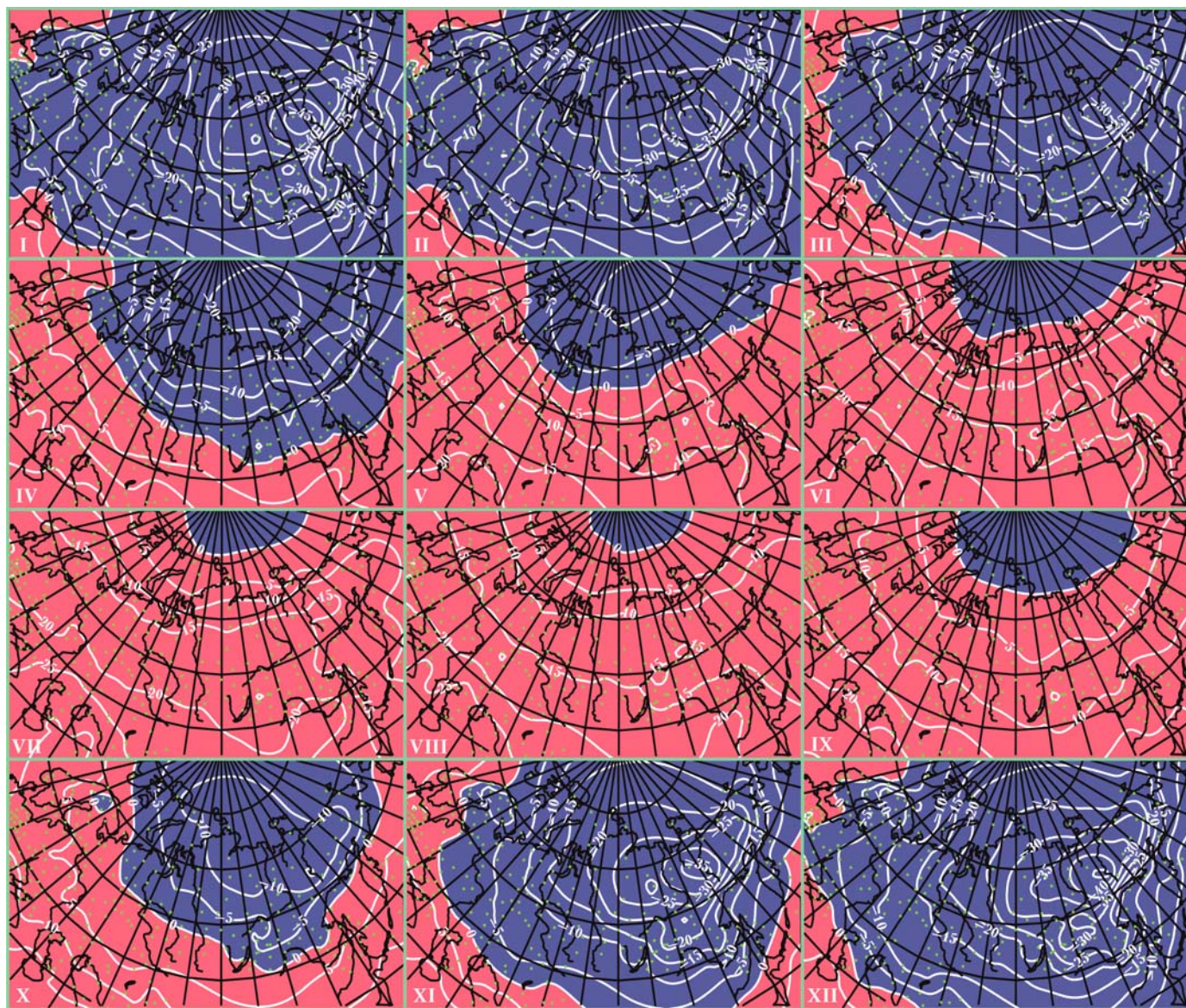


Рис. 5. Карты среднемесячной температуры за период с 1955 по 2010 г., рассчитанные для 249 метеостанций (бирюзовые точки). В той же мере карты отображают зоны, где среднемесячные значения CS-составляющих рядов температуры и чисел Вольфа больше нуля (красный цвет), а NS-составляющих меньше нуля (синий цвет), нулевая изотерма разделяет эти зоны

Таким образом, новый инструмент для анализа информации, содержащейся в данных наблюдений природно-климатических процессов, имеет перспективы для применения и интерпретаций.

1. *Витинский Ю.И.* Солнечная активность. М.: Наука, 1983. 192 с.
2. *Солнечно-земные связи, погода и климат* / Под ред. Б. Мак-Нормана, Т. Селиги: Пер. с англ. М.: Мир, 1982. 382 с.
3. *Монин А.С.* Прогноз погоды как задача физики. М.: Наука, 1969. 184 с.
4. *Пудовкин М.И.* Влияние солнечной активности на состояние нижней атмосферы и погоду // Сорос. образов. ж. 1996. № 10. С. 106–113.
5. *Будовый В.И., Хорозов С.В., Инасио М.М., Медведев В.А., Белоголов В.С.* К вопросу о характере и механизмах влияния солнечной активности и космических лучей на годовое количество осадков в различных регионах планеты. Россия. www.irc.phys.spbu.ru/msar06/ger.1doc
6. *Куклин Г.В.* О связи чисел Вольфа и потока радиоизлучения Солнца на частоте 2800 МГц // Солнечные данные. 1984. № 1. С. 87–95.
7. URL: ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/stp/solar_data/sunspot_numbers/group_sunspot_numbers/
8. URL: <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/station-data/station-data.zip>
9. *Любушин А.А.* Анализ данных систем геофизического и экологического мониторинга. М.: Наука, 2007. 228 с.
10. *Пузаченко Ю.Г.* Математические методы в экологических и географических исследованиях. М.: Изд. центр «Академия», 2004. 416 с.
11. *Тартаковский В.А., Воронин В.И., Маркелова А.Н.* Экологический мониторинг: совместная фильтрация дендрохронологий Байкальского региона // Инженерная экология. 2009. № 6. С. 17–26.
12. *Тартаковский В.А., Кусков А.И.* О признаках согласованности природно-климатических процессов // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 1. С. 35–39.
13. *Tartakovsky V.A., Voronin V.I., Markelova A.N.* External forcing factor reflected in the common signals of $\delta^{18}\text{O}$ -tree-ring series of *Larix sibirica* Ledeb in the Lake Baikal region // Dendrochronologia. 2012. V. 30, N 3. P. 199–208.
14. *Крутиков В.А., Кусков А.И., Иванова Э.В., Тартаковский В.А.* О связности региональных и глобальных полей температуры над азиатской территорией России // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 2. С. 117–121.

V.A. Tartakovsky, A.I. Kuskov. Decomposition of the observed temperature and sunspot number sets. Features of the mean-values.

A hypothesis is put forward assuming that the external forcing action synchronizes the climatic processes and manifest itself in the similarity of their essential indicators. Orthogonal components of processes, differing in coincidence or non-coincidence of the essential indicators are introduced. The theory is applied to decompose a series of temperature and the Wolf numbers. It is found that the average quantities of orthogonal components of temperatures form areas either positive or negative values. In the same areas, delimited by the zero isotherms, fall average quantities of the same components of the Wolf numbers. Compliance with the physics of climatic processes is confirmed by the intersection near the vernal equinox of annual cycle of the numbers of the weather stations, which belong to the areas of monthly average positive or negative temperatures. A new tool is found to analyze the information contained in the observation data of climatic processes.